

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

GUILHERME QUEROTTI E SILVA

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES DE ESTIAGEM EM PEQUENAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

São Leopoldo

2019

GUILHERME QUEROTTI E SILVA

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES DE ESTIAGEM EM PEQUENAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Graduado em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Ms. Arthur da Fontoura Tschiedel

São Leopoldo

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Renato e Sirlei, além da minha irmã Renata, pelo exemplo de honestidade e por mostrar que na vida nada é fácil e tudo é possível.

A minha companheira Juliane Renner pelo mais sincero companheirismo e paciência na reta final deste ciclo.

A empresa AgroSIG e seus colaboradores pela contribuição de conhecimento e capacidade de solução adquiridos até este momento.

Ao colega Braian Richter pela amizade e parceira ao longo desta graduação.

Ao professor Arthur Tschiedel pelo compartilhamento do interesse no tema e pela ajuda fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Civil pela grandiosa contribuição na formação acadêmica.

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo avaliar as incertezas associadas à aplicação de técnicas de regionalização de vazões de estiagem em pequenas bacias hidrográficas, a partir do uso de vazões monitoradas em bacias médias e grandes. No Brasil, a disponibilidade de dados hidrométricos é deficitária, principalmente em bacias hidrográficas com pequena área de contribuição. É comum em ferramentas de gestão dos recursos hídricos, como nos processos de outorga e licenciamento de uso de água, a utilização de vazões de referência, como a Q_{90} e Q_{95} , para definição da vazão outorgável. A determinação de variáveis dependentes em pequenas bacias tornou-se um grande desafio devido aos erros produzidos pelos modelos hidrológicos. Para obtenção de dados de vazão em locais onde não existe monitoramento hidrométrico é usual a aplicação do método de regionalização hidrológica. O método tem objetivo de produzir a transferência de dados hidrológicos entre bacias hidrográficas com características semelhantes e setorizadas por regiões em comum. Contudo, ao regionalizar vazões de estiagem de bacias médias e grandes para pequenas bacias hidrográficas, a transferência de dados carrega incertezas na vazão regionalizada devido ao distinto comportamento hidrológico entre bacias de diferentes escalas espaciais. Os resultados demonstram que os menores erros relativos na estimativa da Q_{90} e Q_{95} foram obtidos por meio das equações regionais de regressão simples do tipo potencial. Com uso da variável de área de drenagem foi encontrado erro relativo médio de 91,02%; já com uso da variável somatório do comprimento dos cursos hídricos o erro relativo médio encontrado foi de 105,58%. Não recomenda-se a aplicação de equações regionais de regressão múltipla do tipo linear que utilizem até cinco estações de apoio, sendo essa a metodologia que apresentou maior erro relativo mediano. O método da proporcionalidade linear apresentou bons resultados em determinadas regiões e obteve redução média do erro relativo em 11,09% com a correção conjunta das variáveis de precipitação média anual e coeficiente *Curve Number*. Com este trabalho, reafirma-se a importância da consideração das incertezas associadas à regionalização de vazões de estiagem em pequenas bacias hidrográficas.

Palavras-chave: regionalização hidrológica, vazão de estiagem, pequena bacia hidrográfica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração teórica de uma bacia hidrográfica	17
Figura 2 – Matriz do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos	18
Figura 3 – Regiões hidrográficas do território brasileiro	19
Figura 4 – Fluxograma de utilização da regionalização para vazões mínimas	24
Figura 5 – Precipitação média anual acumulada no Brasil entre 1981 e 2010.....	36
Figura 6 – Exemplificação da separação de duas bacias hidrográficas teóricas	37
Figura 7 – Mapa de Curve Number da Base Hidrográfica Ottocodificada.....	43
Figura 8 – Fluxograma de trabalho	47
Figura 9 – Mapa de localização das estações fluviométricas com registro de vazão e área inferior a 200 km ² no território brasileiro.....	49
Figura 11 – Gráfico de barras de disponibilidade de dados de vazão.....	51
Figura 10 – Esquema característico da metodologia de regionalização proposta.....	54
Figura 11 – Localização da Bacia do Rio Paraopeba.....	61
Figura 12 – Localização da bacia de estudo da estação Fazenda Pasto Grande (40810800) e suas bacias de apoio.	62
Figura 13 – Localização da Bacia do Rio Paracatu.....	63
Figura 14 – Localização da bacia de estudo da estação Rio São Bernardo (42454000) e suas bacias de apoio	64
Figura 15 – Localização da Bacia da Baía de Guanabara	65
Figura 16 – Localização da bacia de estudo da estação Macaé de Cima (59120000) e suas bacias de apoio.....	66
Figura 17 – Localização da Bacia do Rio Ribeira do Iguape.....	67
Figura 18 – Localização da bacia de estudo da estação Montante Da Ponte (81290500) e suas bacias de apoio	68
Figura 19 – Localização da Bacia do Rio Itajaí	69
Figura 20 - Localização da bacia de estudo da estação Baixo Caeté (83101000) e suas bacias de apoio.....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Total de estações pluviométricas e fluviométricas nas regiões hidrográficas do Brasil.....	21
Gráfico 2 – Hidrograma característico de um evento chuvoso	31
Gráfico 3 – Hidrograma característico com período de duração d	33
Gráfico 4 – Hidrograma de duas bacias experimentais na Austrália	40
Gráfico 5 – Exemplos de escalas temporais e espaciais para um ciclo hidrológico ..	44
Gráfico 6 – Erro relativo percentual (%) das vazões de referência pela diferença de área de drenagem (km ² /km ²).....	76
Gráfico 7 – Erro relativo percentual (%) das vazões de referência pela diferença de área de drenagem (km ² /km ²).....	78
Gráfico 8 – Confrontação entre os erros relativos dos métodos de regionalização para vazão de 95% de permanência	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de CN em bacias rurais e urbanas	42
Tabela 2 – Escalas dos processos hidrológicos.....	45
Tabela 3 – Número de estações fluviométricas com dados de vazão e área inferior a 200 km ² por bacia hidrográfica	48
Tabela 4 – Resumo das cinco estações fluviométricas utilizadas no estudo	58
Tabela 5 – Estações fluviométricas de apoio das estações de estudo	58
Tabela 6 – Regiões das estações fluviométricas de estudo.....	60
Tabela 7 – Tamanho da série de vazões das estações de estudo.....	71
Tabela 8 – Vazões de referência reais Q ₉₀ e Q ₉₅ das estações de estudo.....	71
Tabela 9 – Vazões de referência reais Q ₉₀ e Q ₉₅ das estações de apoio.....	72
Tabela 10 – Confrontação entre as áreas de drenagem disponibilizadas no portal <i>HidroWeb</i> e as áreas de drenagem calculadas.....	73
Tabela 11 – Variáveis explicativas das estações fluviométricas de estudo.....	74
Tabela 12 – Q ₉₅ regionalizada por interpolação direta de área de drenagem	75
Tabela 13 – Q ₉₅ regionalizada por interpolação direta de área de drenagem corrigida por precipitação e <i>Curve Number</i>	77
Tabela 14 – Q ₉₅ regionalizada por interpolação direta de área de drenagem corrigida por precipitação e <i>Curve Number</i>	79
Tabela 15 – Coeficientes de determinação para as variáveis explicativas das equações de regressão para vazão de referência Q ₉₀	80
Tabela 16 -- Coeficientes de determinação para as variáveis explicativas das equações de regressão para vazão de referência Q ₉₅	80
Tabela 17 – Resultados da equação regional com variável de área de drenagem ...	81
Tabela 18 – Resultados da equação regional para Q ₉₀ com variável declividade média do rio principal	82
Tabela 19 – Resultados da equação regional para Q ₉₀ com variável comprimentos dos cursos hídricos	82
Tabela 20 – Resultados da equação regional com variável explicativa de área de drenagem e precipitação	84
Tabela 21 - Erro relativo médio dos métodos de regionalização para Q ₉₅	88

