

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DOS POSSÍVEIS IMPACTOS DECORRENTES DAS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ**

Felipe Turatti

Lajeado, junho de 2016.

Felipe Turatti

**ANÁLISE DOS POSSÍVEIS IMPACTOS DECORRENTES DAS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ**

Monografia apresentada no Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC), do Centro Universitário Univates, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira

Lajeado, junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre guiando meus passos e me auxiliando nas provas da vida.

Agradeço aos meus pais Nestor e Ana Maria que são exemplos de amor, respeito e caráter e que sempre estiveram ao meu lado para me incentivar, proteger, esforçando-se muito para me proporcionar a conclusão deste sonho.

Agradeço à minha querida namorada Emanuele Begnini Cristovão, que esteve ao meu lado em momentos essenciais, me apoiando e dando forças, sempre que precisei.

Agradeço ao meu irmão Fabricio, que esteve ao meu lado em momentos essenciais, me apoiando e dando forças.

Ao meu orientador Guilherme, que foi fundamental desde o direcionamento do tema até a conclusão deste trabalho, auxiliando sempre quando estive nervoso ou com dúvidas. Obrigado por toda a paciência, amizade e compreensão.

Aos demais professores da Instituição pelos conhecimentos compartilhados.

Aos meus amigos, por toda a amizade e compreensão, e aos meus queridos colegas de faculdade, que fizeram com que esses anos fossem muito mais divertidos e especiais.

A todos que me ajudaram de uma ou outra forma a chegar até aqui, muito obrigado! Não há palavras para expressar a minha gratidão.

*“Que vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível” Charles Chaplin.*

RESUMO

As mudanças climáticas tem sido o foco de discussões político-ambientais em todo o mundo. Em vista disto, diversos estudos têm sido realizados nas últimas décadas sobre o tema, principalmente, no que se refere à maneira como o homem pode potencializar este processo. Estas mudanças afetam diretamente o balanço hídrico do planeta, podendo provocar diversos impactos, como o calor excessivo no verão, tempestades tropicais muito mais intensas, entre outros. Em vista disso, este trabalho busca realizar uma análise da disponibilidade hídrica para o futuro, levando em consideração as mudanças climáticas, na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, localizada no estado do Rio Grande do Sul, uma vez que esta já sofre com a escassez hídrica, no período de verão. Para tanto, foi utilizado o modelo hidrológico IPH-II para transformar a precipitação em vazão. O modelo foi calibrado utilizando o algoritmo SCE-UA. Nesse processo de modelagem foi necessária a obtenção de dados de precipitação, vazão e temperatura, esta última para ser transformada em evapotranspiração pelo método de Thornthwaite. Na segunda etapa, foram geradas séries sintéticas estocásticas futuras para precipitação e temperatura, fazendo o uso do modelo MAGICC/SCENGEN que usa critérios do Quarto Relatório Científico do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, para gerar cenários futuros. As séries estocásticas foram geradas com modelos estatísticos, markovianos, e por meio do modelo de Thomas-Fiering. Após isso, foram simuladas 25 séries de vazão para o período futuro, entre 2021 e 2050. O modelo calibrado apresentou um coeficiente Nash-Sutcliffe satisfatório, igual a 0,75. O processo de geração de séries sintéticas estocásticas se mostrou satisfatório apresentando um erro médio de apenas 0,2%. De modo geral, as séries geradas para o futuro apresentaram aumento nas precipitações e na taxa de evapotranspiração. Além disso, pode-se observar uma tendência de aumento na disponibilidade hídrica, por meio da análise da vazão média e de vazões mínimas como a Q7 (vazão mínima com duração de sete dias). Entretanto, também foi observado que, no período futuro (2021-2050), poderão ocorrer períodos críticos quanto às vazões no rio Gravataí, principalmente nos meses que antecedem o verão (outubro e novembro), período com maior demanda hídrica para o cultivo do arroz na bacia. Isso poderá resultar na escassez de água principalmente para atividades agrícolas e abastecimento nas cidades da Região Metropolitana de Porto Alegre.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, Modelos estocásticos, Climatologia, Recursos hídricos.

ABSTRACT

Climate change has been the focus of political and environmental discussions worldwide. In view of this, various studies have been made in the last decades on this subject, especially regarding the way mankind can boost this process. These changes directly affect the water balance of the planet, which can cause various effects, such as excessive heat in summer, heavier tropical storms, among others. Considering that, this paper seeks to carry out an analysis of water availability for the future, taking into account climate change, in the Gravataí River Basin, in the state of Rio Grande do Sul, since it already suffers from water scarcity during summer time. Therefore, the hydrologic model IPH-II was used to convert precipitation into flow. The model was calibrated using the SCE-UA algorithm. In the modeling process it was needed to obtain precipitation, flow and temperature data, the latter to be converted into evapotranspiration by Thornthwaite method. In the second stage, were generated future synthetic stochastic series for precipitation and temperature, through the MAGICC/SCENGEN which uses criteria of the Fourth Scientific Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, to generate future scenarios. The stochastic series were generated with markovian, statistical models, and through the Thomas-Fiering model. After that, were simulated 25 flow series for the future period, between 2021 and 2050. The calibrated model presented a satisfactory Nash-Sutcliffe coefficient, equal to 0.75. The process of stochastic synthetic series generation proved itself to be satisfactory with an average error of only 0.2%. In general, the generated series for the future showed increases in rainfall and evapotranspiration ratio. Moreover, one can observe an increasing trend in water availability, through the average flow analysis and minimum flow rates such as the Q_7 (minimum flow lasting seven days). However, it was also observed that in the future period (2021-2050), there may be critical periods as the flow in the Gravataí river, especially in the months before the summer (October and November), when there is greater water demand for rice cultivation in the basin. This may result in water scarcity mainly for agricultural activities and water supply in the cities of the metropolitan area of Porto Alegre.

Keywords: Hydrologic modeling, stochastic models, climatology, water resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo Hidrológico.....	17
Figura 2 – Delimitação de uma bacia hidrográfica.....	21
Figura 3 – Divisão Hidrográfica Atual do Rio Grande do Sul	36
Figura 4 – Localização da Bacia Hidrográfica do Gravataí com os limites dos municípios....	37
Figura 5 – Divisão das macrorregiões da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí.	39
Figura 6 – Equação de ajuste dos dados da estação Passo das Canoas Auxiliar.	46
Figura 7 – Quadro Funções-objetivos do programa WIN_IPH2.....	51
Figura 8 – Interface de dados de entrada do software WIN_IPH2.....	54
Figura 9 – Hidrograma de comparação da vazão observada e a vazão calculada.	64
Figura 10 – Dispersão das vazões calculadas pelas observadas.	65
Figura 11 – Gráfico de precipitação observada – escala logarítmica – versus probabilidade acumulada. Comparando precipitações, observada com ajustada pela função Gamma.....	69
Figura 12 – Gráfico de erros médios mensais nas séries sintéticas geradas pelo método de Markov com distribuição Gamma.	70

Figura 13 – Gráfico de erros médios mensais nas séries sintéticas geradas de temperatura pelo modelo Thomas-Fiering.	71
Figura 14 – Mudança na precipitação acumulada mensal para o período futuro, entre 2021 e 2050, considerando a média dos 25 cenários projetados para o futuro.	73
Figura 15 – Gráfico das mudanças na temperatura média mensal para o período futuro (2021-2050).	75
Figura 16 – Mudança na evapotranspiração acumulada mensal para o período futuro, entre 2021 e 2050, considerando a média dos 25 cenários projetados para o futuro.	76
Figura 17 – Mudança na vazão mensal para o período futuro, entre 2021 e 2050, considerando a média dos 25 cenários projetados para o futuro.	79
Figura 18 – Mudança das vazões mínimas entre o período passado (1976-2005) e os 25 cenários do período futuro (2021-2050).	80
Figura 19 – Mudança das $Q_{7\text{dias}}$ mínimas entre o período passado (1976-2005) e os 25 cenários do período futuro (2021-2050).	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão das macrorregiões da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí apresentada na Figura 5.....	40
Tabela 2 – Municípios que compõe a Bacia Hidrográfica do Gravataí, total ou parcialmente.	41
Tabela 3 – Municípios que compõe a Bacia Hidrográfica do Gravataí, total ou parcialmente.	42
Tabela 4 – Demandas hídricas da Bacia Hidrográfica do Gravataí, referente a população de 2014.	43
Tabela 5 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo, provenientes do HIDROWEB.....	45
Tabela 6 – Nós utilizados para a interpolação das chuvas diárias.....	47
Tabela 7 – Fator de correção C_j do Método de Thornthwaite, para cada Latitude e cada mês.	49
Tabela 8 – Mudança na precipitação (%) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$) nos cenários do IPCC na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, considerando o período de base 1976-2005 e o período futuro 2021-2050.....	66
Tabela 9 – Probabilidade de ocorrência de precipitação considerando os dias anteriores.	68
Tabela 10 – Precipitação média mensal acumulada no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.	72

Tabela 11 – Evapotranspiração média mensal acumulada no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-20650), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.....	76
Tabela 12 – Vazões históricas no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050).	77
Tabela 13 – Vazão média mensal no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.	78
Tabela 14 – Vazão mínima mensal no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.	80
Tabela 15 – $Q_{7\text{dias}}$ mínima mensal no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.	81

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica.....	15
3.1.1 Precipitação	18
3.2 Mudanças climáticas	21
3.2.1 Efeito Estufa	24
3.3 Modelos hidrológicos	27
3.3.1 Modelos precipitação-vazão.....	29
3.3.2 Modelo IPH II	30
3.3.3 Modelo para transformar temperatura em evapotranspiração.....	32
3.3.4 Séries sintéticas hidrológicas	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 Área de Estudo.....	35
4.2 Calibração do modelo hidrológico	44
4.3 Geração de séries sintéticas para o futuro.....	55

4.3.1 Geração dos cenários para o futuro (2021-2050)	55
4.3.2 Geração de séries sintéticas estocásticas	58
4.4 Simulação hidrológica	61
4.5 Análises das séries geradas	61
5 RESULTADOS E DISCUÇÕES	63
5.1 Modelagem hidrológica	63
5.2 Séries sintéticas estocásticas futuras	66
5.2.1 Cenários futuros	66
5.2.2 Séries sintéticas estocásticas	68
5.3 Análises das séries geradas	71
5.3.1 Mudanças na precipitação em período futuro (2021-2050)	72
5.3.2 Mudanças na temperatura e evapotranspiração em período futuro (2021-2050) ...	74
5.3.3 Mudanças na vazão em período futuro (2021-2050)	77
6 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a água é um bem inestimável para a vida na Terra. Ela é crucial para o bem-estar da civilização, e essencial para a manutenção de um meio ambiente saudável. Segundo Bacci e Pacata (2008) a água tem importância fundamental para a vida no planeta, portanto estudá-la tem relevância para a sobrevivência humana e o equilíbrio da biodiversidade.

Com isso o ser humano buscou estudar como aproveitar melhor este recurso que necessita tanto. A ciência que estuda a água, sua ocorrência, circulação e distribuição, também suas propriedades físicas e químicas e sua relação com o meio ambiente e antrópico, é a hidrologia (TUCCI, 2000).

No estudo da hidrologia um aspecto importante são as mudanças climáticas, que nas últimas décadas estão gerando discussões por serem cada vez mais evidentes, pois notam-se significativas alterações na atmosfera e variações no clima. Já é visível que o sistema climático global está mais quente, pois com o aumento da temperatura média dos oceanos e da atmosfera, tem-se um aceleração no degelo das calotas polares, com isso o aumento do nível médio dos mares (OLIVEIRA, 2014; IPCC, 2013).

Acredita-se que um dos principais fatores para o aquecimento do planeta seja a maior emissão de gases causadores do efeito estufa, que estão sendo emitidos mais intensamente pela humanidade, principalmente nesses últimos séculos, após a revolução industrial.

Estima-se que no futuro as temperaturas aumentarão ainda mais em todo o planeta. Segundo Marengo (2007), o Brasil é vulnerável as mudanças climáticas atuais e mais ainda do futuro. Oliveira (2014) diz que a temperatura média no Brasil pode aumentar entre 1 e 6 graus

Celsius, variando com o local de previsão, o aumento dos gases de efeito estufa e os modelos climáticos adotados.

Para a região sul do Brasil, Oliveira (2014) indica que haverá aumento nas temperaturas médias e das precipitações de chuva durante todo ano, em todas as estações, para este século, porém há grandes incertezas sobre as chuvas no futuro. Mas é possível estudar impactos das mudanças climáticas em vários aspectos da sociedade e da natureza, permitindo assim, o homem antecipar soluções e adotar medidas preventivas.

De acordo com Marengo (2007) o conhecimento sobre possíveis cenários climático-hidrológicos futuros e as suas incertezas pode ajudar a estimar demandas de água no futuro, com isso definir medidas políticas ambientais de uso e gerenciamento de água.

O Plano Estadual de Recursos Hídricos-PERH, (2007) aborda os aspectos relacionados à situação de 25 bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul, onde faz uma avaliação quali-quantitativa dos recursos hídricos nessas bacias, apresenta um diagnóstico das disponibilidades hídricas, analisa as demandas de água, apresenta um balanço hídrico das bacias e regiões, indicando as áreas críticas em relação à demanda de água, entre outros aspectos abordados no plano.

Das 25 bacias hidrográficas do Estado, sete encontram-se, pelos critérios considerados, em situação crítica, ou seja, mais que um quarto das bacias hidrográficas demanda atenção especial quanto aos seus recursos hídricos (DRH/SEMA, 2007). Uma delas é a bacia do Gravataí que apresenta insuficiência hídrica, principalmente no verão, quando há maior demanda na irrigação de arroz, além do aumento do abastecimento humano.

A bacia localizada a nordeste do estado do Rio Grande do Sul abriga cerca de 1,3 milhões de habitantes, aproximadamente 19,14% da população do estado (PERH/RS, 2007) e é composta pelos municípios de Alvorada, Cachoeirinha, Canoas, Glorinha, Gravataí, Porto Alegre, Santo Antônio da Patrulha, Taquara e Viamão, (SALOMONI, 2004; PERH/RS, 2007).

Pelo fato da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí já estar sofrendo com a escassez de água no verão, este trabalho busca estudar as mudanças climáticas para a bacia nos próximos trinta anos, buscando identificar se no futuro a bacia continuará sofrendo com a insuficiência hídrica, ou se para o período futuro haverá maior disponibilidade deste bem tão precioso para a sobrevivência humana.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar os possíveis impactos decorrentes das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Gravataí, RS, Brasil, para o período futuro de 2021 a 2050.

2.2 Objetivos específicos

- Calibrar um modelo hidrológico capaz de transformar precipitação em vazão para simulação de cenários futuros de vazão;
- Gerar séries sintéticas estocásticas de precipitação e temperatura para o futuro com base nas séries históricas e nas projeções provenientes dos modelos climáticos globais;
- Gerar séries de vazões para o futuro a partir das séries sintéticas de precipitação e temperatura, fazendo uso do modelo hidrológico calibrado;
- Realizar uma análise das mudanças nos regimes de precipitação, evapotranspiração e vazão no futuro, entre 2021 e 2050, buscando identificar alterações nos valores mínimos, médios e máximos destas variáveis.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica

Desde o surgimento do homem a quantidade total de água na Terra, nos três estados físicos (sólida, líquida e gasosa) tem se mantido estável. Os oceanos, os continentes e a atmosfera constituem os principais reservatórios onde a água circula continuamente - Ciclo Hidrológico (PINTO, 1973; WARD, 2000; LIMA, 2000; PAZ, 2004).

O Ciclo Hidrológico é definido como sendo um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície da Terra e a atmosfera, impulsionado pela energia solar associada com a gravidade e a rotação terrestre (SILVEIRA, 2013; GARCEZ e ALVAREZ, 1988; COLLISCHONN e DORNELLES *et al.*, 2013; LOU, 2010).

Considera-se como superfície terrestre os continentes e os oceanos, sendo considerado a camada porosa que recobre os continentes (solos e rochas) e os reservatórios formados pelos oceanos. Onde a circulação de água na superfície e em seu interior, solos e rochas constitui parte do ciclo hidrológico. A outra parte é constituída pela atmosfera que é dividida basicamente em cinco camadas (troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera, exosfera), porém a maioria dos fenômenos meteorológicos acontece na troposfera, camada inferior da atmosfera com espessura entre 8 e 16 Km, que é onde está contida aproximadamente 90% da umidade atmosférica. A segunda camada, a estratosfera, com 40 a 70 Km de espessura, também tem sua importância para o ciclo hidrológico, pois nela está contida a camada de ozônio, que regula a radiação solar ultravioleta que atinge a superfície da Terra. A água na atmosfera circula através das correntes aéreas, deslocando-se no tanto no estado de vapor, como também nos estados

líquido e sólido, formando nuvens (TUCCI, 2000; SILVEIRA, 2013; COLLISCHONN e DORNELLES *et al.*, 2013).

A circulação de água entre atmosfera e superfície dá-se nos dois sentidos. No sentido superfície-atmosfera, onde os fenômenos de evaporação e transpiração transfere a água na forma de vapor. Já no sentido atmosfera-superfície a transferência dá-se em qualquer estado físico, pela precipitação de chuva, neve ou granizo (SILVEIRA, 2013; COLLISCHONN e DORNELLES *et al.*, 2013).

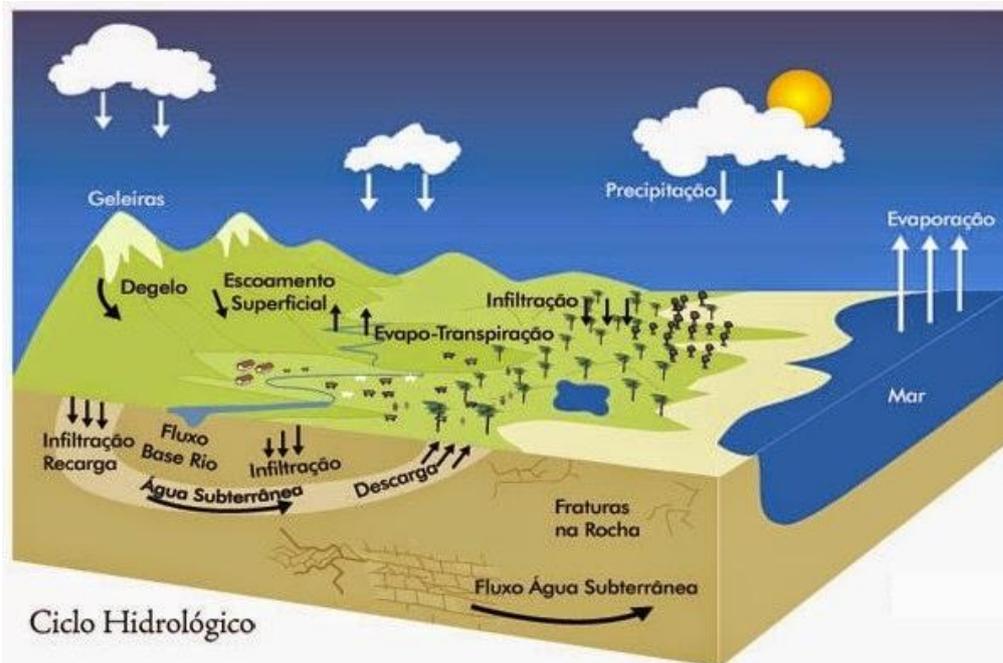
Silveira (2013) ainda ressalta que o ciclo hidrológico só é fechado em nível global, pois considerando o nível local não podemos definir assim, já que os volumes evaporados não precipitam no mesmo local, devido a movimentos contínuos e com dinâmicas diferentes tanto na atmosfera quanto na superfície terrestre.

Um exemplo disso é a precipitação que ocorre nos continentes e escoam em grande parte para os oceanos, onde, a evaporação ocorre com maior facilidade. Por isso se define que o ciclo hidrológico é aberto a nível local e fechado a nível global.

Para se ter uma ideia, de toda a água da Terra, que é de aproximadamente $1,4 \times 10^{15} \text{ m}^3$, o ciclo hidrológico movimenta cerca de 577 mil Km^3 por ano, isso em termos globais. Ou seja, 577 mil Km^3 por ano precipitam e atingem os continentes e oceanos e esses mesmos 577 mil Km^3 por ano evaporam ou são transpirados de volta para a atmosfera. Dividindo pelos principais processos do ciclo hidrológico se tem aproximadamente uma precipitação de 458000 Km^3/ano nos oceanos e 119000 Km^3/ano nos continentes, e uma evaporação de 505000 Km^3/ano nos oceanos e 72000 Km^3/ano nos continentes. Ainda é considerado que o escoamento superficial para os oceanos seja de 44700 Km^3/ano e o escoamento subterrâneo seja de 2200 Km^3/ano (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Para descrever melhor o ciclo hidrológico, na Figura 1 são demonstrados os principais processos do ciclo hidrológico.

Figura 1 – Ciclo Hidrológico



Fonte: Imagem extraída do site <http://www.aquafluxus.com.br/ciclo-hidrologico> - acessado em 26/10/2015.

Os principais processos são (SILVEIRA, 2013; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013; TUCCI, 2005; PAZ, 2004):

- Precipitação: a forma mais comum é a chuva, mas se pode citar também a neve e o granizo, para ocorrer a precipitação, primeiro é necessário ocorrer a condensação do vapor d'água, que é a formação de microgotículas suspensas que se juntam com poeira e gelo formando as nuvens;
- Evapotranspiração: no mar principalmente e ainda no trajeto para a superfície já se tem evaporação, já parte da água que é infiltrada é absorvida pelos vegetais que devolvem boa parte para a atmosfera pela transpiração. Esses dois fenômenos podemos denominar evapotranspiração;
- Interceptação: é a água que fica retida nas folhas ou caules das árvores, parte também evapora;
- Infiltração: é o primeiro processo quando a água toca o solo, visto que o solo é poroso e a água infiltra (exceto em superfícies impermeáveis e na própria água). Isso ocorre enquanto o solo não está saturado, senão passa a ser escoamento superficial;

- Percolação: é a água infiltrada que não é aproveitada pelos vegetais, que percola para o lençol freático.
- Escoamento subterrâneo: dá-se após a infiltração e a percolação, principalmente pela base dos rios, também abastecendo o mar, mesmo as localizadas nos aquíferos acabam se renovando e escoando;
- Escoamento superficial: a água da chuva que não foi interceptada, não evaporou na precipitação, e chegou a um solo já saturado, escoou. O escoamento superficial é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, superando, principalmente, o atrito com a superfície do solo;
- Degelo: é basicamente o derretimento do gelo acumulado tanto nas calotas polares quanto nos picos mais altos do globo.

3.1.1 Precipitação

Precipitação é a água do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Segundo Collischonn e Dorneles (2013), no Brasil a principal forma de precipitação é a chuva, outras formas menos comuns neste país é a neve, neblina, granizo (este podendo causar grandes prejuízos). Por outro lado, Bertoni e Tucci (2013) incluem ainda a geada, comum no Sul do país, no inverno.