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
ONU	Organização das Nações Unidas
RBRH	Revista Brasileira de Recursos Hídricos
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SRTM	Missão Topográfica Radar Shuttle
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>AD</i>	Área de drenagem
<i>CN</i>	<i>Curve Number</i>
<i>d</i>	Duração
<i>Dd</i>	Densidade de drenagem
<i>ER</i>	Erro relativo
<i>Kc</i>	Coeficiente de compacidade
<i>Kf</i>	Fator de forma
<i>L</i>	Comprimento longitudinal do curso hídrico
<i>n</i>	Tamanho da amostra
<i>P</i>	Probabilidade
<i>Pm</i>	Precipitação média anual
<i>Pr</i>	Perímetro da bacia
<i>Li</i>	Comprimento do curso “i”
<i>Si</i>	Declividade do comprimento do curso “i”
<i>Q</i>	Vazão
<i>Qmin</i>	Vazão mínima
<i>Q7,10</i>	Vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de recorrência
<i>Q90</i>	Vazão mínima que não é igualada ou ultrapassada em 90% do tempo
<i>Q95</i>	Vazão mínima que não é igualada ou ultrapassada em 95% do tempo
<i>Qp</i>	Vazão com probabilidade
<i>R²</i>	Coeficiente de determinação
<i>Sm</i>	Declividade média;
<i>X</i>	Variável explicativa
<i>Y</i>	Variável dependente
\bar{y} .	Média da variável dependente
<i>yi</i>	Valor observado da variável dependente
\hat{y}_i	Valor estimado da variável dependente
<i>V(â)</i>	Variância dos erros
<i>Sy</i>	Desvio padrão das variáveis dependentes
<i>Se</i>	Erro padrão de estimativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	17
2.1.1 Disponibilidade Hídrica	20
2.1.2 Regionalização Hidrológica como Ferramenta de Gestão	22
2.2 MÉTODOS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	23
2.2.1 Regressão Estatística	25
2.2.1.1 Regressão Linear	25
2.2.1.2 Regressão Linear Múltipla	26
2.2.1.3 Regressão Não-Linear	26
2.2.2 Indicadores Regionais	26
2.2.3 Testes Estatísticos de Associação entre Variáveis	27
2.2.3.1 Coeficiente de Determinação	27
2.2.3.2 Erro Padrão da Estimativa	29
2.2.3.3 Teste F	29
2.3 VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS	30
2.3.1 Variáveis Dependentes	31
2.3.1.1 Vazões Máximas e Médias	31
2.3.1.2 Vazões Mínimas	32
2.3.2 Variáveis Explicativas	34
2.3.2.1 Variáveis Hidrológicas	35
2.3.2.2 Variáveis Físicas	37
2.3.2.3 Variáveis Geomorfológicas	39
2.4 VARIABILIDADE HIDROLÓGICA	44
2.5 ESTUDOS ANTERIORES	46
3 METODOLOGIA	47
3.1 SELEÇÃO DAS ESTAÇÃO DE ESTUDO E APOIO	48

3.2 DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES DE REFERÊNCIA REAIS PELA CURVA DE PERMANÊNCIA.....	50
3.3 LEVANTAMENTO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS.....	52
3.4 ENSAIOS REALIZADOS.....	54
4 ÁREA DE ESTUDO	58
4.1 RIO PARAOPEBA.....	60
4.2 RIO PARACATU	62
4.3 BAÍA DE GUANABARA.....	64
4.4 RIO RIBEIRA DO IGUAPE.....	66
4.5 RIO ITAJAÍ.....	68
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
5.1 VAZÕES DE REFERÊNCIA REAIS DA CURVA DE PERMANÊNCIA	71
5.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS E COMPARATIVO ENTRE ÁREAS DE DRENAGEM.....	72
5.3 REGIONALIZAÇÃO POR INTERPOLAÇÃO LINEAR.....	75
5.4 REGIONALIZAÇÃO POR EQUAÇÃO REGIONAL	80
5.4.1 Equação Regional por Regressão Não-Linear.....	80
5.4.2 Equação Regional por Regressão Linear Múltipla	83
5.5 COMPARAÇÃO DO ERRO RELATIVO ENTRE OS MÉTODOS.....	86
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90
6.1 CONCLUSÕES	90
6.2 RECOMENDAÇÕES.....	92
REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

A tendência de crescimento populacional no contexto mundial é inferior ao já registrado em décadas passadas. Contudo, a tendência negativa de crescimento da população não impede a progressão do número de habitantes totais no planeta. A consequência disso é o aumento da quantidade de usuários dos recursos hídricos. (ONU, 2017).

Os recursos naturais passam por alterações em relação a sua condição ambiental devido aos impactos ocasionados pelo aumento das condições de vida dos habitantes do planeta. Os impactos são potencializados pela aceleração da demanda de uso dos recursos. Em um ambiente complexo, a gestão dos recursos hídricos torna-se uma ferramenta importante para atenuar os efeitos dos impactos sobre o sistema. Com planejamento e ajustes das práticas de uso das águas, é possível controlar as incertezas associadas à disponibilidade hídrica. (ANA, 2015).

O banco de dados *HidroWeb*, da Agência Nacional de Águas, contém parte das informações dos dados hidrométricos da Rede Hidrométrica Nacional. De acordo com dados atualizados até abril de 2018, existem 1.874 estações fluviométricas com área de drenagem conhecidas. (ANA, 2018a). Destas estações, 549 estações possuem área de drenagem inferior a 200 km², equivalente a 29,29%. Dentre estas estações, em 340 não existem série consolidada de dados diários, apenas com medições alternadas de descarga líquida. Portanto, apenas 209 estações fluviométricas cadastradas, equivalente a 11,15% do total, possuem área de drenagem inferior a 200 km² e série diária de vazões, o que reflete a escassez de dados no território brasileiro.

No gerenciamento dos recursos hídricos é fundamental o conhecimento adequado dos processos hidrológicos, pois a disponibilidade de informações é determinante para o entendimento do sistema. A medição de dados hidrológicos é feita em postos hidrométricos de uma bacia ou determinada seção de rio. Na presença de lacunas espaciais e temporais da rede de monitoramento, recomenda-se a aplicação do método de regionalização de vazões, que nada mais é que um método robusto de preenchimento de dados por meio da transferência de informações entre distintos locais com comportamento hidrológico similar. (TUCCI, 2002).

Em se tratando de vazões mínimas, como as vazões de referência Q_{90} e Q_{95} , a extrapolação de dados de vazão, por meio da aplicação do método de regionalização,

tende a superestimar as vazões regionalizadas, principalmente no trecho inferior da curva de permanência. (OMAR et al., 2003).

De acordo com Tucci (2002), a regionalização de vazões da curva de permanência pode apresentar maiores erros quando utilizada fora da faixa de tamanho das bacias hidrográficas envolvidas na elaboração do método, tanto na faixa superior ou inferior da curva. Portanto, ao regionalizar a vazão para uma bacia com área inferior em relação às áreas de drenagem das bacias utilizadas na equação, a extrapolação do resultado requer atenção.

O objetivo básico para aplicação da regionalização de vazão é a obtenção de dados hidrológicos em locais com escassez ou inexistência de informações. A diretriz deste trabalho é a execução do método de regionalização em bacias hidrográficas com área inferior a 200 km² que possuem monitoramento hidrométrico e, por consequência, série de dados hidrológicos consistentes. Ao aplicar o método em locais com informações consolidadas, determina-se a inexatidão da metodologia. Com isso, são aplicados testes com diferentes tipos de regressão e variáveis explicativas, com o intuito de aproximar a vazão regionalizada da vazão real.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar incertezas associadas à aplicação de técnicas de regionalização de vazões de estiagem em pequenas bacias hidrográficas, a partir do uso de vazões monitoradas em bacias médias e grandes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Selecionar pequenas bacias hidrográficas, com restrição de área de drenagem até 200 km² e com extensa série de dados de vazão;
- b) Selecionar bacias hidrográficas de apoio maiores que 200 km² com extensa série de dados de vazão;
- c) Obter características físicas, hidrológicas e geomorfológicas das bacias selecionadas;

- d) Avaliar o impacto que diferentes variáveis explicativas associadas à regionalização de vazões exercem na estimativa de vazões de estiagem em locais não monitorados;
- e) Comparar os resultados obtidos a partir da aplicação da técnica de regionalização hidrológica com dados monitorados *insitu*.

1.2 JUSTIFICATIVA

A regionalização hidrológica, utilizada na gestão de recursos hídricos para determinação da vazão em bacias hidrográficas sem monitoramento fluviométrico, é uma ferramenta de transferência de dados hidrológicos entre distintas áreas de drenagem. Mesmo em aplicações com uniformidade de condições climatológicas e morfológicas, a proporcionalidade entre áreas de drenagem pode ser uma importante fonte de erro, principalmente em aplicações que englobam bacias de contribuição com diferentes escalas espaciais.

De acordo com Silva Junior et al. (2003), a utilização de regionalização para estimar vazões de referência como a $Q_{7,10}$ (vazão mínima com duração de sete dias e tempo de recorrência de dez anos), pode resultar na superestimação de vazão em bacias com área inferior a 10 km².

Em bacias pequenas as vazões máximas, médias e mínimas tendem a ser menores, proporcionalmente, em comparação com as vazões das grandes e médias bacias de drenagem, devido à tendência de regularização natural do escoamento que ocorrem em bacias de maior tamanho. Portanto, na extrapolação de dados hidrológicos de bacias grandes para bacias pequenas, utilizado em processos de outorga de uso de água, pode ocorrer a superestimação da vazão, com erros maiores que 100% na estimativa de vazão mínimas. (TUCCI, 2002).

Segundo Silveira (1998), as metodologias que são definidas na forma parametrizada, ou seja, por meio de parâmetros, como no caso da regionalização tradicional, provocam erros em dados provenientes do escoamentos de base, referente ao trecho inferior da curva de permanência.

Souza & Santos (2013), em estudo de variabilidade de vazões mínimas na região do rio Negro, verificaram, por meio de resultados obtidos da modelagem com o *software* SWAT, uma considerável variabilidade do comportamentos das vazões de estiagem em bacias hidrográficas com área de drenagem inferior a 100 km². Os

autores justificam a variabilidade das vazões pela evidência dos processos hidrológicos em pequenas bacias, em comparação às medias e grandes bacias hidrográficas nas quais a evidência dos processos é regularizada pelas maiores áreas de drenagem.

Pogian (2016) avaliou a regionalização em pequenas bacias com aplicação do Método Tradicional, Método da Interpolação Linear, Método de Chaves e Método Silveira. O autor concluiu que grande parte dos métodos testados não atendem de maneira satisfatória a estimativa de vazão em micro e pequenas bacias.

De acordo com Gasques et al. (2018), a temática da regionalização de vazões mínimas tem sido objeto de interesse por parte de pesquisadores. O objetivo é encontrar novos métodos de extrapolação das equações e modelos de regionalização com três objetivos principais: redução do risco associado à metodologia, menor quantidade necessária de informações de dados de entrada existente e aplicação de método sem a necessidade de extrapolação das regiões hidrologicamente semelhantes.

Diante deste cenário, é notória e valorosa a aplicação de estudos que buscam reduzir os erros de variáveis dependentes provenientes de modelos hidrológicos consagrados, como as vazões de estiagem.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho está estruturado em seis capítulos. O capítulo inicial de introdução apresenta uma visão global do trabalho, com objetivo geral e específico, assim como a justificativa inerente à pesquisa e delimitação do problema.

O segundo capítulo contém a descrição da revisão bibliográfica, com desenvolvimento das construções teóricas e fundamentação dos itens tratados ao longo do trabalho. O primeiro item da revisão destaca a importância da gestão de recursos hídricos e suas ferramentas de gerenciamento. O segundo item descreve a metodologia da regionalização hidrológica, ressaltando suas vantagens e possíveis fontes de erro. No terceiro item estão descritas as variáveis hidrológicas (dependentes e explicativas), fundamentais na aplicação do método de regionalização. O quarto item refere-se à variabilidade hidrológica, dividido entre as escalas temporais e espaciais, que são essenciais na avaliação e interpretação de qualquer estudo hidrológico.

No terceiro capítulo está estruturada a metodologia, no qual é apresentada as etapas de trabalho para obtenção dos dados e aplicação da técnica de regionalização hidrológica.

O quarto capítulo é referente a definição da área de estudo, com delimitação das bacias da região de interesse e estações de estudo e apoio expressos em figuras de localização, além de breve contexto da região.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos e realiza-se uma análise e interpretação dos dados produzidos por diferentes métodos, na qual compara-se a vazão real com a vazão regionalizada e o erro relativo da metodologia.

Por fim, o sexto capítulo traz a conclusão e considerações finais, além de sugestões para continuação da pesquisa.

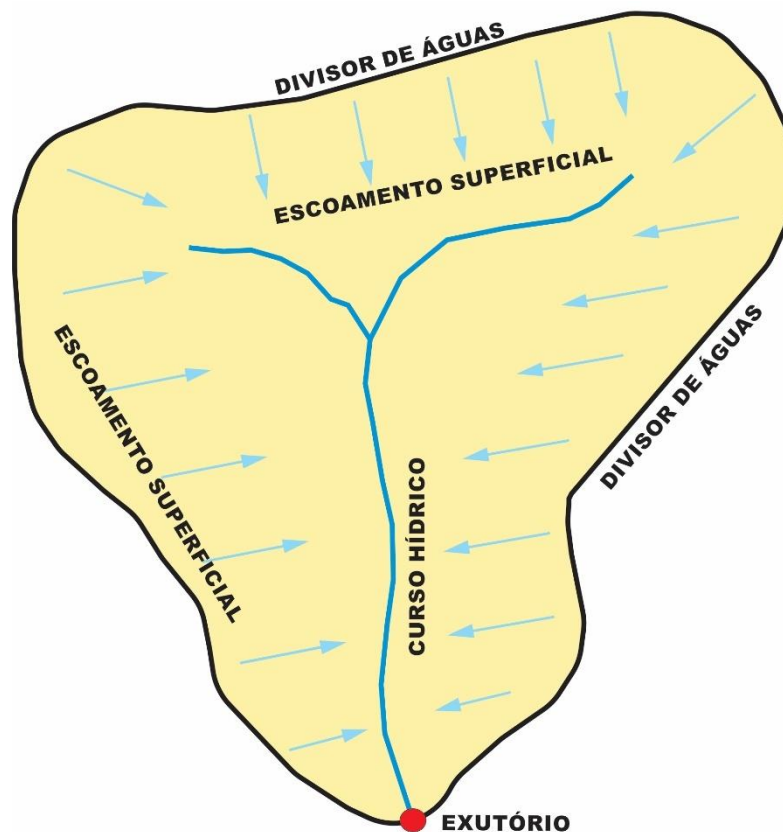
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A Lei número 9.433, de 8 de janeiro de 1997, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos. A política é baseada em fundamentos, objetivos e diretrizes. Um fundamento da gestão dos recursos hídricos é assegurar o uso múltiplo das águas e, nesse caso, a bacia hidrográfica atua como unidade delimitadora para implantação da política e atuação do sistema. (BRASIL, 1997).