Por ser a única forma de entrada de água numa bacia hidrográfica, a disponibilidade de precipitação é de suma importância para quantificar o abastecimento de água doméstico e industrial, irrigação, controle de inundações, erosão do solo, etc. (BERTONI e TUCCI, 2013; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013; PAZ, 2004). Dentre as principais características da precipitação está a sua distribuição temporal e espacial, além da quantidade, intensidade e duração (BERTONI e TUCCI, 2013).

Basicamente, a formação da precipitação é atribuída à formação de gotículas nas nuvens que crescem até possuírem peso superior às forças que as mantêm em suspensão e precipitam. As nuvens são aerossóis, isto é, uma mistura de ar, vapor de água, poeira e micropartículas, e gotículas em estado líquido ou sólido. Estas ficam estáveis, em suspensão devido à turbulência

do meio atmosférico e/ou a existência de correntes ascendentes de ar que contrabalança com a força da gravidade (BERTONI e TUCCI, 2013).

Segundo Collischonn e Dorneles (2013), Paz (2004) e Bertoni e Tucci (2013) existem três tipos de chuvas:

- Chuvas convectivas: São chuvas causadas pelo movimento de massas de ar mais quentes que sobem e condensam. As chuvas convectivas ocorrem principalmente devido à diferença de temperatura nas camadas próximas da atmosfera terrestre. São caracterizadas por serem de curta duração porém de alta intensidade e abrangem pequenas áreas;
- Chuvas frontais ou ciclônicas: Ocorrem no encontro de massas de ar de características distintas (ar quente + ar frio). São caracterizadas por serem contínuas, apresentarem intensidade baixa a moderada e abrangem grande área;
- Chuvas orográficas: É originada quando uma massa de ar úmido que se desloca, encontra uma barreira topográfica (serra, montanha, etc), e é forçada a elevar-se, ocorrendo queda de temperatura seguida da condensação do vapor d'água e formação de nuvens. Chuvas orográficas apresentam pequena intensidade, e longa duração.

Para a medição das chuvas o aparelho mais utilizado é o pluviômetro, que consiste num instrumento capaz de medir a quantidade de chuva em uma determinada área. A partir dele, se obtém uma das grandezas que caracterizam as chuvas, a altura pluviométrica, que é a espessura da lâmina de água precipitada em um metro quadrado (mm/m^2). Outra grandeza é a duração, que é o tempo que transcorre durante uma chuva, normalmente medida em minutos ou horas.

Além disso, é possível estimar a intensidade e a frequência da chuva. A intensidade é a taxa de ocorrência da chuva ao longo do tempo, ou a altura precipitada pela duração, medida normalmente em $\text{mm}.\text{hora}^{-1}$. A frequência é a quantidade de ocorrências de eventos iguais ou superiores ao evento de chuva considerado, chuvas muito intensas ocorrem raramente, ou seja, com baixa frequência, enquanto, chuvas pouco intensas são mais comuns. O tempo de recorrência (TR), é o tempo entre um evento e outro (BERTONI e TUCCI, 2013; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013; RENNO e SOARES, 2000).

Com isto são montados postos de medição de chuva, conhecidas como estações pluviométricas, para se obter séries de chuva sem interrupção ao longo de anos.

O elemento fundamental na análise terrestre do ciclo hidrológico é a bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica de captação natural da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, que é chamado de exutório. A bacia é constituída por um conjunto de superfícies vertentes – terreno sobre o qual escoam a água precipitada – e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório (SILVEIRA, 2013; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013, GARCEZ e ALVAREZ, 1988).

A bacia hidrográfica é um sistema aberto, já que nem toda a precipitação (entrada de água) se torna escoamento no exutório (saída) ou fica armazenada na própria bacia. Há perdas intermediárias, relativas aos volumes evaporados, transpirados (pela vegetação) ou infiltrados profundamente. Tais volumes de água representam parcela da entrada no sistema que é “perdida” para a atmosfera ou para camadas profundas do subsolo (SILVEIRA, 2013; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013; GARCEZ e ALVAREZ, 1988). Entre a entrada e a saída da água da bacia ocorrem todos os processos do ciclo hidrológico.

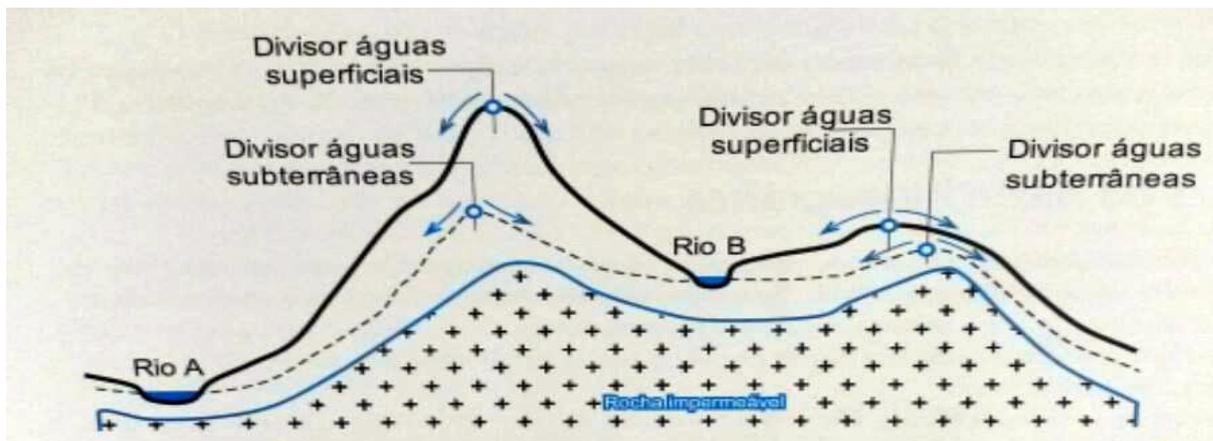
A Bacia Hidrográfica pode ser delimitada a partir do escoamento que se dá pela ação da gravidade, sendo definida como o conjunto de áreas que contribuem para um ponto. Logo, é fácil perceber que as regiões de terreno mais elevado estabelecem uma divisão entre a parte do terreno cujo escoamento segue até o rio em questão e a parte cujo escoamento segue para outro rio de outra bacia (PAZ, 2004).

Normalmente, uma bacia hidrográfica é definida por um curso de água, um ponto ou seção transversal desse curso, o exutório, e por informações do relevo. Com as informações do relevo (obtidas normalmente de mapas topográficos) é possível identificar os divisores de água (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013; PAZ, 2004).

O escoamento da água da chuva é dividido por uma linha imaginária sobre o relevo que é o divisor de águas. O divisor de águas pode ser traçado a partir da direção do escoamento da água em relação ao relevo levando em consideração as curvas de nível. Este divisor que é identificado através de mapas topográficos é chamado de divisor de águas superficiais ou divisor topográfico, baseado na ideia de que as águas escoam sobre a superfície do solo. Porém, as águas que infiltram no solo escoam em relação às rochas do subsolo (rochas impermeáveis), onde se delimita um divisor de águas subterrâneas (divisor freático). Como se pode ver na

Figura 2 o divisor de águas superficiais e o divisor de águas subterrâneas não coincidem. Isso ocorre em alguns casos, porém devido à dificuldade em saber onde estão realmente os divisores freáticos, as bacias são delimitadas pelos divisores topográficos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Figura 2 – Delimitação de uma bacia hidrográfica.



Fonte: COLLISCHONN e DORNELLES, 2013, p.21.

O corpo de água principal, que dá o nome à bacia, recebe contribuição dos seus afluentes, sendo que cada um deles pode apresentar vários contribuintes menores, alimentados direta ou indiretamente por nascentes. Assim, em uma bacia existem várias sub-bacias ou áreas de drenagem de cada contribuinte. A bacia hidrográfica serve como unidade básica para gestão dos recursos hídricos e até para gestão ambiental como um todo, uma vez que os elementos físicos naturais estão interligados pelo ciclo da água (TUCCI, 2002).

3.2 Mudanças climáticas

As mudanças climáticas se referem às alterações na dinâmica do clima, que ocorrem ao longo do tempo, em decorrência da variabilidade natural ou de atividades humanas (NOBRE, 2008).

Nas últimas décadas, aumentaram-se as discussões sobre mudanças e variabilidade climática, através de incontáveis pesquisas que comprovaram significativas alterações na composição da atmosfera e, por consequência, nas variáveis relacionadas ao clima (OLIVEIRA, 2014).

Desde a década de 1980, evidências científicas sobre a possibilidade de mudanças climáticas em nível mundial vêm despertando um interesse maior no público e na comunidade científica em geral. Em 1988, A OMM (Organização Meteorológica Mundial) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estabeleceram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O IPCC ficou encarregado de apoiar com trabalhos científicos nas avaliações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro. A Missão do IPCC é de “avaliar a informação científica, técnica e socioeconômica relevante para entender os riscos induzidos pela mudança climática na população humana” (MARENGO e SOARES, 2003, p 210).

O IPCC já publicou cinco relatórios sobre mudanças climáticas que nos ajudam a entender melhor as alterações no clima mundial. Vários autores usam como base de seus trabalhos científicos os relatórios do IPCC, e também contribuem para atualizar as informações.

O Primeiro Relatório Científico (AR1) foi publicado pelo IPCC em 1990 e as pesquisas sobre mudanças de clima têm se beneficiado com a interação entre cientistas de todo o mundo desde a publicação deste relatório. O Segundo Relatório Científico (AR2) sobre Mudanças Climáticas, publicado em 1995 forneceu as bases para as negociações chave que levaram à adoção do Protocolo de Kyoto em 1997. O Terceiro Relatório Científico (AR3) mostra que existem novas e fortes evidências de que a maior parte do aquecimento observado durante os últimos 50 anos é atribuída às atividades humanas (IPCC, 2001 a), o que já é de conhecimento público, pois tem sido anunciado em jornais e revistas científicas e pela imprensa mundial. Uma possível falha do AR3 é em relação à pesquisa sobre possíveis mudanças na frequência de extremos eventos de clima (MARENGO, 2007).

Nos últimos anos, foram publicados mais dois relatórios: i) o IPCC AR4, em 2007, que leva em consideração quatro principais cenários para o futuro até o final do século XXI; ii) e o mais recente, em 2013, IPCC AR5, onde foram explorados novos cenários de emissões atmosféricas para o futuro para ilustrar as consequências climáticas até 2100, os RCPs (*Representative Concentration Pathways*) (OLIVEIRA, 2014).

Mudança Climática é definida pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (IPCC, 2001b), como mudanças do clima no tempo devido à variabilidade natural e/ou resultado das atividades humanas. Outros autores definem como Mudança Climática a alteração da variabilidade natural devido apenas às atividades humanas, direta ou indiretamente. Isso se

dá pela dificuldade de separar a influência das atividades humanas sobre a variabilidade climática (TUCCI, 2002).

Tucci (2002) adota o termo Variabilidade Climática para explicar as variações do clima devido às condições naturais do planeta, em função de seus ciclos. O termo Mudança climática ele utiliza para definir alterações no clima que são resultados de atividades humanas (ações antrópicas).

Nos estudos dos recursos hídricos é necessária a avaliação dos processos hidrológicos que é baseada uniformidade das séries hidrológicas (registros pluviométricos, fluviométricos e outros), estatísticas da série hidrológica sem alteração no tempo. Porém, muitas vezes, não é obtida essa homogeneidade das séries devido às modificações climáticas (influenciadas pela humanidade), à falta de registros das séries para identificar a variabilidade natural nos processos climáticos, e pelas alterações nas características físicas, químicas e biológicas das bacias hidrográficas, tanto por causas naturais como antrópicas (TUCCI, 2002).

Se tratando de variabilidade climática, ou seja, variações de clima em função dos condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações, Marengo (2006) relata que ao analisar os relatórios do IPCC-AR3 (IPCC, 2001b) sobre a América Latina, observou que no Brasil, as mudanças climáticas têm variabilidade interanual e com escalas entre décadas (longo prazo). As mudanças com variabilidade interanuais são El Niño ou La Niña (aquecimento/esfriamento das águas superficiais do oceano Pacífico Tropical Central e do Leste, sendo o El Niño a fase quente no leste do Pacífico e a La Niña a fase fria). Enquanto, as decadal ou a longo prazo seriam grandes secas ou cheias no Nordeste brasileiro, sendo que, as secas, as que mais afetam esta região. Também se inclui nas variações decadais alguns períodos de seca na Amazônia, que agravados pelo El Niño, aumentando as queimadas na região. E ainda pode-se citar, a maior ocorrência de eventos extremos de chuva no Sudeste do Brasil, e maiores períodos chuvosos no Sul do país, que também são agravados em anos de El Niño.

O El Niño se refere a episódios quentes de ENSO (*El Niño Southern Oscillation*), que afeta o clima regional em diferentes partes do globo, e tem sido mais frequente, intenso e persistente desde a metade de 1970 com relação ao período anterior de 100 anos. Em grande parte da América do Sul, principalmente na bacia do rio da Prata as vazões e as precipitações aumentaram depois de 1970 (TUCCI, 2002).

Várias técnicas têm sido utilizadas para analisar o comportamento do clima ao longo dos anos, a paleoclimatologia tem sido uma área que tem utilizado elementos de física e biologia para entender a variabilidade climática durante o passar dos anos. O clima apresenta variabilidade do espaço e no tempo sazonal e interanual. A escala temporal pode variar de horas até milênios, os estudos em recursos hídricos geralmente estudam o comportamento dos sistemas hídricos dentro da sazonalidade anual e para períodos de dados geralmente da ordem de 15 a 80 anos. O estudo do comportamento climático na escala decadal ou tempos maiores permite analisar a influência do comportamento climático sobre o sistema global e, em específico, sobre os recursos hídricos (TUCCI, 2002).

Oliveira (2014) relata que de acordo com os relatórios do IPCC (2007; 2013), o aquecimento do sistema climático global já está sendo provado, pelo aumento das temperaturas médias do ar e dos oceanos, pelo aumento do nível médio dos mares e pela aceleração do degelo em regiões de clima montanhoso ou polar. Constatou-se em estudos desenvolvidos em escala global que devido à mudança do clima vários sistemas naturais estão sendo impactados.

Segundo Oliveira (2014), o aumento na concentração de gases do efeito estufa estaria provocando alterações climáticas mais rápidas do que o esperado naturalmente, tendo sido acelerado neste último século pelas atividades humanas.

3.2.1 Efeito Estufa

A radiação solar de onda curta penetra a atmosfera, aquecendo a superfície da terra. Parte desta radiação é absorvida e parte é refletida de volta para a atmosfera. A parcela absorvida produz aquecimento na superfície que emite radiação de onda longa (radiação térmica) que pode ser absorvida pelos gases encontrados na atmosfera, como o vapor d'água e o dióxido de carbono (CO₂). A absorção desta radiação de onda longa aquece a atmosfera, aumentando a temperatura da superfície. Este é o denominado efeito estufa (TUCCI, 2002).

O efeito estufa é muito importante para a sobrevivência na Terra. Nos dias de hoje ele está em evidência, pois o aumento da concentração dos gases que o compõe, devido às atividades humana na Terra, pode estar intensificando o efeito estufa e aumentando a temperatura média do planeta. Mas o efeito estufa é um processo natural, e se não houvesse este efeito na atmosfera, a temperatura da superfície seria 33°C mais fria (TUCCI, 2002).

Os gases, do efeito estufa, correspondem ao CO₂ (dióxido de carbono), CFC (clorofluorcarbonetos), Metano, ácido nítrico e o ozônio. Os gases são liberados na combustão de combustíveis fósseis, como o petróleo e seus derivados, e nas cidades cerca de 40 % deve-se à queima de gasolina e de óleo a diesel, fato que se traduz pelo número de automóveis. As indústrias também são responsáveis, uma vez que, emitem enxofre, chumbo e outros materiais pesados, bem como resíduos sólidos que ficam suspensos no ar (BARBOSA, 2007).

Tucci (2002) relata que existem registros indicando o aumento da concentração de CO₂, de 315 ppm (partícula por milhão) para 342 na atmosfera entre 1958 e 1983. Já Oliveira (2014) cita em seu trabalho que nos relatórios do IPCC (2007, 2013) relatam que os gases, do efeito estufa, aumentaram principalmente após 1750, início do processo de industrialização, e são atualmente bem superiores aos valores pré-industriais. E de acordo com o IPCC (2013) já são mais de 400 ppm de CO₂ na atmosfera. Valores estes bem superiores aos encontrados em pesquisas em testemunho de gelo do continente Antártico, para os últimos milênios.

3.2.2 Cenários Climáticos para o Futuro

Devido ao aquecimento gerado pelos gases de efeito estufa, o IPCC gerou vários cenários de emissão de gases e, conseqüentemente, de aumento da temperatura média do planeta. Esses cenários representam uma possível visão do desenvolvimento futuro de emissões de substâncias que têm um efeito radiativo potencial (gases de efeito estufa, aerossóis), baseado em dados como demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudança na tecnologia, assim como suas interações (IPCC, 2001 a, b). No AR2, são identificados cenários onde as projeções da mudança climática causadas pela humanidade dependem, entre outras coisas, das considerações feitas sobre as futuras emissões de gases de efeito estufa e aerossóis e da proporção de emissões remanescentes na atmosfera (MARENGO, 2007).

No IPCC, os cenários de emissão de gases de efeito estufa são conhecidos como cenários SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) e foram publicados em 2000, e alguns deles foram usados como base para as projeções climáticas do AR3 até 2100. Os cenários SRES mostram diferentes cenários futuros de mudanças climáticas, denominados de A1, A2, B1 e B2 (MARENGO, 2007).

O cenário A1 descreve um mundo futuro onde a globalização é dominante. Onde o crescimento econômico é rápido e o crescimento populacional é pequeno com um desenvolvimento rápido de tecnologias mais eficientes. Os principais temas subjacentes são a convergência econômica e cultural, com uma redução significativa em diferenças regionais e renda *per capita*. Neste mundo, os indivíduos procuram riqueza pessoal em lugar de qualidade ambiental. Há três cenários: A1B (cenário de estabilização), A1F (máximo uso de combustível fóssil) e A1T (mínimo uso de combustível fóssil) (IPCC, 2007).

Já o cenário A2 descreve um mundo futuro muito heterogêneo onde a regionalização é dominante. Existiria um fortalecimento de identidades culturais regionais, com ênfase em valores da família e tradições locais. Outras características são um crescimento populacional alto, e menos preocupação em relação ao desenvolvimento econômico rápido (IPCC, 2007).

O cenário B1 descreve uma rápida mudança na estrutura econômica mundial, onde ocorre uma introdução de tecnologias limpas. A ênfase está em soluções globais à sustentabilidade ambiental e social e inclui esforços combinados para o desenvolvimento de tecnologia rápida (IPCC, 2007).

Por fim, o cenário B2 descreve um mundo no qual a ênfase está em soluções locais à sustentabilidade econômica, social e ambiental. A mudança tecnológica é mais diversa com forte ênfase nas iniciativas comunitárias e inovação social, em lugar de soluções globais (IPCC, 2007).

Oliveira (2014) coloca que, no último relatório das Mudanças Climáticas (IPCC AR5, 2013), para ilustrar as consequências climáticas até o final do Século XXI, foram criadas quatro projeções diferentes, que foram denominados RCPs (*Representative Concentration Pathways*), e indicam a forçante radiativa de interesse em 2100, refletindo a capacidade de dissipar calor, onde relacionados a concentração equivalente de CO₂ na atmosfera. Os quatro cenários são:

- Cenário RCP 2,6 W/m²: cenário mais otimista, que prevê um pico na concentração de CO₂ de aproximadamente 490 ppm e um declínio deste valor até o final do Século XXI;
- Cenário RCP 4,5 W/m²: neste cenário o aumento das concentrações de CO₂ atingiria um pico de aproximadamente 650 ppm, com estabilização e consequente redução das emissões na segunda metade do Século XXI;

- Cenário RCP 6 W/m²: neste cenário o pico das concentrações de CO₂ seria de aproximadamente 850 ppm, com estabilização e consequente redução das emissões apenas nas últimas décadas do Século XXI;
- Cenário RCP 8,5 W/m²: no cenário mais pessimista, prevê que atinge uma concentração de CO₂ equivalente a 1.370 ppm, devido ao aumento das emissões de gases de efeito estufa até o final do Século XXI.

Estima-se que no futuro haverá um maior aumento nas temperaturas em todo o planeta. Marengo (2007) diz que o Brasil é vulnerável as mudanças climáticas atuais e mais ainda do futuro. Segundo Oliveira (2014) a temperatura média no Brasil pode aumentar entre 1 e 6 graus Celsius, variando com o local de previsão, o aumento dos gases de efeito estufa e os modelos climáticos adotados.

Para a região sul do Brasil, haverá aumento nas temperaturas médias durante todas as estações do ano, para este século, porém existem grandes incertezas sobre as chuvas no futuro. Mas é possível estudar impactos das mudanças climáticas em vários aspectos da sociedade e da natureza, permitindo assim o homem antecipar soluções e adotar medidas preventivas (OLIVEIRA, 2014). De acordo com Marengo (2007) o conhecimento sobre possíveis cenários climático-hidrológicos futuros e as suas incertezas pode ajudar a estimar demandas de água no futuro, com isso definir medidas políticas ambientais de uso e gerenciamento de água para o futuro.

3.3 Modelos hidrológicos

Pode-se definir um modelo hidrológico como uma representação matemática do fluxo de água por alguma parte da superfície e/ou subsuperfície da terra (RENNÓ e SOARES, 2003).

Um modelo, segundo Tucci (2005), é a representação simplificada de algum objeto ou sistema, numa forma fácil de acesso ou uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (MOREIRA, 2005). A ciência desenvolveu uma ferramenta para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas, que é o modelo hidrológico. Existem vários tipos de modelos hidrológicos, cada um com a função de representar as características de um determinado conjunto de bacias e processos hidrológicos (TUCCI, 2005; LOU, 2010). Um modelo ainda

permite investigar sobre possíveis mudanças futuras na bacia, como urbanização, desmatamento, modificações em um rio, construção de reservatórios, etc. (PAZ, 2004).

Os modelos podem ser classificados em tipos, quanto à forma com que representam os sistemas, sendo divididos em modelos físicos, analógicos e matemáticos. Os modelos físicos representam o sistema por um protótipo em escala menor. Os modelos matemáticos representam natureza do sistema através de equações matemáticas (PAZ, 2004).

Segundo Rennó e Soares (2003), os modelos também podem ser classificados como: empíricos ou conceituais; estocásticos ou determinísticos; concentrados ou distribuídos; estacionários ou dinâmicos.