A bacia hidrográfica é delimitada pelos divisores de água formados pela topografia de cada região. Os divisores de água separam entre áreas de drenagens distintas o escoamento superficial formado pela incidência de precipitação sobre o local. O volume precipitado que não é infiltrado escoar pela bacia e acumula-se nos cursos hídricos, nos quais segue em direção a jusante para a foz da bacia hidrográfica. (GRIBBIN, 2014).

Figura 1 – Configuração teórica de uma bacia hidrográfica



Fonte: Adaptado de Gribbin (2014)

A gestão hídrica é o sistema organizacional de diversas áreas produtivas pois atua diretamente no setor agrícola, elétrico e público, no qual é feito o gerenciamento dos recursos hídricos com fins de irrigação, energético e de abastecimento. Para quantificar e limitar o uso dos recursos é analisada a concessão do direito de outorga a partir da disponibilidade hídrica superficial. (CPRM, 2013).

Um dos instrumentos da PNRH é a outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos. O objetivo é controlar a quantidade e qualidade dos recursos, com a preservação da multiplicidade de usos. Entre os usos estão: captação de água de superficial ou subterrânea para abastecimento público ou produtivo, lançamento de efluentes tratados ou não nos corpos hídricos, aproveitamento hidroelétrico dos cursos, entre outros. (BRASIL, 1997).

O SINGREH é o sistema, em âmbito nacional, responsável pela gestão dos recursos hídricos. Formado por um conjunto de órgãos e colegiados com interesse no assunto, o sistema possui o objetivo de administrar os conflitos proporcionados pelos diferentes usuários dos recursos. O planejamento, regulação e controle dos usos de água são usados para promover a recuperação de corpos hídricos e executar a cobrança pelo uso do bem público. (ANA, 2013a).

A Figura 2 apresenta a estruturação organizacional do SINGREH nas escalas a nível nacional, estadual e de bacia hidrográfica.

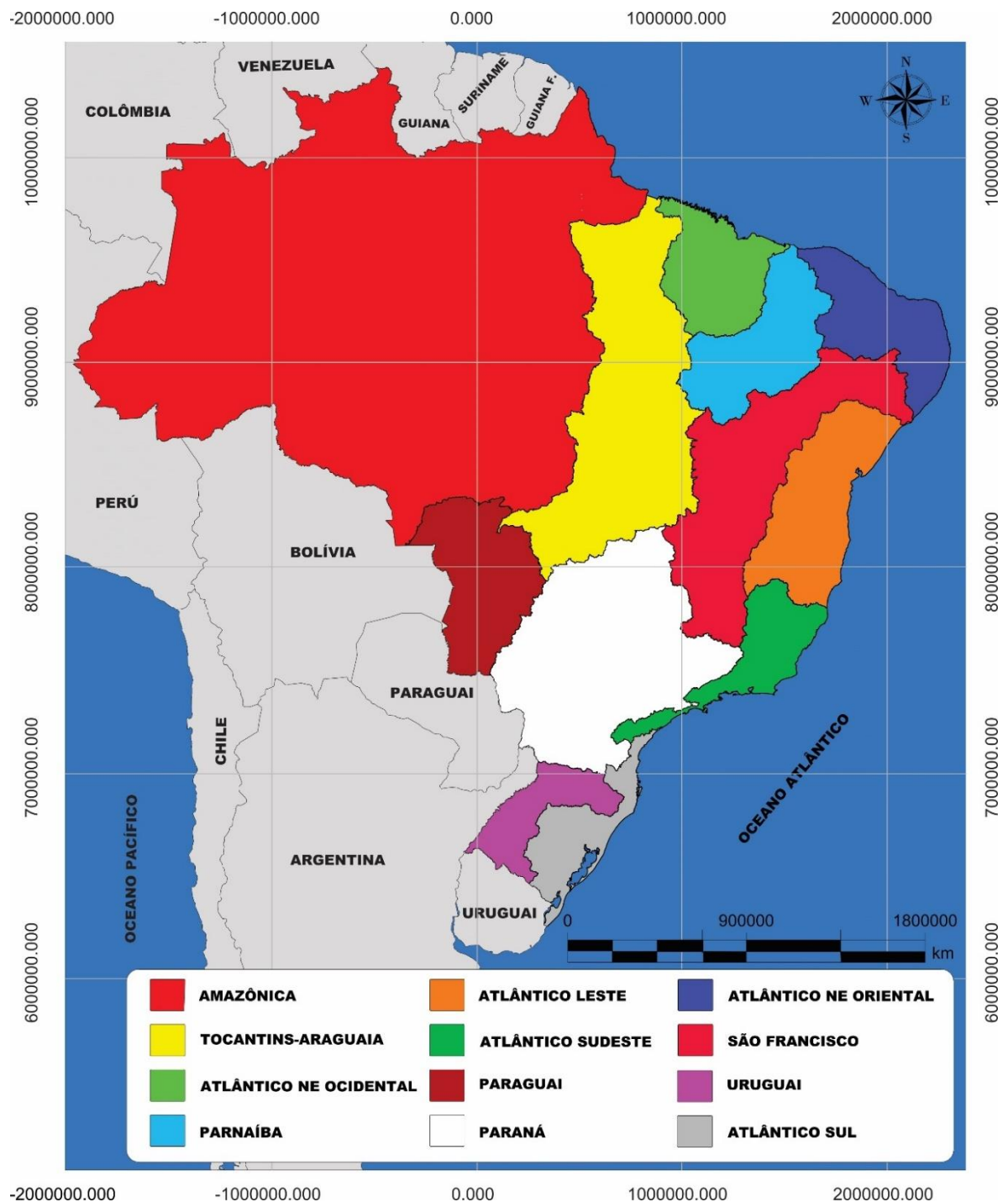
Figura 2 – Matriz do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos



Fonte: Adaptado de ANA (2013)

O Brasil é dividido em 12 regiões hidrográficas, conforme determinação do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) na Resolução nº32 de 2003. O gerenciamento dos recursos hídricos não segue as diretrizes das organizações político administrativa, mas sim as dinâmicas das bacias e regiões hidrográficas, sob responsabilidade da ANA e órgãos gestores da unidade federativa. (ANA, 2018a). A Figura 3 apresenta a distribuição espacial das regiões hidrográficas no Brasil.

Figura 3 – Regiões hidrográficas do território brasileiro



Fonte: Adaptado de ANA (2019)

Segundo Tucci (2009), a sobrevivência e o bem-estar de uma sociedade está diretamente ligado à disponibilidade hídrica do território. A gestão dos recursos hídricos é uma atividade complexa pois o gerente é designado a administrar conflitos de usos, sem deixar de promover o controle e conservação dos recursos, além da interdisciplinaridade com que a questão deve ser tratada.