Um modelo é classificado como estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório, ou seja, é considerado a chance de ocorrência das variáveis, ao ser introduzido o conceito de probabilidade. O modelo determinístico, por sua vez, segue uma lei definida, sem considerar as chances de ocorrência dos valores das variáveis. Ou seja, quando para uma mesma entrada, o modelo produz uma mesma saída (com condições iniciais iguais) o modelo é classificado como determinístico. No modelo estocástico a relação entre entrada e saída é estatística (há chances de ocorrência para cada determinado valor) (PAZ, 2004; RENNÓ e SOARES, 2003; SANTOS, 2009).

Os modelos conceituais, levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Enquanto os modelos empíricos, as funções empregadas foram desenvolvidas para ajustar os valores medidos e observações em campo e laboratório, sem retratar o processo físico em si (PAZ, 2004; SANTOS, 2009). Rennó e Soares (2003) ainda subdivide os modelos baseados em processos em dois grupos. Os conceituais, que são modelos que fazem uso de equações empíricas, mas que descrevem o sistema segundo as leis da física (semi-empíricos). E os modelos físicos, que utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico na representação dos processos e seus parâmetros, podem ser estimados através de medidas reais.

Um modelo é dito quando não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia. Já modelo distribuído e caracterizado por ter variáveis e parâmetros que dependem do espaço e tempo. Onde os concentrados consideram a bacia como um elemento único e os distribuídos subdividem-na em áreas menores, fazendo a referida transformação em cada uma dessas subáreas (PAZ, 2004; SANTOS, 2009).

Os modelos que usam variáveis em função da dependência temporal são classificados como estáticos ou dinâmicos. Os modelos são estáticos quando, com um conjunto de dados de entrada produz-se um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo. Já modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração (RENNÓ e SOARES, 2003; MARINHO *et al.*, 2013).

3.3.1 Modelos precipitação-vazão

Os modelos precipitação-vazão representam a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão. Eles devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evapotranspiração, depressão do solo, a infiltração no solo, percolação e a água subterrânea, escoamento superficial e no rio (TUCCI, 2005).

Como a dificuldade de se ter séries longas de vazões devido a maior dificuldade de se obter um registro de vazão, além disso, com a modificação das bacias pelas obras hidráulicas e alterações no uso do solo, as séries de vazões deixam de ser homogêneas e estacionárias. Já séries de precipitação são mais fáceis de registrar, assim normalmente se tem séries mais longas de precipitação que as de vazão. Com a necessidade de se obter séries mais longas e representativas de vazões, para diferentes projetos de recursos hídricos, surgem os modelos precipitação-vazão, que objetivam modelar a transformação da chuva em vazão. Assim, partindo da precipitação é possível completar vazões desconhecidas ou estimá-las para novos cenários nas bacias (TUCCI, 2005).

Os principais usos de um modelo de precipitação-vazão basicamente se resumem a entender melhor o comportamento de fenômenos hidrológicos na bacia, analisar a consistência e preencher falhas nas series de vazões, fazer previsão de vazões, dimensionar e prever cenários de um projeto, e analisar os efeitos resultantes da modificação do solo (TUCCI, 2005). Os modelos chuva-vazão são utilizados principalmente a onde os dados não a dados de vazões, ou poucos dados de vazões, pela maior dificuldade de coleta-los.

Um dos primeiros modelos específicos para transformação de precipitação em vazão foi o SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*) desenvolvido no *US Army Corps of Engineers*, tendo também, um módulo para propagação do escoamento em rios e reservatórios e outro para a regularização de reservatórios o modelo define, de forma sintética

a precipitação, estabelece as perdas iniciais e modela os escoamentos resultantes: superficial, subsuperficial e subterrâneo. Outro dos pioneiros foi o modelo Stanford IV é considerado um modelo completo em virtude do grande número de algoritmos e processos representados (OLIVEIRA, 2014).

SHE (*System Hydrologic European*) e o TOPMODEL também se destacam na categoria de modelos físicos distribuídos. O SHE foi desenvolvido em conjunto por três instituições da Europa (OLIVEIRA, 2014). Varella (2000), cita que o TOPMODEL foi inicialmente desenvolvido pelo Prof. Mike Kirkby na Faculdade de Geografia da Universidade de Leeds, Inglaterra. O modelo TOPMODEL, em sua versão completa permite elaborar cálculos considerando uma bacia ou múltiplas sub-bacias, sendo que as entradas de precipitação (valor médio) e evapotranspiração (potencial) são contabilizadas no modelo, considerando a bacia como um todo (VARELLA, 2000; LOU, 2010).

No Brasil o modelo IPH II se destaca amplamente aplicado em estudos hidrológicos. O IPH II foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (OLIVEIRA, 2014; MOREIRA, 2005).

3.3.2 Modelo IPH II

O modelo IPH II determinístico – conceitual, para simulação de chuva-vazão, que se baseia num algoritmo de separação de escoamento, tendo sido desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O modelo é utilizado para simulação de parte do processo do ciclo hidrológico, com o objetivo de aplicação em projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas (TUCCI, 2005; LOU, 2010; MOREIRA, 2005; SILVA, 2011). O algoritmo de separação do escoamento foi desenvolvido por Berthelot (1970), que utilizou a equação da continuidade em combinação com a equação de Horton e uma função empírica para a percolação. Berthelot *et al.* (1972), Sanchez (1972) e Muñoz e Tucci (1974) utilizaram este algoritmo para compor uma modelo chuva-vazão. Posteriormente, Tucci *et al.* (1981) utilizaram o referido algoritmo em conjunto com outros (perdas, escoamento superficial e subterrâneo) e implementaram o modelo IPH II. Finalmente, Tucci e Campana (1993) ampliaram o uso do modelo IPH II através de modificações na estrutura do algoritmo

de escoamento superficial. O modelo IPH II tem sido aplicado, desde então, em diversas bacias brasileiras apresentando bons resultados (BRAVO, 2007).

Mais recentemente foi desenvolvido o programa WIN_IPH2 que acopla as versões do modelo IPH II para simulação de séries contínuas e eventos isolados a dois algoritmos de otimização. Essa nova versão apresenta uma interface mais fácil de se trabalhar, integralmente programada como uma aplicação QuickWin de Visual Fortran; assim, o novo modelo tem características do ambiente Windows e uma saída gráfica de resultados (BRAVO, 2007).

O programa WIN_IPH2 foi pensado para facilitar a calibração do modelo IPH II aplicado a séries contínuas ou eventos isolados. Opções de calibração manual e automática encontram-se disponíveis no programa (BRAVO, 2007).

O modelo IPH II é composto dos seguintes algoritmos (BRAVO, 2007):

- Perdas por evaporação e interceptação;
- Separação do escoamento;
- Propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo.

O algoritmo de perdas utiliza um único parâmetro (R_{max}), que reflete a capacidade de armazenamento máximo em um reservatório de perdas. O algoritmo de separação do escoamento utiliza os parâmetros I_0 , I_b e h , característicos da equação de infiltração de Horton. Os parâmetros I_0 e I_b , representam as capacidades inicial e mínima de infiltração do solo, respectivamente, e h é igual a e^{-k} , sendo e a base dos logaritmos neperianos e k um parâmetro empírico, relacionado ao tipo de solo.

A propagação do escoamento superficial no modelo é feita através do método de Clark, que utiliza os parâmetros tempo de concentração (t_c) e o histograma tempo-área. Adicionalmente, para se levar em consideração o efeito do armazenamento na bacia, o modelo utiliza a teoria do reservatório linear simples, caracterizada pelo parâmetro K_s , que representa o tempo de retardo do escoamento superficial. É necessário definir o percentual de área impermeável (A_{inp}) na bacia hidrográfica, para a propagação do escoamento superficial.

A propagação do escoamento subterrâneo é realizada através do modelo reservatório linear simples, caracterizado pelo parâmetro K_{sub} , que representa o tempo médio de esvaziamento do reservatório de escoamento subterrâneo. O modelo IPH II foi originalmente desenvolvido para simulação de eventos, entretanto, para simulação de séries contínuas de

longo período, os autores introduziram um parâmetro adicional denominado α . Esse parâmetro participa do processo de separação do escoamento nos casos em que a precipitação é menor que a capacidade de infiltração.

Além dos parâmetros acima citados, para a simulação devem ser informadas a área da bacia hidrográfica e as variáveis de entrada: precipitação e evaporação diária.

3.3.3 Modelo para transformar temperatura em evapotranspiração

Existem diversos métodos para a estimativa da evapotranspiração, entre eles se podem mencionar os métodos de Penman (Penman, 1948) e de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Entretanto, esses dois métodos necessitam de muitas informações iniciais, as quais muitas vezes não são disponíveis. Dentre os procedimentos frequentemente utilizados para estimar a evapotranspiração, de modo mais simplificado, está o método de Thornthwaite (1948) (SYPERRECK, 2008).

O método de Thornthwaite (1948) considera as temperaturas médias mensais para estimar a evapotranspiração potencial baseando-se em índices de calor a partir das temperaturas médias mensais. Um modelo simplificado deste método baseia-se apenas na temperatura média do ar, e este será utilizado neste trabalho.

3.3.4 Séries sintéticas hidrológicas

Basicamente a utilização de modelos matemáticos em recursos hídricos leva em conta três condições fundamentais, são elas: dados hidrológicos disponíveis, objetivos do estudo e metodologia (GONTIJO, 2007).

A geração de séries sintéticas a partir de séries históricas é necessária para corrigir a falta de dados numa distribuição espacial e temporal. As séries sintéticas são o resultado da associação de séries de dados reais com números aleatórios gerados por algoritmos computacionais, para gerar dados semelhantes dos reais. Ou seja, com as séries reais geram-se dados estatísticos, os quais são utilizados para gerar novas séries, com valores pontualmente diferentes, porém com características médias e de dispersão semelhantes (GONTIJO, 2007; OLIVEIRA, 2014).

Os geradores climáticos são modelos de simulação matemática que descrevem a ocorrência de elementos climáticos e têm por objetivo a geração de um conjunto de dados com as mesmas características estatísticas da série histórica. São largamente utilizados em trabalhos de pesquisa e extensão no mundo inteiro. Essas ferramentas têm demonstrado ser de grande utilidade em muitas áreas, pois permitem, a um baixo custo, a obtenção de informações a respeito do clima local, permitindo, através de simulações, avaliar a sua influência tanto nos processos naturais como nos decorrentes da intervenção humana. Os dados climáticos simulados por estes geradores, dentre outras aplicações, são utilizados como dados de entrada em muitos modelos hidrológicos. De uma forma geral, as principais variáveis estudadas são a precipitação, a radiação solar, a temperatura e o vento (GONTIJO, 2007).

Um número aleatório consiste em ser sorteado entre uma população, de modo que todos os números tenham a mesma chance de ser sorteados, conforme a distribuição de probabilidades especificadas (HAAN, 1994). Os números aleatórios podem ser gerados a partir distribuições de probabilidade, através de funções acumuladas que modelam a variável aleatória hidrológica contínua. Assim a probabilidade de não excedência torna-se uma variável uniformemente distribuída entre 0 e 1, é possível gerar um conjunto de valores sintéticos da variável aleatória modelada (GONTIJO, 2007; OLIVEIRA, 2014). Conforme a equação a seguir.

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(x) dx \quad (1)$$

A função inversa de $F_X(x)$ gera um número aleatório X , distribuído conforme $f_X(x)$. Quando a distribuição de probabilidade não possuir uma forma inversa, sem uma solução analítica explícita para x , devem ser aplicados métodos numéricos, para a solução. As relações estabelecidas por probabilidades também podem ser usadas nos processos de simulação de dados, onde o método de *Monte Carlo* é amplamente usado na hidrologia, que é um método estatístico utilizado em simulações estocásticas, como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas (GONTIJO, 2007).

Para se ter estimativas de projetos é preciso o uso de modelos estocásticos, onde variáveis climáticas e hidrológicas consideradas aleatórias podem ser modeladas (OLIVEIRA, 2014). Assim é possível fazer simulações diferentes, o que possibilita uma análise mais profunda de comportamentos climáticos e hidrológicos.

Os primeiros modelos foram desenvolvidos na década de 1960 com basicamente duas motivações. Uma para suprir a necessidade de gerar longas séries para simular processos climáticos ou hidrológicos extremos, para avaliação dos riscos, com pequena probabilidade de ocorrência. Outra para, a partir de parâmetros estatísticos obtidos em séries observadas em pontos pluviométricos ou nas estações meteorológicas próximas do ponto de estudo, gerar séries locais sem dados observados. Nos tempos atuais se tem um novo interesse para utilização destes modelos, que é a necessidade de aprimorar os estudos dos impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de água e na sociedade (OLIVEIRA, 2014).

Um gerador climático é o modelo CLIGEN – CLImate GENeration foi desenvolvido por NICKS et al. (1995), que usa estatísticas de dados climáticos históricos observados para estação com o objetivo de gerar uma série temporal de dados. Este modelo possibilita a geração de dados diários de precipitação, temperatura do ar, radiação solar, temperatura de ponto de orvalho, além da direção e velocidade de vento. Com relação à precipitação, além da precipitação total diária, o CLIGEN gera também informações sobre a duração efetiva, além dos valores padronizados da intensidade máxima instantânea e do seu tempo de ocorrência (GONTIJO, 2007).

Segundo Oliveira (2014) outro gerador de séries climáticas sintéticas é o LARS-WG desenvolvido por Semenov et al. (1998), mais apropriado para locais com longos períodos de seca. O LARS-WG utiliza a distribuição de probabilidade geométrica como aproximação para o tamanho das séries de dias chuvosos.

Quanto à geração de séries de temperatura sintética diária, normalmente os programas geram séries separadas de temperaturas máximas e mínimas. Já o LARS -WG adota o mesmo procedimento para ambas as séries de temperaturas (mínimas e máximas), pois considera que a distribuição diária de temperaturas apresenta uma distribuição normal. A média e o desvio padrão da distribuição variam diariamente. Os parâmetros são obtidos pelo ajuste de uma série de Fourier para as médias e desvios padrão dos dados observados ao longo do ano, agrupados a cada mês. A temperatura está condicionada ao estado de precipitação (dia seco ou chuvoso), sendo ajustadas séries de Fourier independentes, para cada estado de precipitação (OLIVEIRA, 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho é a Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, que integra a Região Hidrográfica do Guaíba, sendo identificada pelo código G010 na divisão hidrográfica do Estado do Rio Grande do Sul adotada pelo Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). Das três grandes regiões a do Guaíba é a segunda maior em extensão com 84.763 Km² (cerca de 30% da área do estado) e a mais populosa com 7,1 milhões de habitantes (IBGE 2012). É composta por 9 bacias as quais são (FIGURA 3): Gravataí (G10), Sinos (G20), Caí (G30), Taquari - Antas (G40), Alto Jacuí (G50), Vacacaí - Vacacaí-Mirim (G70), Baixo Jacuí (G70), Lago Guaíba (G80) e Pardo (G90).

Figura 3 – Divisão Hidrográfica Atual do Rio Grande do Sul



Fonte: PERH (2007, Retirada do relatório)

Localizada na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, estende-se entre Porto Alegre e o delta do rio Jacuí a oeste, e a leste da zona de lagunas da costa do Atlântico, entre as longitudes $50^{\circ}27'$ e $51^{\circ}12'$ oeste. Faz limite com a bacia hidrográfica do rio dos Sinos ao norte, e com os banhados e arroios que escoam para a Lagoa dos Patos ao sul, entre as latitudes de $29^{\circ}45'$ e $30^{\circ}12'$ sul, como pode-se ver na Figura 4 (RUBBO, 2004).

Figura 4 – Localização da Bacia Hidrográfica do Gravataí com os limites dos municípios.



Fonte: Extraído do trabalho ANÁLISE DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DO AQUIFERO CENOZÓICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ – RS, (RUBBO, 2004).

A área ocupada pela bacia é de aproximadamente 2020 Km², o que representa 0,71% do território estadual (PRH da Bacia do Gravataí, 2012). Nove municípios fazem parte da bacia, sendo eles: Porto Alegre, Canoas, Alvorada, Viamão, Cachoeirinha, Gravataí, Glorinha, Taquara e Santo Antônio da Patrulha.

A bacia possui altitudes que variam de 20 m na calha do rio Gravataí, que percorre a bacia no sentido Leste-Oeste, até cotas de 350 m, ao norte da bacia, associadas aos derrames basálticos e que constituem os divisores entre a Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí e Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos (PRH da Bacia do Gravataí, 2012).

Entre as maiores elevações ao norte e menores ao sul, no município de Santo Antônio da Patrulha, existe uma grande área plana e alagadiça, onde se localiza o Banhado Grande (também conhecido como Chico Lomã, que é o nome do principal formador do banhado, o Arroio Chico Lomã) (RUBBO *et al*, 2002), situado na depressão central da bacia, é um regulador natural do fluxo do rio Gravataí, pois este reservatório natural funciona como “esponja” que amortece os picos das cheias provocadas pelas enxurradas de precipitação, acumula a água durante as épocas de enchentes e a libera durante os períodos de estiagem. Originalmente, a área de banhados era de 450 Km². Em consequência das drenagens artificiais

promovidas, pelos arrozeiros, no ano de 1971, suas áreas encontravam-se reduzidas a 138 Km², e estimava-se que a área dos banhados ocupava cerca de 60 Km², em 1989 (UFRGS, 2002).

Três compartimentos hidráulicos distintos formam o sistema de drenagem da bacia do Gravataí, os quais são: nascentes, Banhado Grande e curso inferior (rio Gravataí propriamente dito). O rio Gravataí é formado no Banhado Grande, percorrendo a bacia no sentido leste para oeste, desaguando no Delta do Jacuí (um conjunto de canais, ilhas e banhados), a partir do qual, forma o lago Guaíba, sendo sua distância de 61,4 Km, aproximadamente. É um rio de planície, de baixa velocidade, sinuoso e com muitos meandros, que originalmente percorria 39 Km desde o Passo dos Negros até o Delta do Jacuí. Atualmente, este trecho possui 34,5 Km, conforme o perfil longitudinal (SALOMONI, 2004; PRH da Bacia do Gravataí, 2012).

Os principais afluentes do rio Gravataí são os arroios, na margem direita: Brigadeiro, Barnabé, Demétrio, Pinto, Passo Grande, Miraguaia, Venturosa, Veadinho, Chico Lomã; na margem esquerda os arroios Areias, Sarandi, Feijó, Águas Belas, Passo dos Negros e Alexandrina.

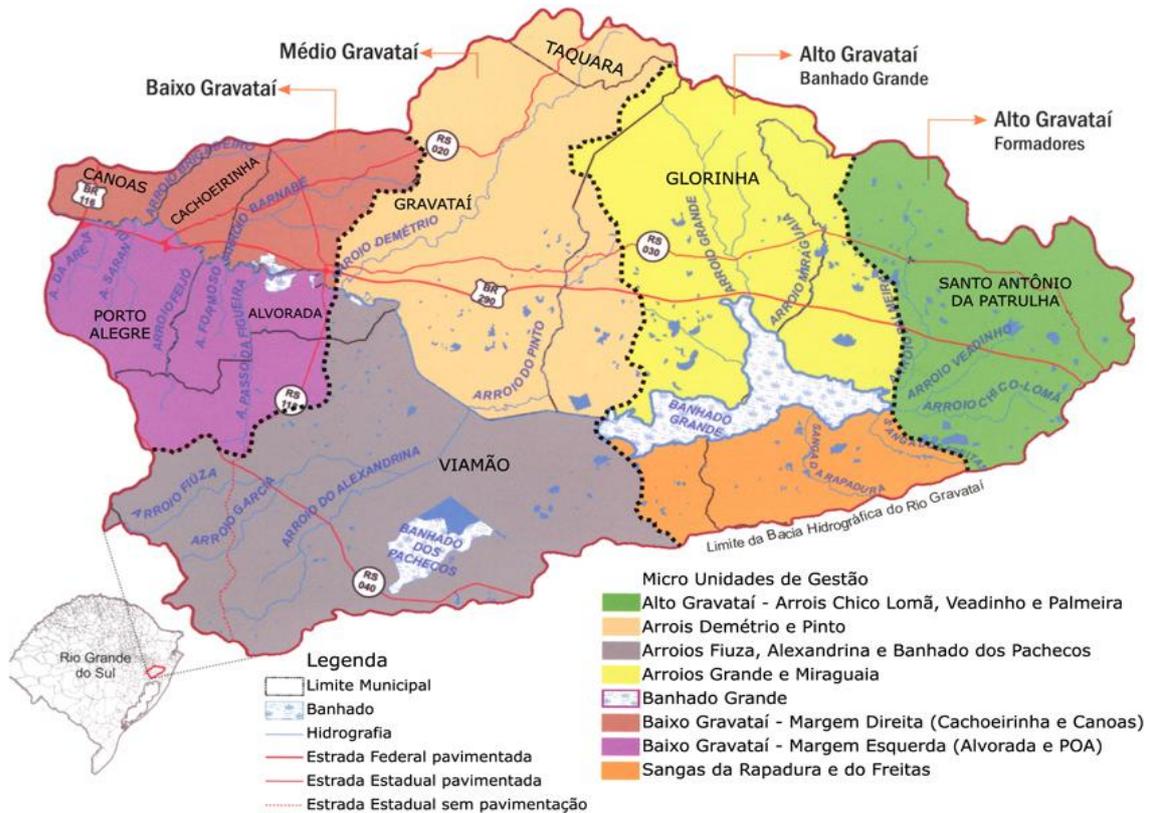
O rio Gravataí possui uma malha de canais artificiais no trecho de curso inferior, em virtude do desenvolvimento da irrigação na região. Esses canais estão principalmente na bacia do Arroio Alexandrina, que fica na margem esquerda e na região do Arroio do Pinto, na margem direita. Além disso, na década de 60, foi construído um canal que percorre 20 Km na calha do rio, que vai do Banhado Grande até próximo da Olaria Velha. Atualmente, a Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí sofre com estiagem no verão por uso da água para irrigação e abastecimento público, atingindo também os municípios no seu entorno (PRH da Bacia do Gravataí, 2012).

A bacia hidrográfica do rio Gravataí apresenta duas regiões com características de ocupação distintas, a primeira no curso superior do rio (região do Banhado Grande), tem intensa atividade agropecuária, sendo a demanda de água é principalmente para as lavouras de arroz, a outra no trecho inferior do rio, com uso urbano e industrial onde, em virtude da alta densidade populacional, a principal demanda de água é para o abastecimento doméstico e industrial, com uma menor demanda para a agricultura (RUBBO, 2004).

Para melhor estudar a bacia, o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí – Comitê Gravatahy a dividiu em sub-bacias, unidades menores. As sub-bacias foram denominadas de Unidades de Gestão, tendo em vista o Plano de Recursos hídricos da Bacia do Rio Gravataí.