2.1.1 Disponibilidade Hídrica

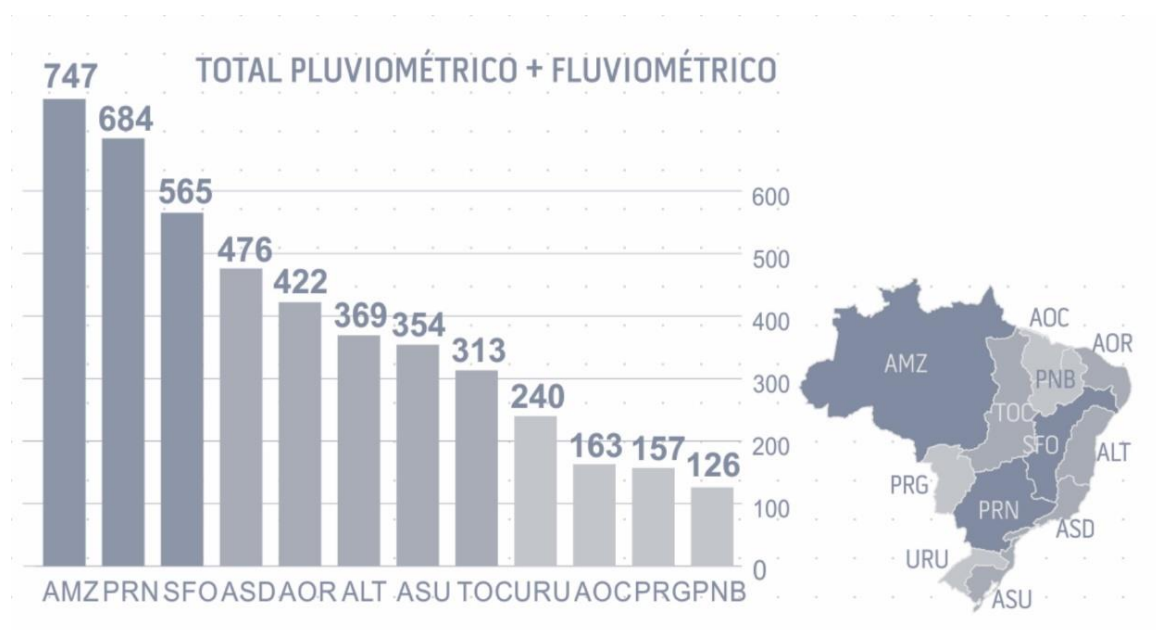
De acordo com dados da UNESCO (2019), dois bilhões de pessoas no mundo vivem em territórios que apresentam estresse hídrico. O estresse hídrico ocorre quando a utilização de água potável, por meio de seus diferentes usos, é maior que a quantidade de recursos renováveis, ou seja, quando a demanda é maior que a disponibilidade.

Em termos globais, cerca de 98% da água doce existente no planeta está na forma subsuperficial, em aquíferos e zonas saturadas do terreno; o restante está dividido em rios e lagos na forma superficial, além de uma pequena parte deste volume estar na forma de vapor na atmosfera. O conhecimento da disponibilidade hídrica e quantificação de água doce no território da bacia hidrográfica é fundamental no desenvolvimento da gestão de recursos hídricos. (CPRM, 2013).

No Brasil, existe a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), sob coordenação da Agência Nacional de Águas e composta por diversos organismos públicos e privados com interesse no monitoramento hidrológico da hidrografia nacional (ANA, 2018a). Os dados publicados pela Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (2018), indicam que até o ano de 2017 cerca de 21 mil estações de monitoramento estavam cadastradas no banco de dados da RHN, sendo 4.610 estações sob gerenciamento das ANA, de acordo com dados atualizados até abril de 2018.

O Gráfico 1 apresenta a distribuição geográfica das estações hidrométricas por região hidrográficas no Brasil.

Gráfico 1 – Total de estações pluviométricas e fluviométricas nas regiões hidrográficas do Brasil



Fonte: ANA (2018)

A Região Amazônica possui o maior número de estações cadastradas, com 747 no total; no outro extremo está a região hidrográfica do Parnaíba com 126 estações. Contudo, é importante considerar a relação entre área de drenagem e número de estações para analisar a capacidade de monitoramento de cada região. A região hidrográfica com maior abrangência de estações em relação a sua área de contribuição é a Atlântico Sudeste, seguido pela região Atlântico Sul. Em contrapartida, a Região Amazônica é a que possui menor índice de proporcionalidade estação/área, apesar do maior número absoluto de estações, sendo a região com maior área de drenagem, com cerca de 3.800.000 km².

Segundo o Relatório de Conjuntura da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018), a disponibilidade hídrica média no Brasil é de 78.600 m³/s na forma superficial, ou seja, cerca de 30% da vazão média que escoar pelo território nacional, que é de 260.000 m³/s. Porém, o desequilíbrio hídrico ocorre porque 80% da vazão disponível encontra-se na região amazônica, onde vive a menor concentração de consumidores dos recursos.

De acordo com PINTO et al. (1976), o aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis em um país está diretamente relacionado com a capacidade de observação e conservação dos postos de monitoramento. Um confiável estudo

hidrológico carece de uma boa série ininterrupta de dados e deve basear-se na relação causa e efeito dos fenômenos da natureza.

Uma importante ferramenta de controle da disponibilidade hídrica e pertencente ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é o banco de dados HidroWeb, gerenciado pela ANA. O sistema armazena dados de vazão, pluviometria, sedimentos, entre outros, coletados pela RHN. Atualmente, a Rede Hidrometeorológica conta com 4.641 pontos de monitoramento no território nacional, divididos em 1.874 postos fluviométricos e 2.767 postos pluviométricos.

2.1.2 Regionalização Hidrológica como Ferramenta de Gestão

O conhecimento da disponibilidade hídrica é essencial no auxílio à gestão de recursos hídricos, pois dados de vazão são necessários para o suporte aos mecanismos de gestão hídrica. Porém, em muitas regiões esses dados são escassos ou inexistentes. Na falta do monitoramento hidrométrico, é conveniente a aplicação do método de regionalização hidrológica em auxílio às ferramentas de gestão.

Com o alto custo de implantação, implementação e manutenção de postos hidrométricos, a regionalização de vazão surge como uma ferramenta alternativa de exploração das informações hidrológicas, tornando possível a obtenção de dados de vazão em locais onde não existe ponto de monitoramento. A regionalização pode ser utilizada para estimar as curvas de probabilidade de vazões por meio de funções estatísticas. Também é possível obter parâmetros dos modelos hidrológicos e as variáveis relacionadas com funções específicas, como as curvas de infiltração, permanência e regularização. (TUCCI, 2009a).

De acordo com Tucci (2002), o conhecimento do comportamento das variáveis hidrológicas ao longo do tempo é um dos maiores desafios dentro da hidrologia. O bom aproveitamento da técnica matemática de regionalização é dependente do melhor entendimento do comportamento estocástico das variáveis, devido ao seu comportamento aleatório. Nenhum modelo ou técnica possui a capacidade de criar informações.

2.2 MÉTODOS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Tucci (2002) descreve quatro diferentes aplicações da metodologia de regionalização hidrológica:

- Indicadores regionais: utilizado para rápida estimativa do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, é definido por meio da proporcionalidade de variáveis. Exemplo: vazão específica.
- Funções: na posse de dados hidrológicos confiáveis e com representatividade temporal, é possível determinar uma função hidrológica. Exemplo: curva de permanência.
- Parâmetros: relação entre parâmetros de uma função, geralmente pela relação entre as características físicas de uma área de drenagem, com base em dados existentes. Exemplo: coeficiente de compacidade.
- Variáveis: determinação de variáveis por meio das relações entre dados em local específico. Exemplo: precipitação média anual.

Em estudos de regionalização de vazão de referência, como a Q_{90} e Q_{95} , recomenda-se adotar a seguinte sequência de etapas (TUCCI, 2002):

- a) Elaboração da curva de permanência para o posto de medições de vazão de interesse;
- b) Determinação da vazão de 95% de permanência (Q_{95});
- c) Verificação da faixa da curva de permanência pelas vazões de alguns postos que serão regionalizados.
- d) Estabelecimento da equação de regressão Q_{95} com características físicas, conforme a Equação 1.

$$Q_p = F (A_d, P_m, D_d, \dots) \quad (1)$$

Onde:

Q_p = vazão com probabilidade p (m^3/s);

A_d, P_m, D_d = variáveis explicativas.