Foram levados em consideração vários aspectos e critérios para a divisão, considerando os aspectos físicos e ambientais das áreas hidrográficas, respeitando as funções ecológicas de cada trecho de rio, e também a subdivisão a qual a população e o Comitê se referenciam. Na Figura 5 é possível ver como ficou esta divisão, assim como na Tabela 1.

Figura 5 – Divisão das macrorregiões da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí.



Fonte: Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí – Comitê Gravatahy 2013.

Tabela 1 – Divisão das macrorregiões da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí apresentada na Figura 5.

MACRO UNIDADES	MACRO UNIDADES DE GESTÃO	ÁREA (Km)	MUNICÍPIOS	SEDES
Baixo Gravataí	Baixo Gravataí: Margem Esquerda (Alvorada e POA)	213,34 (10%)	Porto Alegre, Alvorada e Viamão	Porto Alegre, Alvorada e Viamão
	Baixo Gravataí: Margem Direita (Cachoeirinha e Canoas)	153,55 (8%)	Canoas, Cachoeirinha e Gravataí	Canoas e Cachoeirinha
Médio Gravataí	Arroios Demétrio e Pinto	402,43 (20%)	Gravataí, Taquara e Glorinha	Gravataí
	Arroio Fiúza, Alexandrina, e Banhado dos Pachecos	469,93 (23%)	Viamão e Alvorada	Viamão
Alto Gravataí: Banhado Grande	Arroios Grande e Miraguaia	333,28 (17%)	Santo Antônio da Patrulha, Glorinha e Gravataí	Glorinha
	Sangas da Rapadura e do Freitas	126,78 (6%)	Glorinha, Viamão e Santo Antônio da Patrulha	-
	Banhado Grande	59,81 (3%)	Glorinha, Viamão e Santo Antônio da Patrulha	-
Alto Gravataí: Formadores	Alto Gravataí, Arroios Chico Lomã, Veadozinho e Palmeira	258,93 (13%)	Santo Antônio da Patrulha	Santo Antônio da Patrulha

Fonte: Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí – Comitê Gravatahy, 2013.

Os nove municípios que incorporam a bacia total ou parcialmente, estão relacionados na Tabela 2, com suas respectivas áreas, totais e correspondentes à bacia, também com a porcentagem da área urbana inserida na bacia. Apenas os municípios de Alvorada e Glorinha estão inseridos totalmente na bacia hidrográfica. Analisando somente as áreas urbanas, outros três municípios apresentam-se compreendidos pela bacia na totalidade da mancha urbana: Cachoeirinha, Gravataí e Santo Antônio da Patrulha. O município de Taquara é o único que não possui área urbana no interior da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí (PRH da Bacia do Gravataí, 2012).

Tabela 2 – Municípios que compõe a Bacia Hidrográfica do Gravataí, total ou parcialmente.

Município	Área do município (Km)		Área municipal inserida na bacia (%)	Proporção da área urbana na bacia	Área no total da bacia (%)
	Total	Na bacia			
Alvorada	71,33	71,33	100	100%	3,5
Cachoeirinha	44,02	36,98	84	100%	1,8
Canoas	131,10	32,77	25	21%	1,6
Glorinha	323,64	323,64	100	100%	16,0
Gravataí	463,50	396,76	86	100%	19,6
Porto Alegre	496,68	97,35	20	27%	4,8
Santo A. da Patrulha	1049,81	457,19	44	100%	22,6
Taquara	457,86	36,63	8	0%	1,8
Viamão	1497,10	567,40	38	86%	28,1
Total	4535,0	2020,0			100

Fonte: Áreas – IBGE, 2014; percentuais de participação na bacia – PRH da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, 2012.

Levando em conta as áreas dos municípios correspondentes as bacias, e as proporções urbanas e rurais estima-se que a população residente na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí seja de 1.255.730 habitantes (IBGE, 2014), aproximadamente 19,14% da população do estado (PERH/RS, 2007). A Tabela 3 apresenta a população de cada município e de acordo com as relações com a tabela anterior, as populações correspondentes à bacia de cada município, dividida também em população urbana e rural.

Tabela 3 – Municípios que compõe a Bacia Hidrográfica do Gravataí, total ou parcialmente.

Município	População Total	População Urbana	População Rural	População Total (Bacia)	População Urbana (Bacia)	População Rural (Bacia)
Alvorada	195.718	195.718	0	195.718	195.718	0
Cachoeirinha	118.294	118.294	0	118.294	118.294	0
Canoas	324.025	324.025	0	68.045	68.045	0
Glorinha	6.885	2.068	4.817	6.885	2.068	4.817
Gravataí	255.762	238.590	17.172	253.357	238.590	14.767
Porto Alegre	1.409.939	1.409.939	0	380.684	380.684	0
Santo A. da Patrulha	39.679	28.105	11.574	33.206	28.105	5.101
Taquara	54.656	45.276	9.380	733	0	733
Viamão	239.234	224.962	14.272	198.808	193.467	5.340
Bacia				1.255.730	1.224.971	30.758

Fonte: População – IBGE, 2010; percentuais de participação na bacia – PRH da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, 2012.

Se tratando de economia, de modo geral, os municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí possuem uma economia forte e diversificada, baseada principalmente nos setores secundário (indústrias) e terciário (comércio e serviços). Porto Alegre, Canoas e Gravataí se destacam entre as cinco maiores economias do RS (PRH da Bacia do Gravataí, 2012).

Analisando o Plano de Recursos Hídricos da Bacia hidrográfica do rio Gravataí, foi apresentado na Tabela 4, com as demandas hídricas de cada município de acordo com a população, assim como a companhia que abastece cada cidade. Além da tabela foi analisado que quase todos os sistemas de abastecimento precisam de ampliação ou um novo manancial para abastecer as demandas.

Tabela 4 – Demandas hídricas da Bacia Hidrográfica do Gravataí, referente a população de 2014.

Município	Área (Km ²)	População (hab)	Densidade demográfica (hab/Km ²)	Demanda hídrica (L/hab.dia)	Quem abastece
Alvorada	71,331	195.673	2743,17	268	DMAE
Cachoeirinha	44,018	118.278	2687,04	268	CORSAN
Canoas	131,096	323.827	2470,15	276	CORSAN
Glorinha	323,641	6.891	21,29	230	CORSAN
Gravataí	463,499	255.660	551,59	276	CORSAN
Porto Alegre	496,682	1.409.351	2837,53	276	CORSAN
Santo A. da Patrulha	1049,807	39.685	37,80	241	CORSAN
Taquara	457,855	54.643	119,35	241	CORSAN
Viamão	1497,097	239.384	159,90	276	CORSAN

Fonte: População – IBGE, 2014; Demanda – PRH Bacia hidrográfica do Rio Gravataí, 2012.

Conforme o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Gravataí (2012), os usos predominantes das águas do Rio Gravataí são para irrigação de lavouras de arroz (entorno do Banhado Grande e canal do DNOS) e o abastecimento público no curso inferior, além de servir como corpo receptor de grande carga de despejos domésticos e industriais.

Do ponto de vista didático, os usos da água podem ser divididos em três classes:

- Infraestrutura social: refere-se aos usos gerais disponíveis para a sociedade nos quais a água entra como bem de consumo final;
- Agricultura, florestamento e aquicultura: usos da água como bem de consumo intermediário visando à criação de condições ambientais adequadas para o desenvolvimento de espécies animais ou vegetais de interesse para a sociedade. Este interesse pode ser de ordem econômica, ambiental, etc.;
- Indústria: usos em atividades de processamento industrial e energético nos quais a água entra como bem de consumo intermediário.

O clima é subtropical, caracterizando-se por chuvas em todos os meses e por temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e, do mês mais frio entre 3° e 18°C. A bacia pode ser considerada como unidade climática homogênea, por ter fatores climáticos

registrados por longos períodos em pontos extremos da bacia, que apresentam somente pequenas diferenças entre si. A topografia, relativamente suave, também não favorece a formação de anormalidades microclimáticas de magnitude considerável (RUBBO, 2004).

De acordo com Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2002) as precipitações médias mensais na bacia hidrográfica do rio Gravataí são, em termos relativos, são bem distribuídas ao longo do ano. Segundo Rubbo (2004) as menores quantidades mensais de precipitação ocorrem nos meses de março/abril/maio e setembro/outubro/novembro. As maiores precipitações estão concentradas nos meses de junho/julho/agosto e dezembro/janeiro/fevereiro.

4.2 Calibração do modelo hidrológico

Para atingir os objetivos deste trabalho foi necessário, primeiramente calibrar um modelo hidrológico capaz de transformar a precipitação em vazão. Para calibração do modelo foram necessárias cinco etapas:

- Extração de dados hidrológicos de precipitação, temperatura e vazão;
- Cálculo da precipitação média;
- Uso do método de Thornthwaite para transformar temperatura em evapotranspiração;
- Calibração do modelo IPH-II;
- Simulação (validação) do modelo IPH-II

Na primeira etapa da modelagem hidrológica, foram extraídos dados de precipitação diária de bancos de dados hidrológicos disponíveis para o Brasil. Estes dados foram extraídos do HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA) em 16 estações pluviométricas localizadas no interior ou nas adjacências da Bacia Hidrográfica do Gravataí, no período entre 1961 a 2012, conforme a Tabela 5.

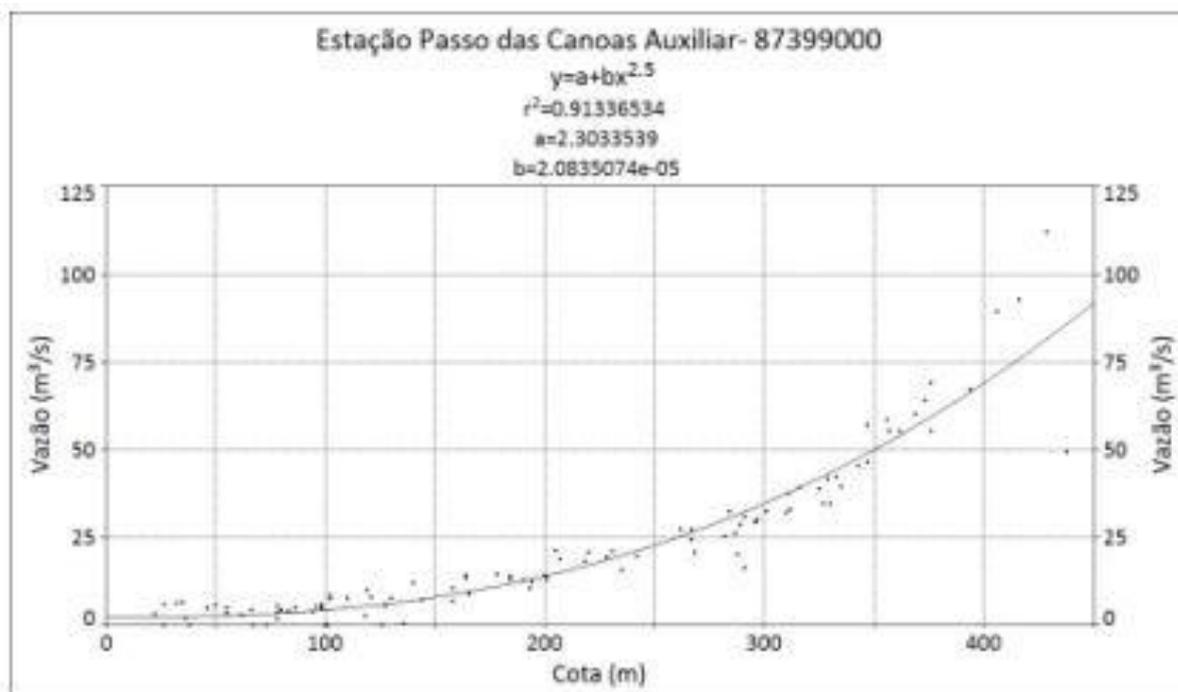
Tabela 5 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo, provenientes do HIDROWEB.

Estações pluviométricas						
Código	Nome	Município	Latitude	Longitude	Período dos dados	
					Início	Fim
03050006	Viamão	Viamão	(-30°05'00")	(-50°47'00")	1939	1954
02950031	Santo Antônio	Santo Antônio da Patrulha	(-29°49'04")	(-50°31'17")	1944	2012
02950037	Taquara	Taquara	(-29°40'00")	(-50°47'00")	1950	1978
02950059	Agropecuária Anju	Glorinha	(-29°49'04")	(-50°44'33")	1955	1980
02950013	Entrepelado	Santo Antônio da Patrulha	(-29°43'00")	(-50°44'00")	1955	1980
02950036	Taquara	Taquara	(-29°45'00")	(-50°45'00")	1961	1965
02950016	Glorinha	Gravataí	(-29°52'58")	(-50°47'20")	1976	2015
02950017	Lagoa dos Barros	Santo Antônio da Patrulha	(-29°54'00")	(-50°26'00")	1976	2015
03051045	Arroio do Salso	Porto Alegre	(-30°10'09")	(-51°04'26")	1981	2015
03051035	Farol de Itapuã	Viamão	(-30°23'00")	(-51°03'00")	1987	1991
02950062	Fazenda Nossa Sra. da Conceição	Santo Antônio da Patrulha	(-29°57'39")	(-50°35'58")	1991	2015
03050008	Lombas	Viamão	(-30°02'48")	(-50°42'07")	1991	2015
02950061	Monrugava	Gravataí	(-29°51'03")	(-50°54'37")	1991	2009
02950060	Santo Antônio da Patrulha	Santo Antônio da Patrulha	(-29°49'54")	(-50°32'55")	1991	2015
02950068	Taquara - Montante	Taquara	(-29°43'15")	(-50°44'06")	2009	2015
03051043	Porto Alegre - CPRM	Porto Alegre	(-30°04'20")	(-51°13'41")	2011	2012

Fonte: Autor.

Em seguida, foram obtidos também os dados de vazão observada no período com dados de precipitação. As estações Banhado Grande, Gravataí-CORSAN, Albatroz, Gravataí GI e Gravataí 31 não apresentaram nenhum registro de dados monitorados, conforme o próprio PRH da Bacia do Gravataí (2012). A única estação fluviométrica com dados disponíveis no banco de dados do site HIDROWEB da ANA foi a de Passo das Canoas – Auxiliar (87399000), com registros diários de vazão dos anos de 2002, 2006 e 2007. Além disso, por meio do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Gravataí (2012), foi obtida uma curva-chave que permitiu estender a série para um período maior, com base na série de níveis fluviais da régua linimétrica instalada no mesmo local. Dessa maneira, as vazões foram geradas considerando as curvas-chaves consolidadas e apresentadas no PRH da Bacia do Gravataí. Para tal foi utilizado a curva chave referente à mesma estação, conforme mostra a Figura 6 e a Equação 2.

Figura 6 – Equação de ajuste dos dados da estação Passo das Canoas Auxiliar.



Fonte: Imagem retirada do PRH da Bacia do Gravataí (2012), pg. 130.

$$Q = 2,3033539 + 0,000020835074 * H^{2,5} \quad (2)$$

Sendo: Q a vazão em m^3/s ; H é o nível fluvial na régua linimétrica.

Em seguida, para calibração do modelo, também há a necessidade de se ter dados de evapotranspiração. Para tanto, foram obtidos dados de temperatura para estimativa da evapotranspiração pelo método de Thornthwaite. Estes, por sua vez foram extraídos do *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em que se obtém a temperatura média de cada mês. Como não há nenhuma estação do INMET no interior da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí foram utilizadas as três estações mais próximas encontradas: Porto Alegre (OMM: 83967), Bento Gonçalves (OMM: 83941) e Torres (OMM:83948). Os dados foram obtidos para o período entre 1961 e 2015.

Após isso, na segunda etapa, foi estimado o valor médio de precipitação diária na bacia desde o ano de 1961, por interpolação espacial, pelo método do inverso da distância ao quadrado. O cálculo foi realizado utilizando os dados de todas as estações (quando disponíveis), para cada dia da série. A interpolação foi realizada em uma grade regular, que envolve toda a

bacia do rio Gravataí, com 12 nós, espaçados regularmente a cada 0,2 graus de latitude e 0,25 graus de longitude, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Nós utilizados para a interpolação das chuvas diárias.

Coordenadas dos nós da grade regular de interpolação		
	Latitude (°)	Longitude (°)
Nó 1	29,75	51,20
Nó 2	29,75	50,95
Nó 3	29,75	50,70
Nó 4	29,75	50,45
Nó 5	29,95	51,20
Nó 6	29,95	50,95
Nó 7	29,95	50,70
Nó 8	29,95	50,45
Nó 9	30,15	51,20
Nó 10	30,15	50,95
Nó 11	30,15	50,70
Nó 12	30,15	50,45

Fonte: Autor

Foi calculada a distância entre cada nó da grade e cada estação pluviométrica, por meio da aplicação do teorema de Pitágoras, neste caso adaptado conforme a Equação 3.

$$d_{ij} = \sqrt{(\varphi_i - \varphi_j)^2 + (\lambda_i - \lambda_j)^2} \quad (3)$$

Sendo: d_{ij} a distância entre o nó i e a estação pluviométrica j ; φ é a latitude; λ é a longitude.

Após ter-se obtido estas distâncias, em cada dia da série histórica, para cada nó, foi calculado o inverso da distância ao quadrado dos postos pluviométricos, conforme a Equação 4:

$$Idw_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^2} \quad (4)$$

Sendo: Idw_{ij} é o inverso da distância ao quadrado, entre o nó i e o posto pluviométrico j .

Em cada dia da série histórica, para calcular o peso que cada estação pluviométrica possui, para a estimativa da precipitação em cada nó da grade de interpolação, foi usado a Equação 5:

$$W_{ij} = \frac{Idw_{ij}}{\sum Idw_i} \quad (5)$$

Sendo: W_{ij} é o peso da estação j para estimar a precipitação no nó i ; $\sum Idw_i$ é o somatório de todos os valores de Idw obtidos para o nó i , considerando apenas as estações pluviométricas com dados no referido dia.

Por fim, a chuva diária em cada nó da grade regular, em cada dia da série histórica, foi calculada por meio do somatório do produto entre a precipitação de cada posto pluviométrico e o peso de cada posto em relação ao nó. Repetindo o cálculo para os 12 nós, foi realizada uma simples média aritmética para a obtenção da chuva média na bacia, em cada dia da série histórica.

Na etapa seguinte, os dados de temperatura das três estações foram interpolados, usando uma média aritmética simples. Esse método simplificado foi adotado em virtude da temperatura mensal não apresentar uma elevada variabilidade espacial, principalmente em comparação com as precipitações.

Em seguida, com a necessidade de se calcular a evapotranspiração mensal, foi utilizado o método de Thornthwaite (1948) que é utilizado frequentemente em áreas com poucos dados meteorológicos ou climáticos disponíveis (SYPERRECK, 2008). Esse método considera as temperaturas médias mensais para estimar a evapotranspiração potencial baseando-se em índices de calor a partir das temperaturas médias mensais. Um modelo simplificado deste método baseia-se apenas na temperatura média do ar, e este foi utilizado neste trabalho. Utilizando a Equação 6 e 7, pode ser realizada a estimativa da evapotranspiração potencial.

$$ETp = C_j \cdot E_j \quad (6)$$

$$E_j = 16. \left(10. \frac{T}{I} \right)^a \quad (7)$$

Sendo: ETp é a evapotranspiração potencial acumulada (mm/mês); T é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); C_j é um fator de correção em função da latitude e mês do ano, que neste trabalho foi utilizado o paralelo 30°S , conforme demarcado na Tabela 7; I é o índice térmico anual, dado pelas Equações (8) e (9):

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{t_j}{5} \right)^{1,514} \quad (8)$$

$$a = 6,75. 10^{-7}. I^3 - 7,71. 10^{-5}. I^2 + 0,01791. I + 0,49239 \quad (9)$$

Sendo: t_j são as temperaturas do mês analisado ($^{\circ}\text{C}$).

Tabela 7 – Fator de correção C_j do Método de Thornthwaite, para cada Latitude e cada mês.

Fator de correção C_j do Método Thornthwaite (UNESCO, 1982)												
Latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
10°N	0,98	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5°N	1,00	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
0°	1,02	0,94	1,04	1,01	1,01	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5°S	1,04	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10°S	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15°S	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20°S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
25°S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
30°S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
35°S	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
40°S	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,20	1,29

Fonte: Adaptado de UNESCO (1982).

Após a aplicação do método Thornthwaite foi obtida a evapotranspiração média mensal. Esses valores foram convertidos para o intervalo diário, dividindo-se pelo número de dias de cada mês. Isso é necessário em virtude da simulação hidrológica ser realizada em intervalo de tempo diário no modelo IPH-II.

Em seguida, após obter séries observadas de precipitação, evapotranspiração e vazões diárias, inicia-se o processo de calibração do modelo hidrológico IPH-II no software WIN_IPH2. Este software foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). O IPH-II é um modelo determinístico-conceitual para simulação chuva-vazão de modo concentrado em bacias hidrográficas.

Constituem-se em parâmetros calibráveis do modelo IPH-II (SILVA, 2011):

- R_{max} – Capacidade máximado reservatório de interceptação (mm);
- I_0 – Capacidade de infiltração para $t=0$ (mmh^{-1});
- I_b – Capacidade de infiltração mínima (mmh^{-1});
- h – Tempo de concentração da bacia (adm);
- K_{sup} – Parâmetro de propagação do escoamento superficial (h);
- K_{sub} – Parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo (h);
- t_c – tempo de concentração da bacia (h);
- $AIMP$ – Porcentagem da área impermeável na bacia (%).

No software WIN_IPH2, o modelo hidrológico pode ser calibrado manualmente ou de modo automático. Neste trabalho foi calibrado no modo automático. Para isto, um procedimento típico para estimar os valores de parâmetros de modelos chuva-vazão considera os seguintes elementos principais:

- A função-objetivo;
- O algoritmo de otimização;
- O critério de parada.

Uma função-objetivo da calibração de modelos chuva-vazão é uma equação utilizada para calcular uma medida numérica da diferença (erro) entre os resultados do modelo (geralmente um hidrograma) e os valores observados dessa mesma variável de saída (BRAVO *et al.*, 2007). Este mesmo autor apresenta uma tabela das funções-objetivos do programa WIN_IPH2 conforme o Figura 7.

Figura 7 – Quadro Funções-objetivos do programa WIN_IPH2.

Nome	Equação
Desvio Padrão*	$FO1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - Qc_i)^2}{NT}}$
Desvio absoluto médio*	$FO2 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} Qo_i - Qc_i}{NT}$
Desvio quadrado relativo médio*	$FO3 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} \frac{(Qo_i - Qc_i)^2}{Qo_i}}{NT}$
Desvio padrão inverso das vazões*	$FO4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} \left(\frac{1}{Qo_i} - \frac{1}{Qc_i}\right)^2}{NT}}$
Coeficiente de Nash e Sutcliffe*	$FO5 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - Qc_i)^2}{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - \bar{Q})^2}$
Desvio relativo Médio*	$FO6 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} \frac{Qo_i - Qc_i}{Qo_i}}{NT}$
Desvio padrão inverso das vazões*	$FO7 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} Qc_i - \sum_{i=1}^{NT} Qo_i}{\sum_{i=1}^{NT} Qo_i} * 100$

Fonte: Adaptado do Artigo “AVALIACAO VISUAL E NUMÉRICA DA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO IPH II COM FINS EDUCACIONAIS” de Bravo *et al.* (2007).

Sendo: Qo_i é o valor de vazão observada no intervalo de tempo i , Qc_i é o valor de vazão calculada no intervalo de tempo i , NT é o número de intervalos de tempo da série analisada e \bar{Q} é a vazão média da série.

Neste trabalho, o modelo foi calibrado pelo processo automático mono-objetivo utilizando a função-objetivo referente ao coeficiente de Nash-Sutcliffe (FO5), que penaliza principalmente os erros em dias de vazão alta, fazendo com que o modelo se ajuste melhor aos períodos de cheias.

Após a escolha da função-objetivo se fez necessário utilizar um algoritmo para definir o final do processo de calibração, em que os critérios de parada podem ser a convergência da função-objetivo, a convergência dos valores dos parâmetros e/ou número máximos de iterações (BRAVO *et al.*, 2007). Neste trabalho, foi definido um número máximo de iterações igual a 200.

No programa WIN_IPH2 foi utilizado o algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*), proposto por Duan *et al.* (1992), para a calibração automática mono-objetivo do modelo IPH II. Mas também pode ser usado para a calibração automática o processo de calibração multiobjetivo, que consiste em encontrar os valores ótimos do conjunto de parâmetros considerando várias funções-objetivo. Uma característica importante do resultado de um processo de calibração multiobjetivo é que, geralmente, não existe uma única solução (único conjunto de parâmetros) (BRAVO *et al.*, 2007).

O algoritmo SCE-UA tem conceitos de busca aleatória supervisionada, evolução competitiva e mistura de complexos. Onde opera com uma população de pontos que evolui em direção ao ótimo global de uma única função, através de sucessivas iterações e avaliações da função-objetivo. Na etapa inicial é gerada, de forma aleatória, uma população de pontos espalhados entre os limites máximos e mínimos definidos para cada parâmetro. Essa população é separada em conjuntos (chamados de complexos) que evoluem baseados em um processo de “reprodução” (COLLISCHONN e TUCCI, 2003; OLIVEIRA, 2015).

Os dois parâmetros próprios do algoritmo SCE-UA que devem ser definidos pelo usuário são: o número de complexos e o número de indivíduos em cada complexo. O produto entre esses dois valores define o número de indivíduos da população. Quanto maior a população, maiores são as chances de encontrar o ótimo global da função-objetivo, porém maior é o tempo de processamento e o número de iterações necessárias para a convergência do algoritmo segundo Collischonn e Tucci (2003).

Para a calibração multiobjetivo do modelo IPH II, no programa WIN_IPH2 considerando duas funções-objetivo é utilizado o algoritmo MOCOM-UA (*Multi-Objective Complex Evolution Method – University of Arizona*; YAPO *et al.*, 1998). O algoritmo MOCOM-UA é a versão multiobjetivo do algoritmo SCE-UA (DUAN *et al.*, 1992). Trata-se

de um algoritmo evolutivo com características semelhantes a um algoritmo genético multiobjetivo.

O algoritmo MOCOM-UA foi criado por Yapo *et al.* (1998) como uma combinação da estratégia de busca do método Simplex de Nelder e Mead, com conceitos de ordenamento de Pareto, evolução competitiva e mistura de complexos.

O algoritmo opera com uma população de pontos (cada ponto definido por um conjunto de parâmetros) que evolui em direção a uma aproximação da região de Pareto, através de sucessivas iterações e avaliações das funções-objetivo. Na etapa inicial é gerada, de forma aleatória, uma população de pontos espalhados entre os limites máximos e mínimos definidos para cada parâmetro. Cada um desses pontos é avaliado com as funções-objetivo e assim estabelecido um ranking multiobjetivo com base no critério de dominância e não dominância. Soluções com ranking igual a um representam soluções não dominadas encontradas até essa iteração. O ranking aumenta conforme mais longe da região de Pareto se encontra a solução.

Essa população ordenada pelo ranking multiobjetivo é separada em conjuntos (chamados de complexos e que incluem soluções com baixo valor no ranking (boas soluções) e com altos valores no ranking (soluções ruins) que evoluem baseados em um processo de “reprodução”.

O algoritmo MOCOM-UA possui um único parâmetro que deve ser definido pelo usuário: o número de indivíduos da população. Quanto maior a população, maiores são as chances de encontrar uma boa aproximação da região de Pareto, porém maior é o tempo de processamento e o número de iterações necessárias para a convergência do algoritmo (COLLISCHONN e TUCCI, 2003).

Com os dados de precipitação, evapotranspiração e vazão já organizados, foi necessário escolher um período onde haviam dados diários para precipitação, evapotranspiração e vazão sem nenhuma falha. O período mais longo encontrado dentre os dados extraídos foi de 01/01/1988 a 31/10/1993, tendo 2131 dias de registro sem nenhuma falha.

Além das séries observadas, são necessários os seguintes dados de entrada: área de bacia, coeficiente de forma do histograma tempo/área (HTA), tempo de concentração, e as

condições iniciais que dependem da série estudada, como mostra a Figura 8, onde é apresentada uma interface de dados de entrada do modelo IPH2.

Figura 8 – Interface de dados de entrada do software WIN_IPH2.

The image shows a software interface window titled "DADOS DA SIMULAÇÃO". It is divided into several sections for data entry:

- Arquivos de entrada:** Three empty text input fields are on the left, and three buttons labeled "Precipitação", "Evaporação", and "Vazões observadas" are on the right.
- Gerais:** Two rows of parameters with input boxes: "Intervalo de tempo (min)" with the value "1440.00" and "Número de registros" with the value "50.00".
- Dados da bacia:** Four rows of parameters with input boxes: "Área da bacia (km2)" with "10.00", "Área impermeável (0 - 100) %" with "0.00", "Coeficiente de forma (n) do HTA" with "1.50", and "Tempo de concentração (em unidades de intervalo de tempo)" with "1.00".
- Condição Inicial:** Three rows of parameters with input boxes: "Percolação (m3/s)" with "10.00", "Vazão subterrânea (m3/s)" with "5.00", and "Vazão Superficial (m3/s)" with "0.00".

At the bottom of the window, there are two buttons: "CONFIRMA" and "SAI".

Fonte: Autor

O intervalo de tempo (min) foi determinado como 1440 minutos, que é a duração de um dia, estando associado à origem dos dados de entrada. O número de registros é a quantidade de dias do período analisado, sendo 2131 dias para o período de calibração de 1988 a 1993. A área da bacia foi obtida no Hidroweb, sendo igual a 1410 Km²a área de drenagem da bacia a montante do posto fluviométrico Passo das Canoas –Auxiliar, localizado no rio Gravataí. Como

área impermeável foi utilizado 8%. Este valor foi adquirido fazendo uma medição das principais áreas urbanas dos municípios integrantes da bacia. Por fim, o coeficiente de forma (n) do HTA foi definido como 1,5, que é o valor indicado para bacias com forma elipsoidal, conforme o manual de conceitos do WIN_IPH2 (BRAVO, 2007).

Na última etapa da modelagem hidrológica foi realizada a validação do modelo hidrológico calibrado. Para tal foi necessário utilizar um período diferente do anterior utilizado na calibração. Preenchendo novamente os dados de entrada do modelo, os parâmetros calibrados na etapa anterior e utilizando o período de dados do ano de 2002, de primeiro de janeiro a 31 de dezembro, contendo 365 dias, o modelo gerou uma nova série de vazão calculada, que foi comparada com a série observada.

4.3 Geração de séries sintéticas para o futuro

A geração de séries sintéticas estocásticas de precipitação e temperatura para o futuro com base nas séries históricas e nas projeções provenientes dos modelos climáticos globais, pode ser dividida em duas partes. A primeira se refere à geração dos cenários de precipitação e temperatura para um período no futuro, considerando os diversos modelos climáticos utilizados nos relatórios do IPCC. A segunda se refere à geração de séries sintéticas estocásticas, baseadas nas estatísticas obtidas junto às séries observadas no passado, levando-se em consideração as mudanças previstas nos cenários futuros.

Foi definido como período de base, referente ao passado, o intervalo entre 1976 e 2005. Como período futuro, para obtenção das mudanças climáticas, foi definido o período entre 2021 e 2050.

4.3.1 Geração dos cenários para o futuro (2021-2050)

Na primeira etapa, para a geração dos cenários do futuro, foi utilizado o software MAGICC/SCENGEN, disponível no link <http://www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/>. O MAGICC/SCENGEN é um modelo gerador de cenários que foi criado a partir dos parâmetros do AR4 do IPCC (2007) e tem sido utilizado pelo IPCC para gerar projeções futuras de

temperatura média global e nível médio do mar. Baseado em cenários de emissões de gases do efeito estufa e modelos simplificados que emulam o comportamento de modelos de circulação geral (GCMs), o MAGICC/SCENGEN calcula projeções de concentração de gases de efeito estufa, temperatura e precipitação média global e nível médio do mar.

Dentre os mais expressivos geradores de cenários destaca-se ainda o MAGICC/SCENGEN que é baseado em um modelo acoplado de ciclo de gases e clima (MAGICC) que gera dados de modificação na temperatura média global utilizada pelo SCENGEN para gerar cenários de mudanças climáticas (ADAM, 2011).

Para gerar os cenários nesse software, é necessário escolher os cenários futuros de emissões de gases. Estes cenários, conhecidos como Cenários SRES (*Special Report Emission Scenarios*), são baseados no AR4 do IPCC, e têm sido amplamente usados nas análises de possíveis mudanças climáticas, seus impactos e opções para mitigá-las, são imagens alternativas de como o futuro poderá se desdobrar e são uma ferramenta apropriada para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras e para avaliar as incertezas associadas. Auxiliam nas análises de mudanças climáticas, incluindo modelagem do clima e avaliação de impactos, adaptação e mitigação. A possibilidade de que qualquer um dos caminhos únicos de emissões ocorram tais como descritos pelos cenários é bastante remota.

Cada um dos SRES é considerado uma “História de Futuro”, constituindo-se em um possível cenário de globalização, industrialização e uso de energias mais limpas. Esses cenários foram divididos em quatro conjuntos chamados de “famílias”: A1, A2, B1, B2.

O cenário A1 descreve um mundo futuro onde a globalização é dominante. Onde o crescimento populacional é pequeno com desenvolvimento rápido de tecnologias eficientes, um crescimento econômico. Existe a convergência entre as regiões e o aumento das interações culturais e sociais, com redução significativa das desigualdades regionais na renda. A família cenário A1 se subdivide em três grupos que descrevem direções alternativas de mudança tecnológica no sistema de energia. Os três grupos A1 são diferenciados pelo uso das energias: A1F (uso intensivo de fontes fósseis), A1T (fontes de energia não fóssil) e A1B (um equilíbrio entre todas as fontes).

O argumento da família A2 descreve um mundo muito heterogêneo. Onde baseia-se na autossuficiência nacional e na preservação de identidades locais. Um crescimento contínuo da

população mundial. O desenvolvimento econômico regional e desenvolvimento tecnológico mais fragmentados e lentos do que em outros cenários.

No cenário B1, é descrito um mundo com a mesma população global, atingindo o pico na metade do século e após diminuindo, rápidas mudanças nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e de informação, e a introdução de tecnologia limpa e eficiente em termos de utilização de recursos. Neste cenário, prevê-se soluções globais para sustentabilidade econômica, social e ambiental.

O cenário B2 se caracteriza por um mundo onde a ênfase está em soluções locais para sustentabilidade econômica, social e ambiental. A população aumenta continuamente, mas de modo inferior ao cenário A2, níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica mais lenta e diversificada do que nas histórias de futuro B1 e A1. Embora o cenário também seja orientado para a proteção ambiental e equidade social, seu foco é local e regional.

Para este trabalho foram utilizados os cenários:

- A1-ASF da família A1F;
- A1B-AIM da família A1B;
- A2-AIM da família A2;
- B1-AIM da família B1;
- B2-AIM da família B2.

Para cada cenário, o programa MAGICC/SCENGEN disponibiliza 20 modelos climáticos globais com estimativa das condições de temperatura e precipitação em todo o planeta, em uma grade com resolução de 2,5°. O período base foi definido como de 1976 a 2005 e o período futuro, para verificação das mudanças, de 2021 a 2050.

A bacia do Gravataí se localiza entre as coordenadas 50°27' e 51°12' oeste e 29°45' e 30°12' sul. Sendo assim, foram escolhidos dois pixels com valores de mudanças nos regimes de temperatura e precipitação, entre as coordenadas 52,50° e 50,00° oeste e 32,50° e 27,50° sul. Foi feita a média entre os dois pixels, para cada mês do ano, em cada cenário escolhido.

4.3.2 Geração de séries sintéticas estocásticas

Na segunda parte, na geração de séries sintéticas estocásticas, foram realizadas sete etapas. Primeiramente, foram organizados os dados de precipitação e temperatura com os 30 anos do período de base (1976-2005) somando as mudanças projetadas para o futuro, nos cinco cenários utilizados. Foram criadas, para cada cenário, duas séries para o futuro, uma de precipitação e outra de temperatura.

O modelo estocástico utilizado para a precipitação diária possui dois módulos: i) o primeiro se refere à probabilidade de ocorrência de precipitação, considerando o estado anterior (se choveu nos dias antecedentes), baseado no processo de Markov; ii) o segundo se refere à lâmina de precipitação acumulada em cada dia chuvoso, modelado por uma distribuição estatística para cada mês do ano.

No modelo de probabilidade de ocorrência de chuva, para um dia qualquer, a chance de chover depende da condição do tempo nos dois dias anteriores e do mês analisado. Assim, para cada dia da série histórica, para cada mês do ano, foi verificado o percentual de ocorrência de chuvas ou de dias secos em função do estado anterior do sistema. Considerando os dois dias anteriores, foram obtidas oito possíveis combinações (codificadas em formato binário):

- 000 – tempo seco hoje, tendo em vista que não choveu nos dois dias anteriores;
- 001 – tempo seco hoje, tendo em vista que não choveu ontem, mas teve chuvas anteontem;
- 010 – tempo seco hoje, tendo em vista que choveu ontem, mas não teve chuvas anteontem;
- 011 – tempo seco hoje, tendo em vista que choveu nos dois dias anteriores;
- 100 – chove hoje, tendo em vista que não choveu nos dois dias anteriores;
- 101 – chove hoje, tendo em vista que não choveu ontem, mas teve chuvas anteontem;
- 110 – chove hoje, tendo em vista que choveu ontem, mas não teve chuvas anteontem;
- 111 – chove hoje, tendo em vista que choveu nos dois dias anteriores.

Com cada dia da série contendo um dos oito códigos binários acima, foi possível calcular a probabilidade de ocorrência de cada código em cada mês do ano, permitindo assim,

gerar uma série de chuvas no futuro, sorteando um número aleatório no intervalo de 0 a 1 para cada dia. Caso o número sorteado seja inferior à probabilidade de ocorrer chuva, em função do estado do sistema nos dois dias anteriores, define-se que naquele dia irá ocorrer precipitação.

Uma vez definida a condição de ocorrência ou não de chuvas, na etapa seguinte, para os dias com chuva, foi ajustada a distribuição Gamma, para cada mês e cada cenário futuro, para calcular a quantidade de precipitação em cada dia chuvoso. Para isto foi utilizado o software Matlab para ajustar os dois parâmetros dessa distribuição estatística, necessários para aplicar a distribuição Gamma. Uma vez ajustada a distribuição Gamma, foi também realizado um sorteio de um número aleatório no intervalo de 0 a 1, apenas para os dias chuvosos, sendo possível descobrir na função Gamma o valor de chuva com probabilidade de ocorrer igual ao número sorteado. Quanto mais próximo de 0 for o número sorteado pelo Excel, menor será a precipitação. Quanto mais próximo de 1, maior será a precipitação.

Uma vez que as condições são aleatórias, em função das características observadas no passado, foram geradas cinco séries estocásticas de precipitação diária para cada um dos cinco cenários de mudanças climáticas, para o período entre 2021 e 2050. Cada ano foi simplificado para 360 dias anuais (12 meses de 30 dias).

As séries apresentam características estatísticas semelhantes, tais como a média mensal, os valores máximos de precipitação e o número de dias de chuva, porém com uma sequência diferente de precipitações, que podem resultar em cenários mais ou menos críticos em relação a longos períodos secos ou chuvosos.

Na etapa seguinte, para a gerar as séries sintéticas de temperatura mensal, foi utilizado o modelo Thomas-Fiering (1962), que é um modelo estocástico autorregressivo (AR) para geração de vazões mensais (FREITAS, 2011; FARIAS, 2003). Andreis (2004) utiliza com sucesso em seu trabalho este modelo para geração de séries sintéticas de precipitação e evaporação. Citando ainda que este modelo já foi utilizado na geração de séries sintéticas estocásticas de evapotranspiração, na Grécia, de temperatura e radiação solar, em Oklahoma EUA com sucesso, aonde os cenários apresentavam efeito de sazonalidade.

O modelo Thomas-Fiering (1962) apresentou ao longo do tempo diversos ajustes e variações por diferentes autores segundo Hernández (2013). Oliveira (2014) em seu trabalho cita que entre as variações que mais se destacaram estão os modelos autorregressivos (AR),

modelos periódicos autorregressivos (PAR); modelos autorregressivos de média móvel (ARMA); modelos autorregressivos integrados de média móvel (ARIMA); modelos sazonais autorregressivos integrados de média móvel (SARIMA); modelos autorregressivos integrados de média móvel com entradas exógenas (ARIMAX). Para este trabalho foi utilizado o modelo periódico autorregressivo (PAR), de Thomas-Fiering com modificação de CLARKE e de MATALAS que utilizam a distribuição Normal. Este muito usado nas regiões semiáridas, onde apresentem comportamento de sazonalidade (FARIAS, 2003).

Para a geração das séries foi utilizado o software Matlab que gerou uma série contínua de 150 anos com dados mensais de temperatura médias mensais para cada cenário do futuro. Estes 150 anos foram distribuídos igualmente em séries de 30 anos no Excel, gerando cinco séries de 30 anos com dados mensais de temperatura média mensal para cada cenário.

Na penúltima etapa foi calculada a evapotranspiração pelo método de Thornthwaite, já utilizado neste trabalho para o mesmo processo. Para cada uma das cinco séries de temperatura mensal geradas na etapa anterior, e para cada cenário, foi calculada a evapotranspiração mensal.

A última etapa da geração de séries sintéticas estocásticas compreendeu a transformação da evapotranspiração mensal para o intervalo diário, dividindo por 30 dias. Esse processo foi realizado para cada série uma das 25 séries geradas anteriormente.

Deste modo, tem-se para o período futuro, entre 2021-2050, 25 séries estocásticas sintéticas de precipitação e de evapotranspiração diária, sendo possível a transformação para vazão utilizando o processo de simulação hidrológica.

Também foram analisados os percentuais de erro do uso do método de Markov com distribuição Gamma e do modelo de Thomas-Fiering. Para a análise dos erros na geração de séries sintéticas de precipitação pelo método markoviano com distribuição Gamma, foram feitas médias acumuladas mensais e anual dos dados utilizados como base para o modelo (dados do passado + percentual do MAGICC/SCENGEN) para cada cenário e comparados com as médias entre as cinco séries geradas para cada cenário. Após também foram calculados os erros médios gerais entre os cenários, sendo feita uma média dos dados base e comparadas com a média das 25 séries geradas mensal e anual. Deste mesmo modo também foi analisado o erro médio nas séries geradas de temperatura pelo modelo de Thomas-Fiering.

4.4 Simulação hidrológica

Uma vez conhecidas 25 possíveis séries de precipitação e de evapotranspiração para o período entre 2021 e 2050, nesta etapa, foi realizada a simulação hidrológica para obtenção de 25 séries possíveis de vazão no futuro. Para tanto, foi necessário considerar todos os parâmetros calibrados na etapa de modelagem hidrológica com os dados observados no passado.

A simulação foi realizada, portanto, no software WIN_IPH2, fazendo uso do modelo hidrológico IPH-II. Os dados de entrada do modelo IPH-II para simulação foram preenchidos do mesmo modo que a calibração, a diferença está no número de intervalos de tempo (dias) que agora são utilizados 10800 que é o número de dias das séries geradas na etapa anterior. Para cada série de precipitação junto com uma de evapotranspiração foi simulado uma série de vazão, gerando 25 séries de vazão para o futuro. Também com os mesmos parâmetros foi gerada uma série para o passado, para ser comparada com as futuras, considerando que as séries de vazão do passado não continham dados suficientes para tal comparação.

4.5 Análises das séries geradas

Nesta etapa do trabalho foram analisadas as séries geradas para o período futuro de precipitação, evapotranspiração e vazão, comparando-as com o período base do passado.

Para a análise dos efeitos das mudanças climáticas na precipitação no futuro foram comparadas as 25 séries geradas para o futuro (2021-2050), com base em cinco cenários de mudanças climáticas, com a série de precipitação do período entre 1976 e 2005. Foram comparados os valores acumulados mensais, buscando identificar uma tendência média de mudança para o período futuro, além dos valores mínimos e máximos projetados.

Para uma análise melhor dos dados, comparando mês a mês, foi adotado um critério de probabilidade. Sendo que os cenários gerados do futuro têm 30 anos com 30 dias cada mês totalizando 10800 dias. Enquanto os dados históricos do passado entre 1976 e 2005 levava em consideração todos os dias, do calendário juliano. Desta maneira havia divergência no número total de dias. E deste modo se constatou que para os dados do passado nos meses com 31 dias e fevereiro não poderiam ser comparados igualmente com os meses do futuro, todos com 30 dias. Com isso todos os meses de janeiro, março, maio, julho, agosto, outubro e dezembro

tiveram as médias acumuladas divididas por 31 e multiplicadas por 30, e para os meses de fevereiro, as médias acumuladas foram divididas por 28,25 (0,25 pois a cada 4 anos se tem um dia a mais) e multiplicadas por 30, tendo então uma probabilidade da média acumulada considerando todos os meses com 30 dias.

De mesmo modo que para foi realizada a análise das mudanças climáticas na precipitação para período futuro, foi para evapotranspiração, comparando valores mensais, das 25 séries geradas para o futuro (2021-2050), buscando identificar uma tendência média de mudança para o período futuro, além dos valores mínimos e máximos projetados.