- e) Determinação da equação empírica de cada região, semelhante a Equação 2.

$$Q = \exp(aP + b) \quad (2)$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

P = probabilidade (entre 0 e 1);

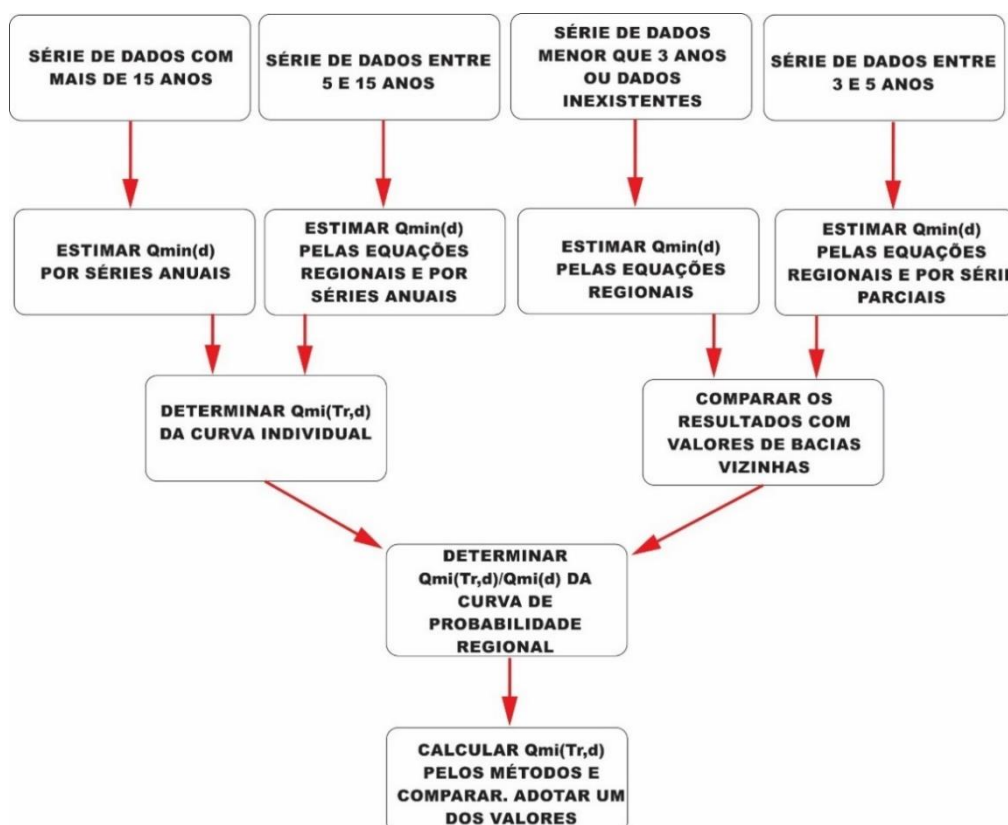
a e b = coeficientes estimados por quadrados mínimos ou valores característicos.

- f) Verificação dos resultados obtidos pelo método com alguns postos amostrados.

Utiliza-se a metodologia descrita por Tucci (2002) para uma série de dados de pelo menos cinco anos. Contudo, se o período for menor que cinco anos mas representativo em termos hidrológicos, a aplicação do método pode ser aceitável. Além da quantidade, deve-se avaliar qualitativamente a série de dados, pois o trecho inferior da curva-chave pode incorporar erros significativos, principalmente em pequenas bacias devido a constante mudança do leito do curso d'água.

Tucci (2002) apresenta um fluxograma indicativo para aplicação da metodologia de regionalização de vazões mínimas (Figura 4).

Figura 4 – Fluxograma de utilização da regionalização para vazões mínimas



Fonte: Adaptado de Tucci (2002)

Para Tucci (2002), o seguimento da metodologia depende do tamanho da série de dados, em anos. Quando a série for maior que 15 anos, estima-se a vazão somente por séries anuais. No caso da série de dados menor que 15 anos, recomenda-se o uso de equação regionais de regressão.

As séries de dados podem ser parciais ou anuais. As séries parciais são compostas por dados que independem do ano de ocorrência e da quantidade de registros em cada ano, pois são ordenadas pela magnitude do evento. Já as séries anuais são os registros únicos de cada ano hidrológico. (NAGHETTINI; PINTO, 2007a).

2.2.1 Regressão Estatística

De acordo com Tucci (2009), a equação de regressão determina a variável dependente (vazão) pela relação com as variáveis explicativas (características hidrológicas, físicas, geomorfológicas ou geológicas). Para escolha das variáveis explicativas, procura-se estabelecer a melhor combinação entre as variáveis e, geralmente, no método de regionalização hidrológica, o número de variáveis explicativas não é alto.

2.2.1.1 Regressão Linear

Na regressão linear é considerada uma relação funcional entre variável explicativa e variável dependente. A função procura explicar a variabilidade entre variáveis e uma parcela da variação é atribuída ao acaso. Nesse caso, a regressão faz a média da relação entre as variáveis. Ao plotar os dados é possível estimar a forma da regressão no diagrama de dispersão. (NAGHETTINI; PINTO, 2007b).

Ao admitir o modelo como uma reta teórica, utiliza-se a Equação 3.

$$Y = \alpha + \beta X + e \quad (3)$$

Onde:

Y = variável dependente;

X = variável explicativa;

α e β = coeficientes do modelo;

e = erro.

2.2.1.2 Regressão Linear Múltipla

Na regressão linear múltipla considera-se um relacionamento funcional entre a variável explicativa Y e duas ou mais variáveis dependentes X . Utiliza-se a Equação 4 como um modelo geral, no qual a variável explicativa varia linearmente com a variável dependente. (NAGHETTINI; PINTO, 2007b).

$$Y = \beta_1.X_1 + \beta_2.X_2 + \dots + \beta_p.X_p \quad (4)$$

Onde:

Y = variável dependente;

X_1, X_2, \dots, X_p = variáveis explicativas;

B_1, B_2, \dots, B_p = coeficientes do modelo.

2.2.1.3 Regressão Não-Linear

No caso de a equação de regressão ser do tipo não-linear, é permitido a linearização por meio da transformação da função matemática em uso. De acordo com Tucci (2002), uma função muito utilizada em cálculos hidrológicos possui a característica da Equação 5.

$$Y = C.x_1^{a_1}.x_2^{a_2} \dots x_n^{a_n} \quad (5)$$

Onde:

Y = variável dependente;

C, a_1, a_2, \dots, a_n = parâmetros da equação.

A transformação da regressão não-linear para linear em equação do tipo potencial se dá por logarítmicos em ambos os lados da equação, conforme a Equação 6.

$$\ln Y = \ln C + a_1.\ln x_1 + a_2.\ln x_2 + \dots + a_n.\ln x_n \quad (6)$$

2.2.2 Indicadores Regionais

De acordo com Tucci (2002), os indicadores regionais servem como estimativa preliminar dos dados, no qual verifica-se, dentro de uma região específica de estudo, os resultados pela ordem de grandeza das variáveis explicativas. Um dos principais

indicadores regionais é a vazão específica, que relaciona a vazão com a área de drenagem, conforme a Equação 7.

$$Qe = \frac{Qm}{AD} \quad (7)$$

Onde:

Qe = vazão específica média (l/s.km²);

Qm = vazão média de longo período (l/s);

AD = área de drenagem (km²).

Quando a vazão de referência é definida pela curva de permanência, trabalha-se com a relação da Equação 8.

$$rcp_{95} = \frac{Q_{95}}{Qm} \quad (8)$$

Onde:

rcp_{95} = relação entre a vazão de 95% da curva de permanência e a vazão média;

Q_{95} = vazão de 95% da curva de permanência (m³s);

Qm = vazão média de longo período (m³s).