Para a análise dos erros na geração de séries sintéticas de precipitação pelo método markoviano com distribuição Gamma, foram feitas médias acumuladas mensais e anual dos dados utilizados como base para o modelo (dados do passado + percentual do MAGICC/SCENGEN) para cada cenário e comparados com as médias entre as cinco séries geradas para cada cenário. Após também foram calculados os erros médios gerados entre os cenários, sendo feita uma média dos dados base e comparadas com a média das 25 séries geradas mensal e anual. Do mesmo modo em que se analisou os erros médios para as séries geradas pelo método markoviano com distribuição Gamma, também se analisou para as temperaturas geradas pelo modelo de Thomas-Fiering.

Para efeitos das mudanças climáticas na vazão no futuro foram comparados os valores históricos mínimo, médio e máximo da série gerada para o período passado (1976-2005) com os valores históricos mínimo, médio e máximos dentre todos os cenários gerados para o período futuro (2021-2050). Também comparadas as médias mensais e anual da série gerada para o período passado com as mínimas médias e máximas dentre as 25 geradas para período futuro. Para comparação dos valores de vazão mínima, foi feito a mínima mensal de cada mês, tanto para período passado quanto para período futuro. Após foram feitas as médias de todos os meses dos 30 anos analisados para cada série. Este processo foi repetido para o cálculo das $Q_{7\text{dias}}$ (média de 7 dias consecutivos) mínimas. Podendo assim fazer a comparação entre os valores médios da série gerada para o período passado com as mínimas, médias e máximas dentre as 25 séries gerada para período futuro, para as vazões mínimas e as $Q_{7\text{dias}}$.

5 RESULTADOS E DISCUÇÕES

Neste capítulo são descritos os resultados e análises dos processos que possibilitaram a atingir os objetivos deste trabalho. Dividindo em três subitens: i) Modelagem hidrológica; ii) Séries sintéticas estocásticas futuras; iii) Análises das séries geradas.

5.1 Modelagem hidrológica

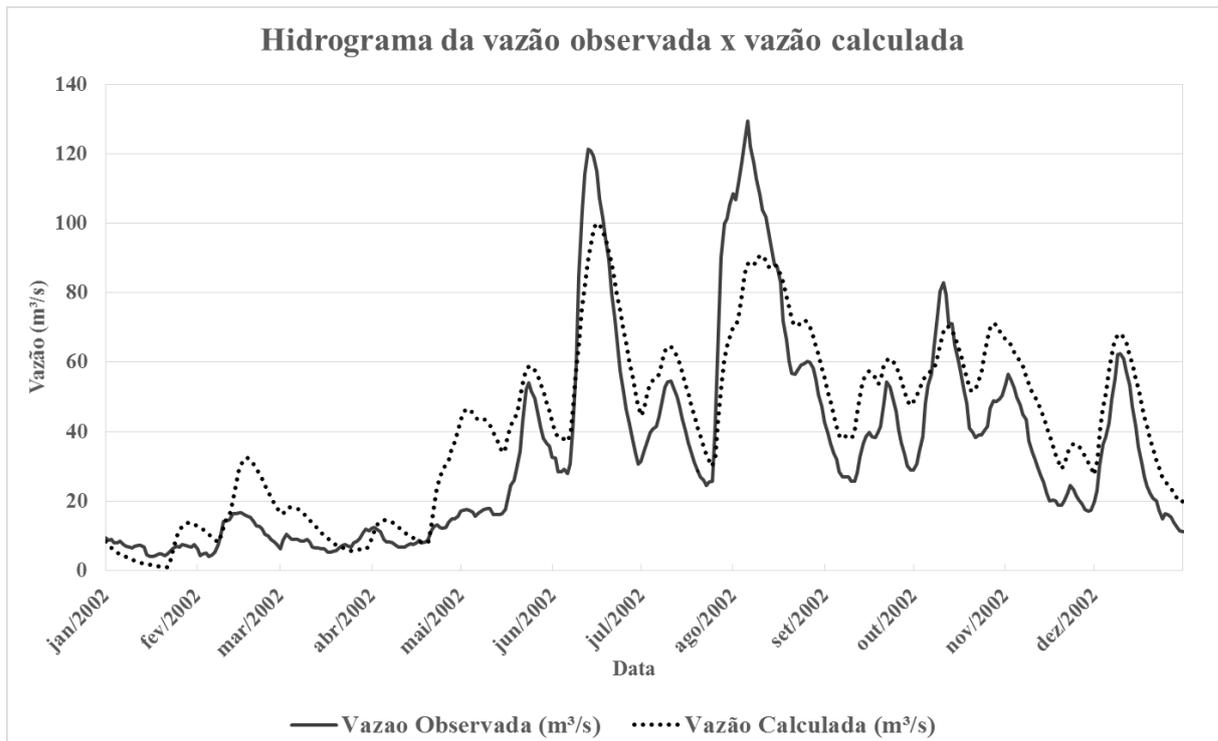
Na modelagem hidrológica, o modelo IPH-II foi calibrado utilizando a série de dados hidrológicos correspondente aos anos de 1988 a 1993 pelo processo automático monobjetivo utilizando a função-objetivo referente ao coeficiente de Nash-Sutcliffe (FO5). A calibração gerou os seguintes os parâmetros:

- $I_o = 250,3876$
- $I_b = 10,00$
- $H = 0,0100000342$
- $K_s = 3,3655$
- $K_{sub} = 10,00$
- $R_{max} = 9,00$
- $Alfa = 19,9965$

O coeficiente Nash-Sutcliffe (NS) apresentado com estes parâmetros pelo modelo IPH-II foi de 0,6219 considerado bom por Collischonn (2001), que classifica NS de 0 a 0,35 como não aceitáveis, de 0,35 a 0,60 como aceitáveis e NS maiores que 0,60 como bons.

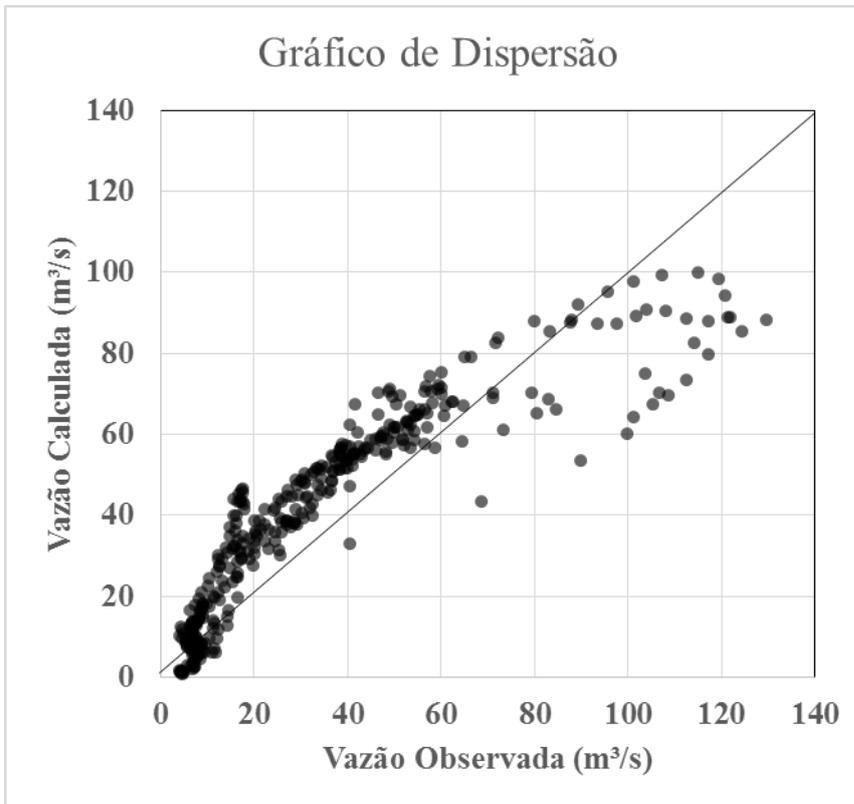
Para a validação do modelo onde foram utilizados os parâmetros gerados na calibração, foi obtido um Nash-Sutcliffe de 0,75 resultado superior ao da calibração, apresentado no hidrograma da Figura 9 que compara as vazões observadas no ano de 2002 com as vazões calculadas pelo modelo para o mesmo período. Na Figura 10 é apresentado um gráfico de dispersão das vazões calculadas e observadas.

Figura 9 – Hidrograma de comparação da vazão observada e a vazão calculada.



Fonte: Autor

Figura 10 – Dispersão das vazões calculadas pelas observadas.



Fonte: Autor

O hidrograma demonstra que a série de vazões gerada pelo modelo IPH-II calibrado pela função Nash-Sutcliffe seguem o padrão da série observada, porém com algumas falhas, onde em alguns pontos a curva calculada ficou distante da curva observada. No gráfico de dispersão observa-se que as vazões mais baixas não apresentam um erro menos significativo, enquanto as vazões altas apresentam um erro maior. Isto ocorre principalmente pelo fato, que foram utilizadas séries com poucos dados de vazão para a comparação devido à escassez dos mesmos.

A série utilizada para calibração foi gerada através da curva-chave da Bacia do Gravataí através das cotas fluviométricas. Foi observado que esses dados não apresentavam vazões inferiores a $5\text{m}^3/\text{s}$. Isto ocorre devido ao efeito remanso gerado pelo Rio Jacuí por ser de maior porte e represar as águas do Gravataí, mantendo uma cota mais elevada na régua de medição linimétrica da estação pluviométrica de Passo Canoas Auxiliar, impossibilitando de obter-se vazões críticas mesmo em períodos de estiagem, pela curva-chave da Bacia. Influenciando na real vazão para o local.

5.2 Séries sintéticas estocásticas futuras

Este subcapítulo foi dividido, assim como na metodologia em duas partes a primeira refere-se dos resultados obtido na geração de cenários de precipitação e temperatura para o período no futuro de 2021 a 2050, considerando os diversos modelos climáticos utilizados nos relatórios do IPCC. A segunda refere-se aos resultados da geração de séries sintéticas estocásticas, baseadas nas estatísticas obtidas junto às séries observadas no passado, levando-se em consideração as mudanças previstas nos cenários futuros.

5.2.1 Cenários futuros

A primeira parte, onde foram obtidas condições de precipitação e temperatura através do programa MAGICC/SCENGEN para o período futuro de 2021 a 2050. Na Tabela 8 apresenta as mudanças de temperatura e precipitação geradas pelo MAGICC/SCENGEN para cada mês do ano e para cada cenário do IPCC na Bacia do Gravataí.

Tabela 8 – Mudança na precipitação (%) e temperatura (°C) nos cenários do IPCC na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, considerando o período de base 1976-2005 e o período futuro 2021-2050.

CENÁRIOS										
Mês	A1-ASF		A1B-AIM		A2-AIM		B1-AIM		B2-AMB	
	PREC	TEMP	PREC	TEMP	PREC	TEMP	PREC	TEMP	PREC	TEMP
Janeiro	5,0%	1,07	2,7%	0,82	3,3%	0,63	3,8%	0,71	2,8%	0,87
Fevereiro	6,5%	1,34	4,8%	1,02	5,4%	0,93	6,3%	0,91	4,0%	0,95
Março	4,9%	1,21	5,4%	0,88	-0,9%	0,83	2,4%	0,77	7,0%	0,89
Abril	3,8%	1,24	2,7%	0,81	0,1%	0,91	1,9%	0,71	5,1%	0,88
Mai	3,3%	1,15	4,2%	0,85	-1,8%	0,68	1,5%	0,75	5,7%	0,93
Junho	3,6%	1,03	6,0%	0,65	-0,2%	0,74	6,6%	0,65	4,4%	0,75
Julho	3,9%	1,20	4,5%	0,89	0,6%	0,87	5,4%	0,82	4,5%	0,83
Agosto	2,8%	1,22	2,4%	1,00	-1,2%	0,77	2,0%	0,89	2,2%	0,93
Setembro	8,0%	1,20	7,9%	0,91	7,7%	0,74	11,4%	0,75	3,7%	0,95
Outubro	-7,2%	1,42	-3,3%	1,10	-12,3%	0,99	-5,3%	0,92	0,8%	1,00
Novembro	1,1%	1,41	2,0%	1,01	-0,7%	1,05	1,9%	0,84	1,8%	0,95
Dezembro	11,2%	1,03	8,0%	0,75	16,2%	0,66	12,5%	0,64	0,7%	0,80

Fonte: Autor. Onde: Prec é a mudança percentual projetada para o período entre 2020 e 2050 na precipitação; Temp é o aumento na temperatura média em °C, para o período entre 2020 e 2050.

De modo geral, observa-se um aumento na precipitação para todos os cenários, na maioria dos meses do ano. Quatro dos cinco cenários observados apresentaram um aumento médio acima de 3,5% na precipitação, destacando-se o cenário da família B1 com um aumento percentual de 4,2% na precipitação média, neste mesmo cenário, os meses de dezembro e setembro tem um aumento mensal da precipitação de 12,5% e 11,4%, respectivamente.

O cenário A2 que descreve um mundo muito heterogêneo, um aumento contínuo da população mundial e crescimento econômico e tecnológico fragmentado e lento, apresenta o menor aumento na precipitação média (1,2%). Isto devido ao cenário ter o maior número de meses com diminuição na precipitação, com metade dos meses diminuindo a precipitação, destacando-se o mês de outubro com diminuição de 12,3% na precipitação. Este cenário ainda é o que apresenta maior variação entre as precipitações mensais tendo no mês de dezembro o maior aumento entre todos os meses de todos os cenários (16,2%), enquanto outubro a maior diminuição dentre todos. O cenário B2 foi o que apresentou a menor variação mensal, com aumento mínimo de 0,7% e máximo de 7,0%.

Os meses que apresentarem maior aumento, considerando uma média entre os cenários, foram os meses de dezembro e setembro com aumento percentual de 9,7% e 7,7% na precipitação mensal. Já o mês de outubro foi o único mês que a precipitação apresentou diminuição 5,5%, que teve diminuição da precipitação em quatro dos cinco cenários.

Quanto as temperaturas, de modo geral, todos os cenários, assim como todos os meses apresentam aumento nas temperaturas da Bacia do Gravataí no período de 2021 a 2050, sendo que se destacam os meses de outubro, novembro e fevereiro que apresentaram um aumento médio entre os cenários, na temperatura de 1,08°C, 1,05°C e 1,03°C respectivamente.

O cenário que se destaca no aumento das temperaturas no futuro é o A1F, com todos os meses do ano aumentado mais que 1°C e um aumento médio de 1,21°C, com a máxima no mês de outubro de 1,42°C. Mesmo a família do cenário A1 tendo um aumento pequeno na população mundial e um rápido crescimento econômico e de tecnologias eficientes, o cenário A1F faz uso intensivo de energias de fontes fósseis, que é o fator determinante deste aumento na temperatura.

5.2.2 Séries sintéticas estocásticas

Com método de Markov utilizado na geração de séries sintéticas, foi possível obter, qual a probabilidade de chover levando em consideração os dias anteriores. Na Tabela 9 apresenta estas probabilidades ocorrer precipitação.

Tabela 9 – Probabilidade de ocorrência de precipitação considerando os dias anteriores.

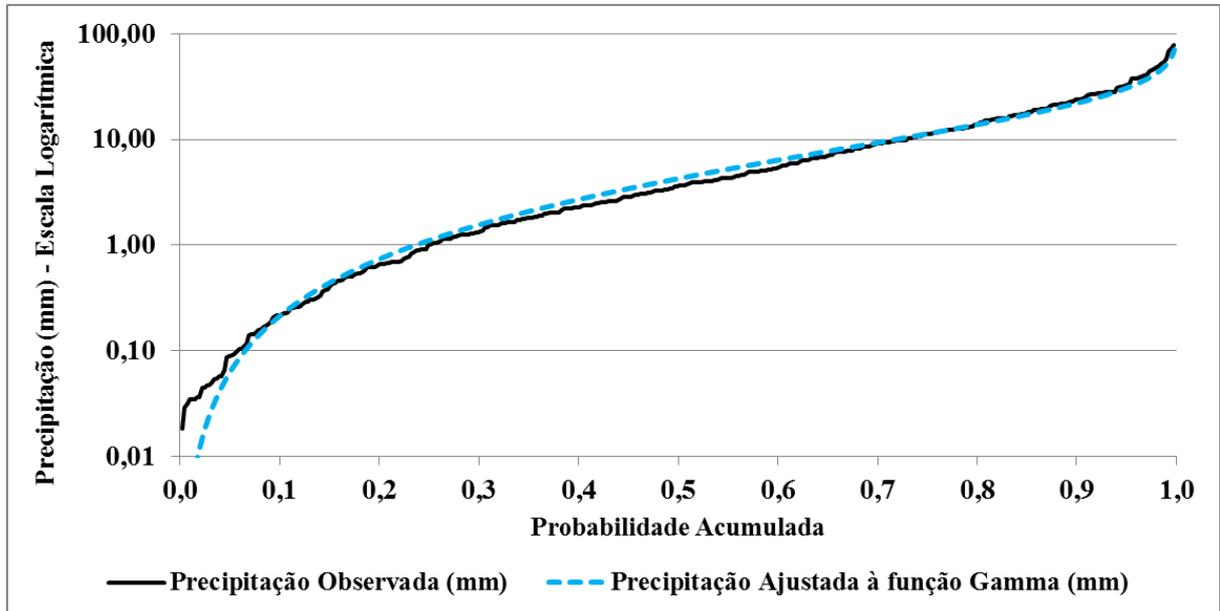
Probabilidade de chover considerando os dois dias anteriores				
Mês	P100	P101	P110	P111
Janeiro	27%	35%	61%	70%
Fevereiro	33%	34%	71%	70%
Março	28%	30%	65%	61%
Abril	28%	38%	64%	61%
Mai	26%	27%	64%	64%
Junho	27%	27%	69%	66%
Julho	29%	29%	71%	62%
Agosto	27%	36%	66%	62%
Setembro	28%	27%	73%	65%
Outubro	34%	28%	70%	66%
Novembro	29%	32%	74%	61%
Dezembro	30%	30%	63%	60%

Fonte: Autor. Onde: P100 – probabilidade de chover hoje, tendo em vista que não choveu nos dois dias anteriores; P101 – probabilidade de chover hoje, tendo em vista que não choveu ontem, mas teve chuvas anteontem; P110 – probabilidade de chover hoje, tendo em vista que choveu ontem, mas não teve chuvas anteontem; P111 – probabilidade de chover hoje, tendo em vista que choveu nos dois dias anteriores.

De modo geral observa-se que a chance de chover quando no dia anterior não choveu é de aproximadamente um terço enquanto se ocorrer chuva no dia anterior a probabilidade aumenta para $2/3$. Levando em consideração o segundo dia anterior ao analisado, não há praticamente nenhuma influência, apenas nota-se uma leve diminuição na porcentagem quando os dois dias anteriores são chuvosos, comparados aos dias com chuva no dia imediatamente anterior e dia seco no consecutivo.

No processo de ajuste da distribuição Gamma para o modelo markoviano, realizado para cada cenário foi obtida a curva de distribuição demonstrada na Figura 11, onde é comparada a precipitação observada com a precipitação ajustada pela distribuição Gamma.

Figura 11 – Gráfico de precipitação observada – escala logarítmica – versus probabilidade acumulada. Comparando precipitações, observada com ajustada pela função Gamma.

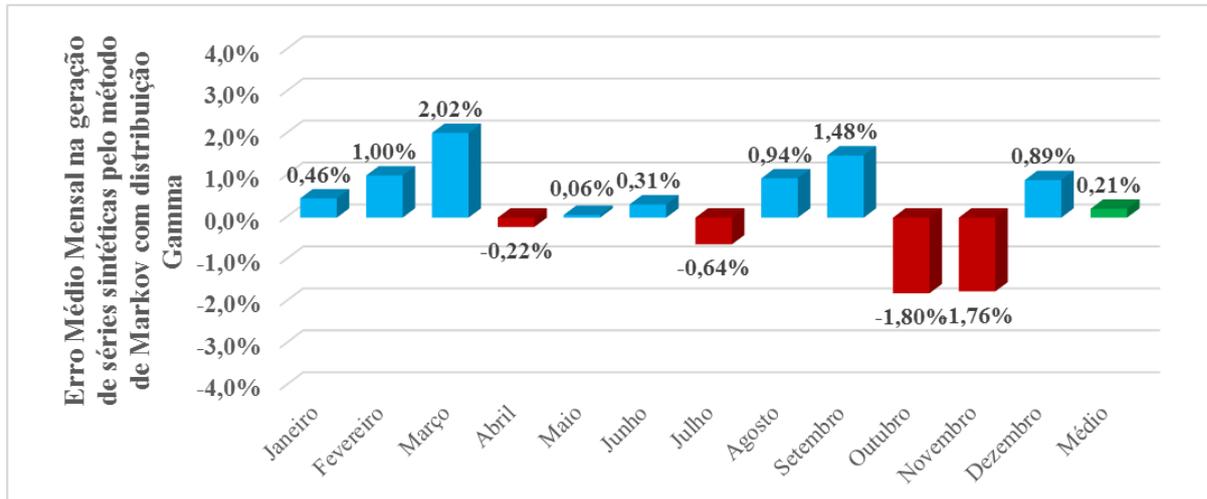


Fonte: Autor. Exemplo da distribuição Gamma utilizada no mês de abril do cenário A1F.

Observa-se que a curva da precipitação ajustada pela distribuição Gamma se ajusta muito bem a curva observada, apenas no início da curva os dados diferem um pouco. Condicionando o uso desta função para geração de séries sintéticas para todos os cenários.

A geração de séries de precipitação pelo método de Markov com distribuição Gamma, mostraram-se satisfatórias pelo fato que o modelo apresentou um erro geral superestimando em apenas 0,2%. Na Figura 12 é apresentado um gráfico com os erros médios de cada mês.

Figura 12 – Gráfico de erros médios mensais nas séries sintéticas geradas pelo método de Markov com distribuição Gamma.



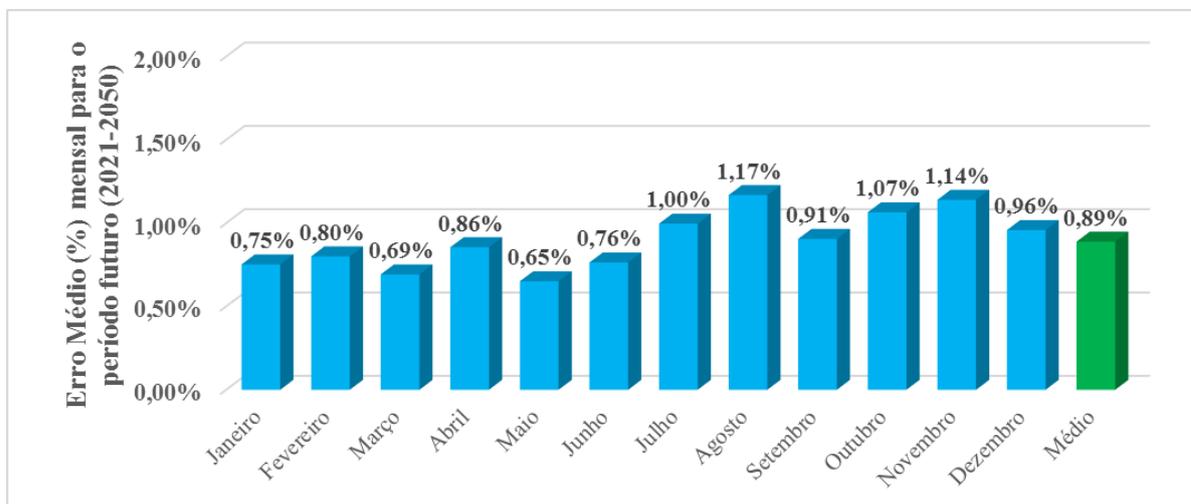
Fonte: Autor

De modo geral o modelo apresentou um erro de apenas 0,2%, fazendo uma análise mensal, oito de dos doze meses superestimaram a precipitação, destacando-se os meses de março e setembro que superaram 1% de erro médio, com 2,02% e 1,48% respectivamente. Enquanto quatro dos meses subestimaram as precipitações com destaque para os meses de outubro e novembro com subestimação de 1,80% e 1,76% respectivamente.

Analisando cada cenário, o que apresentou maior erro médio foi o cenário A1F que subestimou a precipitação em 1,23%. Este mesmo cenário teve no mês de maio a maior subestimação (7,7%) e no mês de dezembro a maior superestimação (3,6%). A maior superestimação foi do cenário B2 com 7,6% no mês de agosto, cenário este, que apresentou a maior variação tendo uma subestimação de 6,6%. De modo geral todos cenários apresentaram um erro satisfatório, tendo dois meses distintos em cada cenário que apresentaram valores mais altos, que destoaram da maioria. Nenhum mês apresentou alguma espécie de vício de programação do método, os erros apresentados nas séries extraídas com certeza mudariam se fosse feita uma nova extração de séries do modelo.

O modelo de Thomas-Fiering mostrou-se muito bom para geração de séries sintéticas estocásticas de temperatura onde apresentou um erro médio geral superestimando os valores base em apenas 0,89%. A Figura 13 mostra um gráfico com os erros médios de cada mês e o erro geral médio.

Figura 13 – Gráfico de erros médios mensais nas séries sintéticas geradas de temperatura pelo modelo Thomas-Fiering.



Fonte: Autor

De modo geral, observa-se que o modelo Thomas-Fiering apresentou erros médios mensais baixos, apenas nos meses de agosto, novembro e outubro que as séries geradas superestimadas em mais de 1%. Fazendo uma análise para cada cenário, quatro dos cinco cenários apresentaram uma superestimava nas temperaturas geradas para o futuro pelo modelo, o único cenário que subestimou as temperaturas em 0,13%, foi o cenário A1F. O cenário que apresentou a maior superestimava, foi o A2, com 1,49% tendo nos meses de setembro (2,34%), Junho (2,28%) e agosto (2,18%) as maiores superestimavas do modelo neste cenário.

Dentre todos os meses de todas as séries geradas a que apresentou o maior erro, que subestima em 2,37% foi do cenário B1. Já a maior subestimativa foi no mês de maio do cenário A1F. A maior variação ocorreu no cenário A1B, que apresentou uma mínima que subestima em 0,04% e uma máxima que superestima em 1,81%.

5.3 Análises das séries geradas

Nesta etapa do trabalho foram analisadas as séries sintéticas geradas para o período futuro (2021-2050) de precipitação, evapotranspiração e vazão, comparando-as com o período passado (1976-2005). Para melhor entendimento as análises de precipitação, evapotranspiração e vazão foram apresentadas separadamente. Onde primeiramente as séries de precipitação foram analisadas, comparando as precipitações medias do período passado com as mínimas

medias e máximas entre as series do período passado. O mesmo foi feito para evapotranspiração. Para as séries de vazão além das médias foram analisadas as mínimas e as $Q_{7\text{dias}}$ do período passado, comparando-as com as séries do período futuro.

5.3.1 Mudanças na precipitação em período futuro (2021-2050)

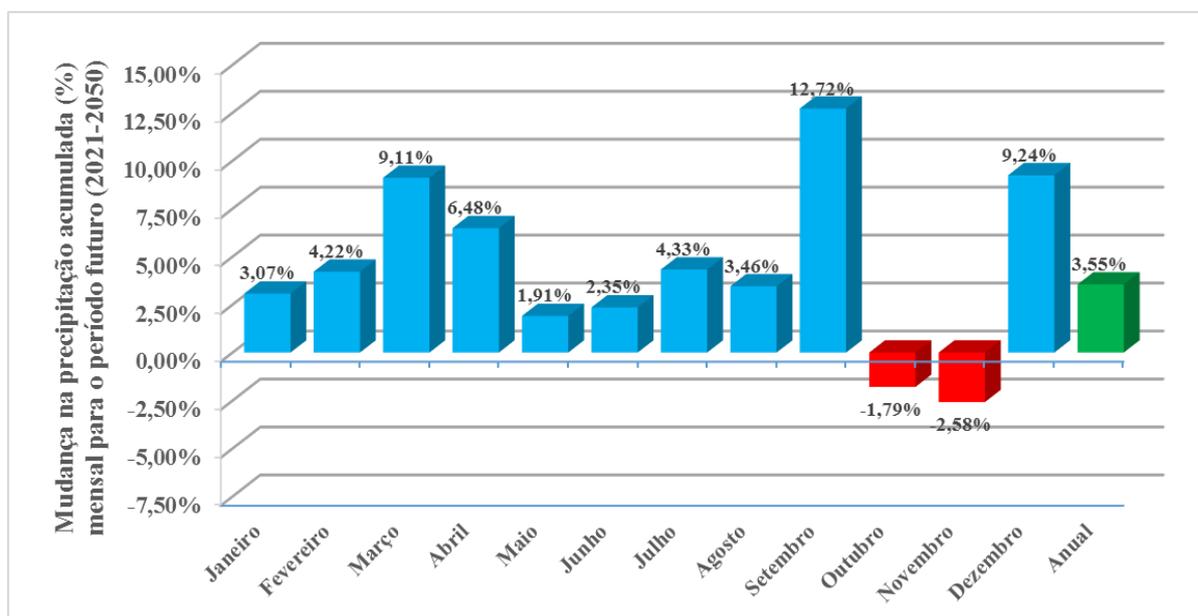
Na Tabela 10 são apresentados os valores de precipitação média mensal acumulada no período de base (1976-2005) e os valores mínimos, médios e máximos dos 25 cenários projetados para o período futuro (2021-2050). A Figura 14 mostra um gráfico com a mudança projetada (%) para as precipitações mensais, considerando a tendência média dos 25 cenários no futuro.

Tabela 10 – Precipitação média mensal acumulada no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.

Mês	Passado (1976-2005)	Cenários Futuros (2021-2050)		
		Mínima	Média	Máxima
Janeiro	105,22	82,00	108,45	124,62
Fevereiro	123,50	111,06	128,71	151,78
Março	91,28	87,53	99,59	113,73
Abril	105,87	98,98	112,74	139,75
Maio	92,12	81,17	93,88	108,01
Junho	136,33	123,47	139,54	162,42
Julho	139,09	123,88	145,11	183,93
Agosto	116,92	103,98	120,96	141,79
Setembro	120,27	118,15	135,57	154,98
Outubro	120,76	95,54	118,60	138,47
Novembro	115,39	95,46	112,41	126,22
Dezembro	109,75	99,05	119,89	143,67
Anual	1386,19	904,37	1435,44	2028,49

Fonte: Autor.

Figura 14 – Mudança na precipitação acumulada mensal para o período futuro, entre 2021 e 2050, considerando a média dos 25 cenários projetados para o futuro.



Fonte: Autor

Observa-se, de modo geral, uma tendência média de aumento na precipitação acumulada mensal e anual, principalmente entre os meses de dezembro e setembro (verão, outono e inverno). Destacam-se os meses de setembro, dezembro, março, e abril com aumento percentual de 12,72%, 9,24%, 9,11% e 6,48%, respectivamente. Nos meses de outubro e novembro a tendência média é de redução nas precipitações, considerando os 25 cenários de mudanças climáticas, com destaque para o mês de novembro, com redução de 2,58% no acumulado mensal. Para a precipitação anual a tendência média é de aumento de 3,55%, confirmando os estudos de Oliveira (2014) e Marengo (2007) que também indicou aumento de precipitação no estado do RS.

Embora a tendência média dos cenários indique um aumento na precipitação acumulada em quase todos os meses do ano, alguns cenários obtidos para o futuro apresentam-se muito críticos quanto à redução das precipitações. No mês de outubro, por exemplo, o cenário mínimo mais crítico (A2) aponta para uma redução de 120,76 mm (1976-2005) para 95,54 mm (2021-2050), equivalente a -20,9% de precipitação média mensal. A redução das precipitações nesta época do ano (primavera) pode representar um problema para a cultura do arroz na bacia, uma vez que neste período é realizado o plantio e realizada a irrigação das lavouras, o que poderá demandar maior quantidade de água do rio Gravataí para suprir as necessidades das plantas.

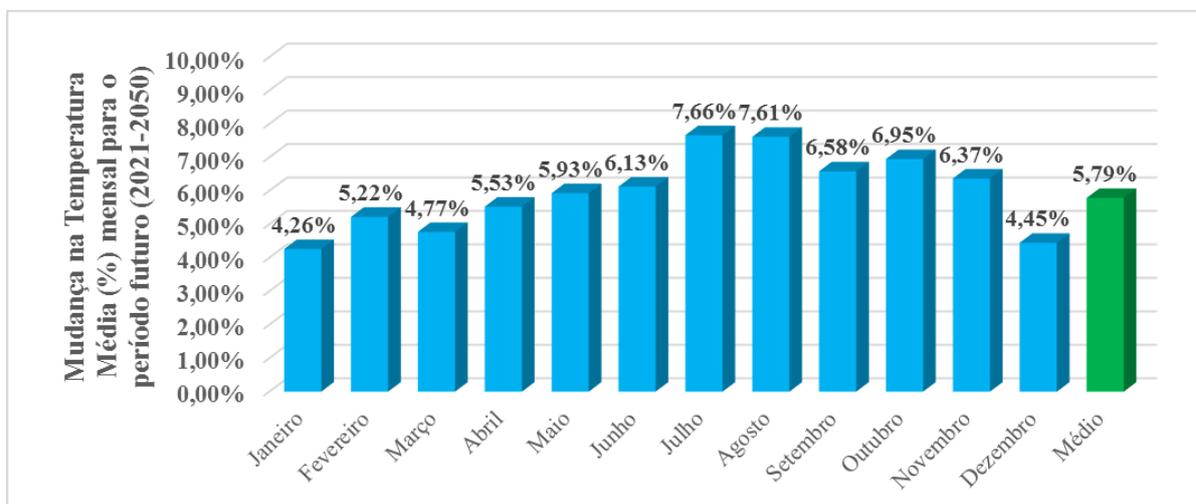
Isso poderia reduzir ainda mais a capacidade de atendimento às demandas na bacia hidrográfica, ampliando o problema de gestão dos recursos hídricos superficiais. No mês de janeiro por sua vez apresentou um aumento médio de 3,07%, porém a mínima entre os cenários para este mês foi de 82 mm (2021-2050), 22,1% menos que na média do passado que foi de 105,22 mm (1976-2005). Esta mínima no mês de janeiro é resultado das estiagens neste período que em alguns anos afetam o estado, podendo comprometer seriamente o abastecimento de água nas cidades, sendo que este é um dos meses mais quentes do ano, onde há um maior consumo de água e a Bacia do Gravataí já sofre com falta d'água neste período (PECH-RS,2007).

Ao analisar os valores críticos máximos, pode-se observar que a precipitação no período futuro (2021-2050) poderá apresentar mudanças superiores a 30% nos acumulados mensais. Por exemplo, no mês de abril o cenário máximo (B2) aumentou 32%, de 105,87 mm (1976-2005), para 139,75 mm (2021-2050). No mês de julho, o mais chuvoso no período de base (1976-2005), o cenário máximo (B1) mais crítico aponta para um aumento de 139,09 mm (1976-2005) para 183,93 mm (2021-2050), equivalente a um crescimento de 32,2% na precipitação média mensal. Esse aumento poderá representar uma maior possibilidade de ocorrências de inundações no período do inverno, o que também já foi constatado em outros estudos relacionados às mudanças climáticas, como o de Oliveira (2014) em seu estudo na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí - RS.

5.3.2 Mudanças na temperatura e evapotranspiração em período futuro (2021-2050)

Primeiramente na Figura 15 é apresentado um gráfico com a mudanças na temperatura médias mensais para o período futuro (2021-2050) comparando com as temperaturas médias mensais do período passado (1976-2005).

Figura 15 – Gráfico das mudanças na temperatura média mensal para o período futuro (2021-2050).



Fonte: Autor

Observa-se que, de modo geral as temperaturas aumentaram em média 5,79% entre os meses do ano. Os meses com maior aumento foram os meses de junho (7,66%), julho (7,61%), outubro (6,95%) e setembro (6,58%), meses de inverno e início da primavera. Confirmando os estudos de Marengo (2007) que indica aumento nas temperaturas médias no período de inverno.

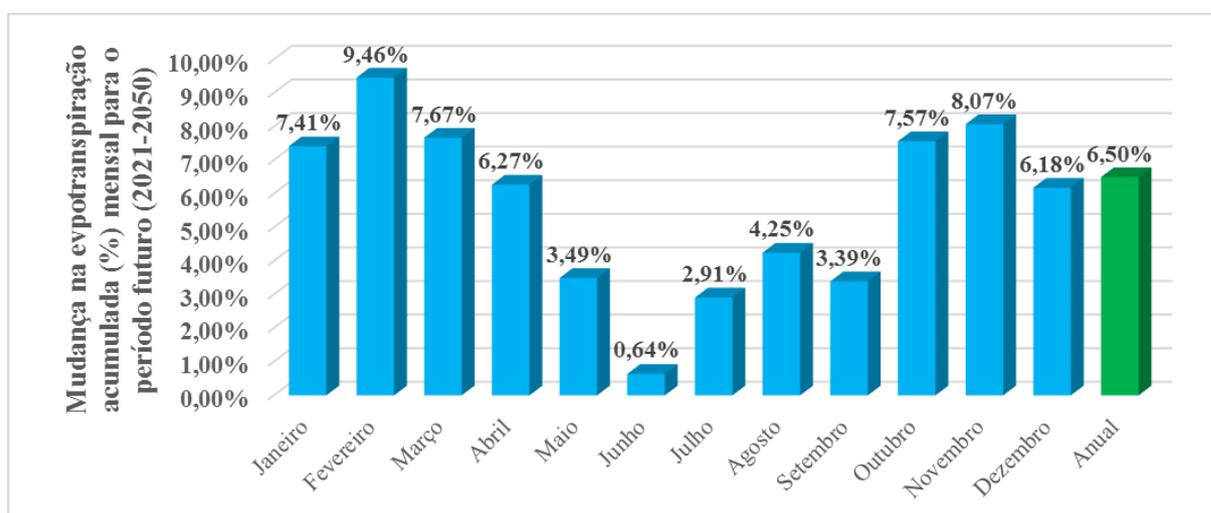
Na Tabela 11 são apresentados os valores de evapotranspiração média mensal acumulada no período de base (1976-2005) e os valores mínimos, médios e máximos dos 25 cenários projetados para o período futuro (2021-2050). A Figura 16 mostra um gráfico com a mudança projetada (%) para as evapotranspirações mensais, considerando a tendência média dos 25 cenários no futuro.

Tabela 11 – Evapotranspiração média mensal acumulada no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-20650), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.

Mês	Passado (1976-2005)	Cenários Futuros (2021-2050)		
		Mínima	Média	Máxima
Janeiro	127,05	134,16	136,47	139,68
Fevereiro	108,72	117,40	119,00	120,78
Março	104,00	106,78	111,97	120,32
Abril	70,76	71,61	75,20	77,44
Mai	49,68	48,75	51,42	54,84
Junho	34,49	31,10	34,71	38,64
Julho	34,92	34,27	35,93	38,71
Agosto	42,96	42,63	44,78	47,21
Setembro	51,36	51,08	53,10	55,62
Outubro	75,98	79,90	81,72	83,37
Novembro	92,07	95,94	99,50	101,53
Dezembro	117,69	122,38	124,96	128,73
Anual	909,67	872,66	968,78	1060,77

Fonte: Autor.

Figura 16 – Mudança na evapotranspiração acumulada mensal para o período futuro, entre 2021 e 2050, considerando a média dos 25 cenários projetados para o futuro.



Fonte: Autor.

Observa-se, uma tendência no aumento na evapotranspiração em todos os meses do ano, conforme já esperado, levando em conta que a temperatura média do futuro (2021 – 2050) aumentará em todos os meses do ano, principalmente entre os meses de outubro e abril (primavera e verão). Destacam-se os meses de fevereiro e novembro, com aumento percentual de 9,46% e 8,07 respectivamente. Nos meses de maio a setembro (inverno) a tendência é de

aumento da evapotranspiração, porém menos significativo que no período de verão. Há também um aumento na evapotranspiração anual, onde a tendência média é de aumento de 6,50%.

Para os meses de inverno este aumento não é muito elevado pois os fatores de correção adotados pelo método são menores nestes meses, também as tendências de aumento das temperaturas médias para estes meses são menores que no período de verão.

Embora a tendência média dos cenários indique um aumento na evapotranspiração acumulada em todos os meses do ano, alguns cenários obtidos para o futuro apresentam redução nos valores. No mês de junho, por exemplo o cenário mais crítico (B1) aponta uma redução de 9,8%, de 34,92mm no período do passado (1976-2005) para 31,10mm de lâmina de água evapotranspirada no período futuro (2021-2050). Mesmo analisando as mínimas entre as 25 séries do futuro, alguns meses apresentaram aumento na evapotranspiração para o período futuro, sendo que no mês de fevereiro o cenário mais crítico no futuro (B2) apresenta uma evapotranspiração de 117,4mm, 8% mais que no período passado (1976-2005) que apresentou 108,72 mm de lamina de água evapotranspiração.

Ao analisar os valores críticos máximos, pode-se observar que a evapotranspiração no período futuro (2021-2050) poderá apresentar mudanças superiores a 15%, onde o mês de março que no período passado (1976-2005) apresentava uma evapotranspiração média de 104,0mm, para o período futuro poderá apresentar no cenário mais crítico (A1B) 120,32mm de evapotranspiração.

5.3.3 Mudanças na vazão em período futuro (2021-2050)

Na Tabela 12 foram apresentados os valores de vazões históricas, mínimo, médio e máximo, para a série do passado (1976-2005) e também entre as 25 séries do futuro (2021-2050).

Tabela 12 – Vazões históricas no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050).

	Vazões Médias Históricas (m ³ /s)	
	Passado (1976-2005)	Futuro (2021-2050)
Mínima	0,06	0,01
Média	33,02	33,28
Máxima	114,94	138,62

Fonte: Autor

Observa-se que tanto as vazões do passado, quanto as do futuro apresentam resultados semelhantes, quando comparadas as vazões médias, para as mínimas, a vazão do período futuro (2021-2050) mínima entre as 25 séries e de 0,05 m³/s inferior à do período passado (1976-2005). Enquanto a máxima entre as 25 séries do futuro apresenta um aumento de 20,6% em relação a máxima do passado, de 114,94m³/s para 138,62 m³/s.

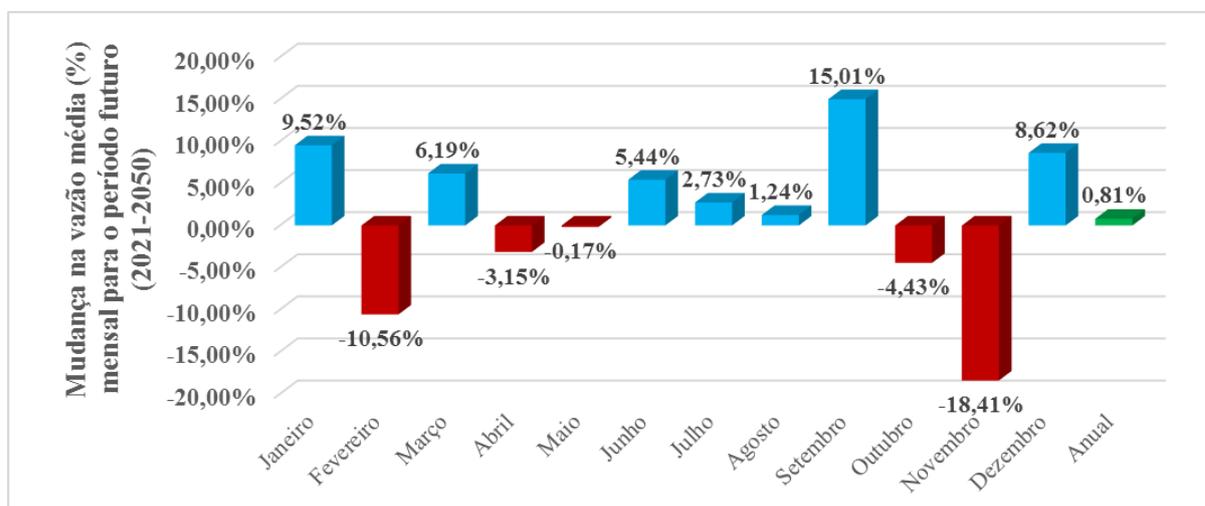
As vazões médias foram analisadas na Tabela 13, onde é apresentado os valores de vazões média mensal no período passado (1976-2005), e os valores mínimos, médios e máximos entre as 25 séries geradas para o período futuro (2021-2050). A Figura 17 apresenta um gráfico com a mudança (%) na vazão média para o período futuro, considerando os 25 cenários.

Tabela 13 – Vazão média mensal no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.

Mês	Passado (1976-2005)	Vazão Média Mensal (m ³ /s)		
		Cenários Futuros (2021-2050)		
		Mínima	Média	Máxima
Janeiro	19,25	16,96	21,08	28,98
Fevereiro	26,64	20,10	23,83	28,54
Março	21,78	18,13	23,13	27,41
Abril	26,93	21,68	26,08	36,84
Mai	29,64	24,06	29,59	34,44
Junho	38,47	36,32	40,56	47,36
Julho	50,96	47,35	52,35	58,20
Agosto	47,17	39,03	47,76	55,22
Setembro	38,28	38,22	44,02	50,53
Outubro	39,69	31,42	37,93	44,57
Novembro	34,34	24,07	28,02	32,45
Dezembro	23,06	18,67	25,05	30,39
Anual	33,02	16,37	33,28	53,07

Fonte: Autor

Figura 17 – Mudança na vazão mensal para o período futuro, entre 2021 e 2050, considerando a média dos 25 cenários projetados para o futuro.