2.2.3 Testes Estatísticos de Associação entre Variáveis

A correlação estatística representa a tendência que as variáveis possuem ao serem correlacionadas, ou seja, a semelhança entre as variáveis comparadas. Nem sempre a correlação está relacionada com a relação causa e efeito, pois a medida de correlação não indica uma evidência necessária da relação entre variáveis. As medidas genéricas de correlação variam entre -1 e +1 e são adimensionais. (NAGHETTINI; PINTO, 2007b).

2.2.3.1 Coeficiente de Determinação

Segundo Tucci (2002), o coeficiente de determinação pode ser utilizado como uma medida que representa o quanto o modelo explica o resultado e seus erros significativos, pois determina a variação total da variável dependente (Equação 9).

$$R^2 = \frac{\delta^2 y - \delta^2 y.x}{\delta^2 y} \quad (9)$$

Onde:

R^2 = coeficiente de determinação;

$\delta^2 y$ = variância em y ;

$\delta^2 y.x$ = variância residual.

De acordo com Naghettini & Pinto (2007b), o coeficiente de determinação pode ser calculado pela relação entre do somatório dos quadrados da regressão pelo somatório total dos quadrados, conforme Equação 10.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

Onde:

R^2 = coeficiente de determinação.

y_i = valor observado da variável dependente;

\hat{y}_i = valor estimado da variável dependente;

\bar{y} = média da variável dependente.

Para equações de regressão não lineares, aplica-se o coeficiente de determinação não tendencioso conforme Equação 11, Equação 12 e Equação 13.

$$R^2 = 1 - \frac{S^2}{S_y^2} \quad (11)$$

$$S^2 = \frac{\sum (\ln.Qoi - \ln.Qci)^2}{n-p-1} \quad (12)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum (\ln.Qoi - \overline{\ln.Qci})^2}{n-1} \quad (13)$$

Onde:

R^2 = coeficiente de determinação;

Qoi = vazão observada;

Qci = vazão calculada pelo modelo;

n = tamanho da amostra;

p = número de variáveis dependentes.

O coeficiente de determinação verifica o quanto a reta de regressão elucida os dados amostrados e determina a sua variabilidade. O coeficiente é positivo e varia de 0 a 1 ($0 \leq R^2 \leq 1$), quanto mais próximo de 1 o coeficiente atinge, maior a proporção

da variância e a conseqüente representatividade do modelo. (PINTO; NAGHETTINI, 2007).

2.2.3.2 Erro Padrão da Estimativa

Os processos hidrológicos não são lineares. Devido a isso, é improvável a ocorrência de um modelo de regressão no qual os pontos amostrados ocupem uma reta ajustada. Nesse caso utiliza-se o erro padrão da estimativa para medir a variabilidade dos pontos que se localizam acima ou abaixo da reta de regressão. (NAGHETTINI; PINTO, 2007b).

Inicialmente, calcula-se a variância dos erros, que indica a distância do erro em relação ao valor esperado, conforme Equação 14.

$$V(\hat{a}) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} \quad (14)$$

Onde:

$V(\hat{a})$ = variância dos erros;

y_i = valor observado da variável dependente;

\hat{y}_i = valor estimado da variável dependente;

n = tamanho da amostra.

O erro padrão da estimativa (Se) é o produto da raiz quadrada da variância dos erros, conforme Equação 15.

$$Se = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (15)$$

De acordo com Pinto & Naghettini (2007), o desvio padrão das variáveis dependentes (Sy) deve ser superior ao erro padrão (Se) de estimativa ($0 \leq Se \leq Sy$). O desvio padrão das variáveis dependentes pode ser calculado pela Equação 16.

$$Sy = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (16)$$

2.2.3.3 Teste F

De acordo com Tucci (2009b), o modelo de regressão a ser adotado depende de resultados estatísticos. Entre algumas estatísticas, adota-se teste F de forma

fundamental para verificação da correlação entre a equação e as variáveis explicativas.

Segundo Faria (2011), o teste F serve para a comparação das variâncias e utiliza o método da soma dos quadrados. Na equação de regressão o F é calculado pela razão da soma dos quadrados médios da regressão pela soma dos quadrados dos resíduos, conforme Equação 17.

$$F = \frac{\sum QMR}{\sum QME} \quad (17)$$

Onde:

F = variância dos erros;

$\sum QMR$ = quadrados médios da regressão;

$\sum QME$ = quadrados médios residual.

Para a aplicação do teste de significância, compara-se o valor de F calculado com valores tabelados de Fisher-Snedecor que dependem do nível de significância e do grau de liberdade da regressão. No caso do F calculado for maior que o F tabelado, a hipótese é rejeitada e os coeficientes da equação são nulos, portanto, a regressão é aceita. (TUCCI, 2002).

2.3 VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

As variáveis hidrológicas possuem aleatoriedade de comportamento na natureza devido aos seguintes fatores: variabilidade temporal e espacial, interferência dos efeitos de escala e uso e ocupação do solo. Esses fatores interferem na complexidade da análise destas variáveis. Devido a isso, é fundamental o monitoramento a longo prazo para uma melhor determinação das probabilidades de ocorrência de determinados eventos ao longo de uma série histórica. (POMPÊO et al., 2015).

O Quadro 1 exemplifica as condições básicas entre a variável dependente e as variáveis explicativas.

Quadro 1 – Exemplo de variáveis dependentes e explicativas no método de regionalização de vazão

Variável Dependente	Variáveis Explicativas
Vazão média	Área da bacia e precipitação
Vazão média de cheia	Área da bacia, precipitação, declividade e comprimento do rio principal
Vazão mínima	Área da bacia e densidade de drenagem
Tempo de concentração	Comprimento, declividade e área da bacia

Fonte: Tucci (2002)

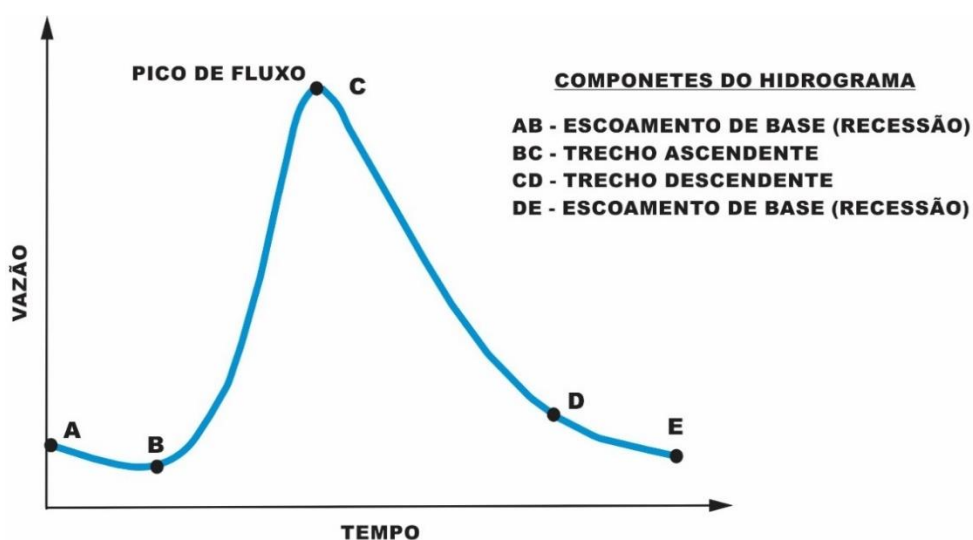
De acordo com Tucci (2002), não se pode determinar inicialmente o tipo e a quantidade de variáveis explicativas usadas na determinação da variável dependente. Nesse caso, procura-se combinar as diferentes variáveis em busca de estimar a vazão com menor erro e número de variáveis possíveis.