Fonte: Autor

Observa-se que, de modo geral, a vazão anual tende a aumentar levemente no futuro, as vazões mensais oscilam muito porem a uma tendência de aumento. Os meses de setembro (15,01%) e janeiro (9,52%) destacam-se pelo aumento nas vazões médias, enquanto os meses de novembro (18,41%) e fevereiro (10,56%) se destacam pela diminuição.

Ainda que a tendência seja de aumento nas vazões médias, as mínimas em alguns cenários gerados para o futuro apresentaram uma diminuição de quase 30% nos acúmulos mensais. Por exemplo, o cenário mais crítico do mês de novembro aponta uma redução de 34,34 m³/s para 24,07 m³/s, equivalente a 29,9% de vazão média mensal.

Pode-se observar, ao analisar os valores críticos máximo de vazão média que, o mês de janeiro se destaca aumentando consideravelmente sua vazão. O cenário futuro (2021-2050) mais crítico para o mês aponta uma vazão de 28,98 m³/s, vazão está 50,5% superior a vazão média do período passado (1976-2005), de 19,25 m³/s. Este mesmo mês apresentou uma diminuição de 11,9% em relação as mínimas, mostrando uma grande oscilação das vazões neste mês. O mesmo ocorre para os meses de dezembro, fevereiro e março, isto ocorre devido ao clima gaúcho que alguns anos apresentam um período muito chuvoso, enquanto outros a uma estiagem.

Os valores de vazão mensal mínima no período de base (1976-2005) e os valores mínimos médios e máximos dos 25 cenários projetados para o período futuro (2021-2050), são

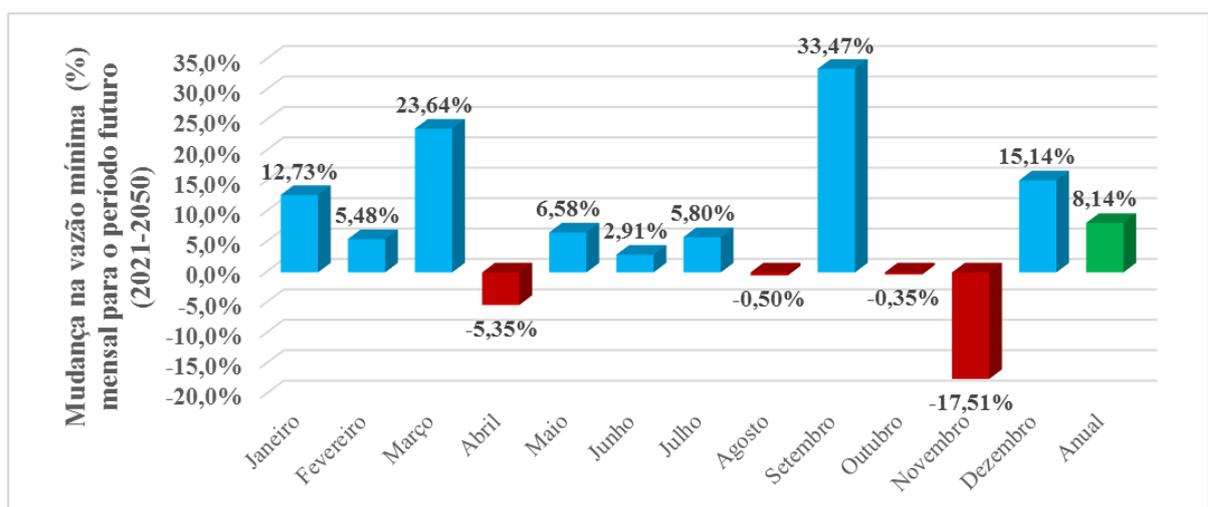
apresentados na Tabela 14. O gráfico apresentado na Figura 18 mostra a mudança nas vazões mínimas do passado e dos 25 cenários do futuro.

Tabela 14 – Vazão mínima mensal no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.

Mês	Passado (1976-2005)	Cenários Futuros (2021-2050)		
		Mínima	Média	Máxima
Janeiro	8,004	6,201	9,023	13,706
Fevereiro	9,408	6,441	9,923	13,066
Março	8,212	6,939	10,154	12,860
Abril	11,448	7,730	10,835	17,362
Mai	13,507	10,524	14,395	17,880
Junho	17,909	15,223	18,431	22,730
Julho	27,984	24,082	29,608	35,790
Agosto	26,916	21,964	26,782	34,842
Setembro	17,839	19,241	23,810	28,435
Outubro	20,062	14,342	19,992	24,123
Novembro	16,454	11,614	13,574	16,890
Dezembro	9,646	7,188	11,106	14,249
Anual	2,46	1,77	2,66	3,31

Fonte: Autor

Figura 18 – Mudança das vazões mínimas entre o período passado (1976-2005) e os 25 cenários do período futuro (2021-2050).



Fonte: Autor

Em relação as vazões mínimas mensais, de modo geral observa-se uma tendência de aumento na vazão mínima anual, na maioria dos meses apresenta aumento nas vazões mínimas

mensais, destacam-se os meses de setembro e março com aumento percentual de 33,47% e 23,64%, respectivamente. Em quatro meses do ano a tendência foi de diminuição da vazão mínima, com destaque para os meses de novembro e abril que apresentam 17,51% e 5,35%, respectivamente.

Embora a tendência média dos cenários indique um aumento nas vazões mínimas na maioria dos meses do ano, observa-se nas mínimas entre os cenários analisados uma diminuição nas vazões para o período futuro, nos meses de abril e fevereiro esta redução ultrapassa os 30% nas vazões mínimas.

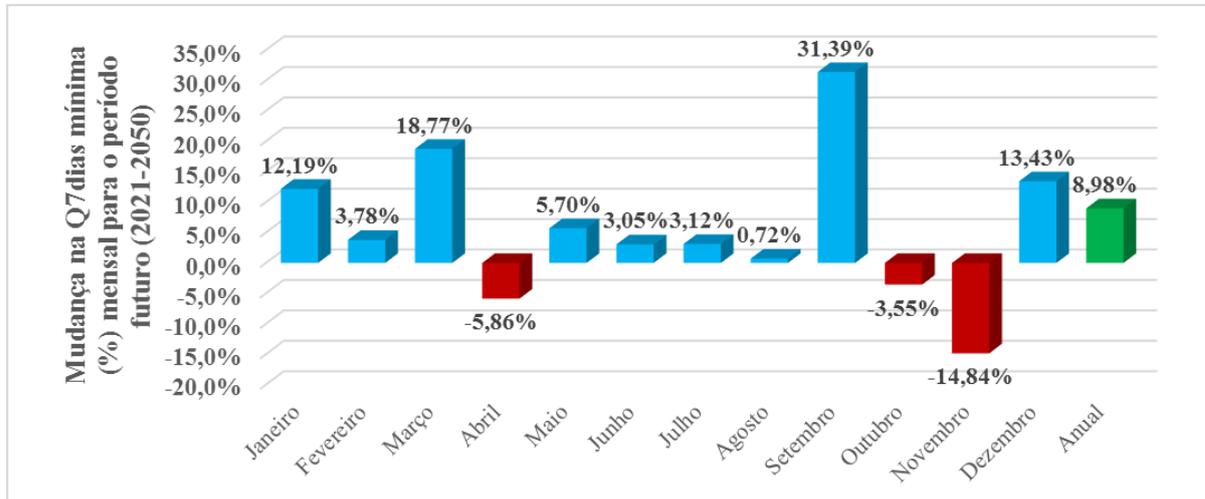
Analisou-se também as $Q_{7\text{dias}}$ (médias das vazões de sete dias consecutivos) mínimas, onde na Tabela 15 foi apresentado os valores das $Q_{7\text{dias}}$ mínimas do período passado (1976-2005) e os valores mínimos, médios e máximos entre os 25 cenários futuros (2021-2050). A Figura 19 mostra o gráfico das mudanças das $Q_{7\text{dias}}$ mínimas do período passado em relação as mínimas entre os cenários futuros.

Tabela 15 – $Q_{7\text{dias}}$ mínima mensal no período de base (1976-2005) e no período futuro (2021-2050), considerando o cenário mínimo, médio e máximo.

Mês	Passado (1976-2005)	$Q_{7\text{dias}}$ Mínima Mensal (m^3/s)		
		Mínima	Média	Máxima
Janeiro	8,929	7,008	10,017	14,814
Fevereiro	10,722	7,543	11,127	14,143
Março	9,481	7,623	11,260	14,128
Abril	12,901	8,726	12,145	19,089
Mai	14,886	11,851	15,735	19,425
Junho	19,776	17,154	20,380	25,012
Julho	30,880	25,918	31,845	37,893
Agosto	28,566	23,715	28,772	36,957
Setembro	19,609	21,311	25,763	30,680
Outubro	22,360	16,085	21,567	25,768
Novembro	17,591	12,954	14,980	18,298
Dezembro	10,969	8,359	12,442	15,702
Anual	3,07	2,14	3,34	4,09

Fonte: Autor

Figura 19 – Mudança das $Q_{7\text{dias}}$ mínimas entre o período passado (1976-2005) e os 25 cenários do período futuro (2021-2050).



Fonte: Autor.

As $Q_{7\text{dias}}$ mínimas, de modo geral, apresentaram tendência de aumento mensal e anual, com as vazões no período de inverno aumentando menos que nos meses correspondentes a estação de verão. Já nos meses de abril, outubro e novembro a tendência é de diminuição das $Q_{7\text{dias}}$ mínimas, com destaque para o mês de novembro com uma diminuição percentual de 14,84%, mês este que também apresentou maior diminuição percentual na precipitação, vazão média e mínima. Setembro foi o mês que apresentou o maior aumento nas $Q_{7\text{dias}}$ mínimas com aumento percentual de 31,39%, destacam-se também os meses de março dezembro e janeiro com 18,77%, 13,43% e 12,19%, respectivamente.

Ao analisar os estados críticos de $Q_{7\text{dias}}$ mínimas quase todos os meses apresentam diminuição da $Q_{7\text{dias}}$ mínimas, destacando-se os meses de abril (32,4%), fevereiro (29,6%) e outubro (28,1%).

6 CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado, da metodologia adotada e dos resultados e discussões obtidos para análise dos possíveis impactos decorrentes das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí para o período futuro de 2021 a 2050. Nota-se que a metodologia se mostrou eficiente, atendendo a proposta de análise e os resultados mostraram-se satisfatórios.

No período futuro (2021-2050) pode-se concluir que haverá um aumento pouco significativo na disponibilidade hídrica. Nos estados mais críticos, relacionados as vazões mínimas e $Q_{7\text{dias}}$, este aumento foi um pouco superior. Porém justamente nos meses que antecedem o verão (outubro e novembro), período com maior demanda hídrica para o cultivo do arroz na bacia do Rio Gravataí, haverá redução na disponibilidade hídrica. Estes meses apresentaram significativa diminuição nas vazões médias, mínimas e $Q_{7\text{dias}}$. Podendo afetar além da produção de agrícola da região, também o abastecimento nas cidades da Região Metropolitana de Porto Alegre.

Quanto a metodologia utilizada no trabalho mostrou-se plenamente satisfatória. O modelo hidrológico IPH-II, utilizado para simulação de vazões através de dados de precipitação e evapotranspiração, é considerado adequado para a proposta do trabalho, por ser um modelo de fácil manuseio e simples entendimento. Embora o modelo tenha apresentado resultados considerados bons para a calibração, obtendo um Nash-Sucliffe de 0,6219, este resultado poderia ser melhor. A escassez de dados hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí,

principalmente de vazão, necessários para a calibração do modelo IPH-II, implicou num melhor resultado para o modelo utilizado para a simulação de vazões. Fato lamentável é a deficiência de dados fluviométricos na região da Bacia do Gravataí e em todo estado, não permitindo se dispor de séries observadas de vazões afluentes nos pontos de interesse do estudo.

A geração de cenários futuro, onde utilizou-se o modelo MAGICC/SCENGEN foi completamente satisfatória, apresentando resultados coerentes com estudos já realizados como o de Marengo (2007) e mais recentemente de Oliveira (2014). Vale salientar que o modelo é baseado no Quarto Relatório Científico (AR4) do IPCC, onde são debatidas as principais medidas para a prevenção de impactos causados pelas mudanças climáticas no mundo.

Quanto ao processo de geração de séries sintéticas estocásticas, tanto o método markoviano com ajuste da função Gamma para as séries de precipitação, quanto o modelo de Thomas-Fiering para as séries de temperatura, obtiveram resultados plenamente satisfatórios. O primeiro apresentou um erro médio na geração séries estocásticas de precipitação de apenas 0,2% e o segundo de apenas 0,89%.

Em relação as precipitações para os 30 anos futuros entre 2021 e 2050, analisados por este trabalho, conclui-se que haverá um aumento nas precipitações médias mensais e anual. Principalmente entre os meses de dezembro e setembro (verão, outono e inverno). Nos meses de outubro e novembro a tendência é de redução nas precipitações. Confirmando estudos já realizados por Marengo (2007) e Oliveira (2014) que indicaram aumento nas precipitações médias para o estado do RS.

De mesmo modo a evapotranspiração também tende a aumentar para o período futuro estudado, principalmente nos meses de verão, onde as temperaturas são mais elevadas. As temperaturas da Bacia do Gravataí assim como a evapotranspiração tendem a aumentar, porém estas apresentam uma porcentagem de aumento em relação ao passado, maior no período de inverno.

A disponibilidade hídrica está atrelada as vazões que apresenta um leve aumento para o período futuro (2021-2050), como já citado no início deste capítulo. Por fim, vale salientar que fato preocupante se dá pela menor disponibilidade hídricas ser nos meses que antecedem o verão, período de maior demanda de água para irrigação de arroz, prejudicando as atividades agrícolas da bacia e o abastecimento das cidades metropolitanas de Porto Alegre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, Katiúcia Nascimento. **Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia do rio Ibicui**. 2011.

ANDREIS, Caren. **ESTUDO DA DINÂMICA HÍDRICA DE UM RESERVATÓRIO AFETADO PELA CONSTRUÇÃO DE UM SEGUNDO RESERVATÓRIO A MONTANTE**. 2004. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.

BACCI, Denise de La Corte; PATACA, Ermelinda Moutinho. **Educação para a água**. Estudos avançados, v. 22, n. 63, p. 211-226, 2008.

BARBOSA, João Paulo Macieira. **Mudanças climáticas e distribuição espacial da precipitação na serra do mar—análise a partir de series históricas de precipitação e sistemas de informação geográfica (SIG)/Climatic changes and space distribution of precipitation in the serra do mar-analysis from historical precipitation series and geographic information system (GIS)**. Caminhos de Geografia, v. 8, n. 22, 2007.

BERTONI, Juan C. e TUCCI, Carlos E.M. - TUCCI, Carlos E.M. **Livro Hidrologia: Ciência e Aplicação** 4º Ed. – Editora UFRGS/ABRH, 20013. Cap. 5 - Precipitação - p. 177-239.

BRAVO, Juan Martín et al. **Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais**. São Paulo: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 3, p. 27-39, 2003.

Departamento de Recursos Hídricos - Secretaria Estadual do Meio Ambiente - DRH/SEMA. 2007. **Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul - Relatório Síntese da Fase A - RSA - Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul**. Junho/2007.

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

FARIAS, J. A. M. **Métodos de geração de vazões mensais e suas influências sobre a curva de garantia versus vazão regularizada em reservatórios do Estado do Ceará**. 2003. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Do Ceará, Departamento De Engenharia Hidráulica E Ambiental.

FREITAS, Marcos Airton de Sousa. Sage: Um pacote computacional para a geração de vazão em rios de regiões semi-áridas. 2011.

GARCEZ, Lucas Nogueira; ALVAREZ, Guillermo Acosta. **Hidrologia. rev. e atual**. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.

GONTIJO, Nebai Tavares. **Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica**. Belo Horizonte: UFMG–Tese de Mestrado, 2007.

HAAN, C. T. 1994. **Statistical Methods in Hydrology**. The Iowa State University Press/Ames, 6ª ed., Iowa.

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Luis Carlos. **Modelos de Markov com estados ocultos na modelagem de séries de vazões anuais**. 2013.

HIDROWEB – Agencia Nacional de águas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>> Acesso em janeiro de 2016.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/>> Acesso em fevereiro de 2016.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2014. Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em outubro. 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 2001a: Climate Change 2001: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge Univ.Press.2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 2001b: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability- Contribution of Working Group 2 to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge Univ. Press. 2001.

Intergovernmental Panel On Climate Change - IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Stockholm, September.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. 2007. Summary for policymakers: contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. This Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris, February.

JURAS, Ilidia da Ascensão Garrido Martins. **Mudança do clima: principais conclusões do 5º Relatório do IPCC.** 2013.

LANNA, Antonio Eduardo - TUCCI, Carlos E.M. **Livro Hidrologia: Ciência e Aplicação** 4º Ed. – Editora UFRGS/ABRH, 2013. Cap. 19 – Gestão de Recursos hídricos - p. 727-766.

LANNA, Antonio Eduardo - TUCCI, Carlos E.M. **Livro Hidrologia: Ciência e Aplicação** 4º Ed. – Editora UFRGS/ABRH, 2013. Cap. 18 – Regularização de Vazões em Reservatórios - p. 703-725.

LIMA, P.R. A.; Leopoldo, P.L. **Quantificação de componentes hidrológica de uma mata ciliar, através do modelo de balanço de massas.** Revista Árvore, Viçosa, v.24, n.3, p. 241-252. 2000.

LOU, Rodrigo Furtado. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MARENGO, Jose Antonio; SOARES, Wagner Rodrigues. **Impacto das Mudanças Climáticas no Brasil e Possíveis Futuros Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório**

do IPCC 2001. Clima e Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA, v. 6, p. 209-233, 2003.

MARENGO, José A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade:** caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. MMA, Ministério do Meio Ambiente, 2006.

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, Antonio José. **Água e mudanças climáticas.** Estudos avançados, v. 22, n. 63, p. 83, 2008.

MARINHO, Filho; G. M., Andrade; R. S., Zukowski, J. C., & Magalhães, L. L. (2013). **MODELOS HIDROLÓGICOS: CONCEITOS E APLICABILIDADES.** Revista de Ciências Ambientais, 6(2), p-35.

MATOS, Jennifer Conceição Carvalho Teixeira de. **Proposição de método para definição de cotas per capita mínimas de água para consumo humano,** 2007.

MONTEITH, J. L. 1965. Evaporation and environment. Symp. Soc. Exp. Biol., XIX, p. 205 - 234.

MOREIRA, Itamar Adilson. **MODELAGEM HIDROLÓGICA CHUVA-VAZÃO COM DADOS DE RADAR E PLUVIÔMETROS.** 2005. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

NICKS, A. D.; Lane, L. J.; Gander, G. A. 1995. Weather Generator - Weather Generator: USDA -Water erosion prediction USDA-ARS. National Soil Erosion Research Laboratory.

NOBRE, Paulo. **Mudanças climáticas e desertificação:** os desafios para o Estado Brasileiro. Desertificação e Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro, p. 25-35, 2011.

OLIVEIRA, GUILHERME GARCIA DE. **ABORDAGEM ESTOCÁSTICA PARA ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A DISPONIBILIDADE E A DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO.** 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PAZ, Adriano Rolin da. **Hidrologia aplicada.** Setembro de 2004.

PENMAN, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London, A193, p. 120-145.

PINTO, L. de S. N.; Holtz, A.C.T. e Martins, J.A. **Hidrologia de Superfície**. Editora Edgard Blücher. 2º Edição. São Paulo. 1973. 179p.

PLANO DE RECURSOS HIDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ, 2012.

PERH-RS. Plano Estadual de Recursos Hídricos Do estado do Rio Grande do Sul, 2007.

PIVETTA, Marcos. Extremos do clima. **Pesquisa FAPESP**, v. 210, p. 16-20, 2013.

RENNÓ, Camilo Daleles; SOARES, João V. **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. X Simpósio brasileiro de geografia física aplicada, Rio de Janeiro, nov., 2003.

RENNO, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para a gestão ambiental. Programa de ciência e tecnologia para gestão de ecossistemas—“Ação, métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Relatório técnico parcial, 2000.

RUBBO, Marta. **Análise do potencial hidrogeológico do aquífero cenozoico da bacia hidrográfica do rio Gravataí-RS**. 2004.

RUBBO, Marta, Marquezan, R. G., Caicedo, N. L., & Leão, M. I. **DIAGNÓSTICO QUALI-QUANTITATIVO DO AQUIFERO FREÁTICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ-RS**. Águas Subterrâneas, n. 1, 2002.

SALOMONI, Saionara Eliane. **Diatomáceas epilíticas indicadoras da qualidade de água na bacia do Rio Gravataí, Rio Grande do Sul, Brasil**. São Carlos, 2004.

SANTOS, Laércio Leal. **MODELOS HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

SEMENOV, M. A.; Brooks, R. J.; Barrow, E. M.; Richardson, C. W. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* 10, p. 95-107.

SILVEIRA, André Luiz Lopes - TUCCI, Carlos E.M. **Livro Hidrologia: Ciência e Aplicação** 4º Ed. – Editora UFRGS/ABRH, 2013. Cap. 4 – Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS. 2014. SNIS - **Série Histórica 2012: Água e Esgotos 1995-2012**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, MCIDADES/SNSA/SNIS: Maio/2014.

SYPERRECK, Vera Lucia Greco et al. **Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná.** 2008.

THOMAS, H. A.; FIERING, M. B. 1962. Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. In: Mass, A. et al., eds. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, p. 459-493.

Thornthwaite, W. C.; Mather, R. J. 1955. The water balance. New Jersey: Laboratory of climatology. 104p.

TUCCI, Carlos E. M.; TUCCI, Carlos EM. **Clima e Recursos Hídricos no Brasil.** ABRH Coleção. BR, 2003.

TUCCI, Carlos EM et al. Hidrologia: ciência e aplicação. **Porto Alegre: Editora da**, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia, Ciência e Aplicação** (Segunda edição). Editora da Universidade (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)/ABRH, Porto Alegre. 2000.

TUCCI, Carlos E.M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos.** Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas–Câmara Temática de Recursos Hídricos, Brasília, 2002.

TUNDISI, José Galizia. **Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções.** Estudos avançados, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRIANDEDADO SUL. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2002. **Identificação das alternativas possíveis e prováveis para regularização das vazões do rio Gravataí.** Porto Alegre: CPRM.

VARELLA, Renato F.; CAMPANA, Néstor A. **Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 121-139, 2000.

WARD, R.C., Robinson, M., **Principles of Hydrology.** 4^a Ed., McGraw-Hill, Berkshire, England, 2000. 450 p.

SILVA, Vitor Souza Viana. **Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo concentrado chuva-vazão.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UNESCO, 1982. **Guia metodologica para la elaboracion del balance hídrico de América del Sur.** Montevideo, pg. 130.

YAPO, P.O.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. (1998). "Multiobjective global optimization for hydrologic models". *Journal of Hydrology* 204, pp. 83-97.