2.3.1 Variáveis Dependentes

2.3.1.1 Vazões Máximas e Médias

A vazão máxima é o registro da maior vazão ocorrente em dada seção transversal do curso hídrico em determinado período. A vazão máxima condiz com a inundação e geram enchentes e erosão das margens, no qual o escoamento passa do leito menor para o leito maior do rio. A vazão média de cheia é a média das vazões máximas em cada ano. (TUCCI, 2002). O Gráfico 2 mostra um hidrograma proveniente de tempestades pluviométricas ou de derretimento de neve combinados.

Gráfico 2 – Hidrograma característico de um evento chuvoso



Fonte: Adaptado de Chow (1988)

Antes do início da precipitação, o fluxo de base diminui gradualmente (segmento AB). O escoamento superficial começa em B, com o passar do tempo e o andamento do trecho ascendente o hidrograma atinge o pico de fluxo em C. Após atingir o pico de fluxo, o hidrograma segue o trecho descendente e termina no ponto D. O segmento DE segue quando a recessão normal do fluxo de base recomeça. (CHOW, 1988).

A vazão média é um importante parâmetro para determinação da disponibilidade hídrica, pois é essa variável que determina a regularização de determinado curso hídrico. Geralmente representada em escala diária, mensal ou anual, a vazão média diária é correspondente aos valores médios de vazão em horas ou minutos de determinada seção transversal. A vazão média mensal é o valor das vazões médias diárias de determinado mês em diferentes anos. A representação média dos valores de médias diárias, configura a vazão média anual. (POMPÊO et al., 2015).

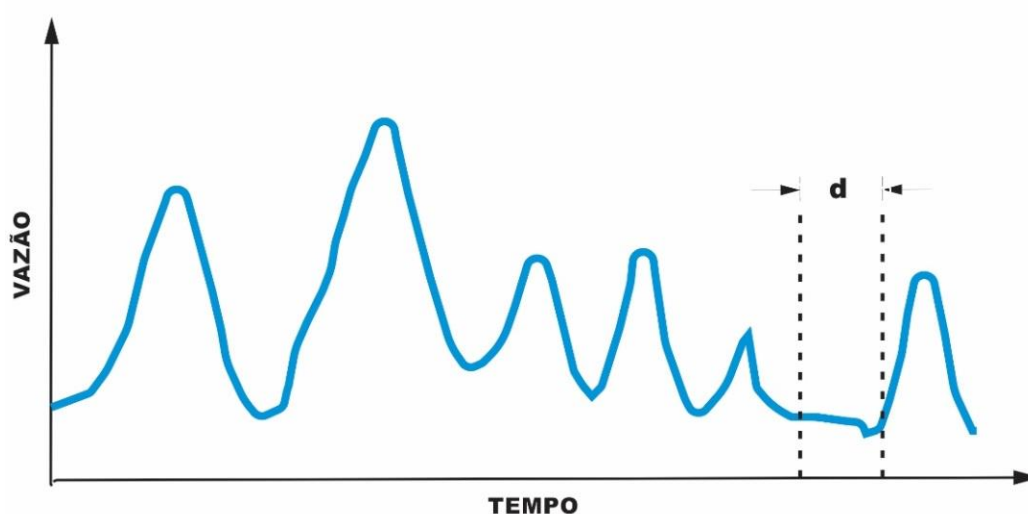
De acordo com Tucci (2002), a vazão média deve ser regionalizada de acordo com duas etapas fundamentais, devido ao arranjo estatístico desta variável. A primeira etapa refere-se à curva adimensional de probabilidades, no qual é analisado se a vazão média anual de um ano qualquer de determinada série histórica possui probabilidade de ser maior ou igual a determinado valor. A segunda etapa faz referência à equação de regressão entre a vazão média anual e a vazão média de longo período, no qual são relacionadas as variáveis explicativas que tragam as variabilidades espaciais e temporais do local de estudo.

2.3.1.2 Vazões Mínimas

O conhecimento das vazões mínimas, fundamental para efetuação desse estudo, é indicado para estudos de qualidade de água, no qual são avaliadas as condições de autodepuração do recurso hídrico, com determinado período de retorno, pois é reconhecido que a concentração do recurso é variável no tempo e no espaço, sob influência direta da vazão. A vazão mínima também é utilizada no cálculo de demanda para abastecimento público, aproveitamento de energia elétrica e irrigação. Nesses estudos são realizadas verificações com o intuito de especificar a menor vazão em determinado tempo de recorrência na seção transversal de interesse, com captação a fio d'água. (TOMAZ, 2012).

De acordo com Tucci (2002), as vazões mínimas, também conhecidas como vazões de estiagem, podem ser desenvolvidas pela curva de depleção, curva de duração ou curva de frequência. Dois fatores definem a vazão mínima: a quantidade de água e a duração “d” (Gráfico 3). A análise da duração é importante pois indica uma sequência de vazões baixas, como é o caso de $Q_{7,10}$, que é a vazão de sete dias consecutivos de duração com tempo de retorno de 10 anos e da Q_{95} que é vazão que não é igualada ou ultrapassada em 95% do tempo.

Gráfico 3 – Hidrograma característico com período de duração d



Fonte: Adaptado de Tucci (2002)

A depleção retrata o escoamento superficial após um evento de precipitação. Em bacias hidrográficas de pequeno porte o coeficiente de depleção possui grande influência pois a resposta em bacias desta escala costuma ocorrer rapidamente. Em período chuvoso, o escoamento superficial tende a aumentar rapidamente, assim como os períodos de estiagem tendem a permanecer por maior tempo ao longo do fluviograma. (SILVEIRA et al., 1998).

A curva de permanência, também denominada curva de duração, faz a relação entre a vazão e o tempo em que essa vazão será igualada ou superada, expresso em porcentagem. A curva, que faz relação entre frequência e magnitude, propicia aos gestores hídricos informações da disponibilidade hídrica no curso hídrico de estudo, além sintetizar o regime hídrico e comportamento das bacias hidrográficas, influenciadas pelas variáveis explicativas. (PIOL, 2017).

De acordo com Tucci (2002), a série de dados da curva de permanência é geralmente em intervalo diário, com série de pelo menos cinco anos de dados, preferencialmente sem falhas e erros, com o objetivo de conhecer a permanência para cada valor de vazão. Para o estabelecimento da curva de permanência são definidas três etapas fundamentais:

- a) Definir a variável dependente, nesse caso a vazão;
- b) Determinar o intervalo de tempo da variável dependente;
- c) Estabelecer o período representativo dos dados.

Silveira et al. (1998) realizaram um levantamento a nível internacional de trabalhos que objetivaram estimar a curva de permanência por meio do método de regionalização hidrológica. De maneira geral, os trabalhos pesquisados apresentaram bons resultados em diferentes locais do planeta, com aplicação em bacias hidrográficas de 7,0 a 700,0 km². Porém, os autores ressaltam que a realidade do monitoramento hidrométrico brasileiro, com foco em bacias com área superior a 500 km², prejudica a aplicação do método em pequenas bacias hidrográficas, principalmente devido a variabilidade temporal e espacial entre bacias de diferentes portes na transformação chuva-vazão.

De acordo com a Resolução nº 357/2005 do CONAMA, a informação básica para auxílio ao processo de gestão dos recursos hídricos são as vazões de referência. (BRASIL, 1997). O SISNAMA e o SINGRH fazem uso da vazão nos instrumentos de gestão para garantir o múltiplo uso da água. As classes de enquadramento dos recursos são estabelecidas por meio de valores máximos de parâmetros de qualidade de água nas condições das vazões de referência, assim como as metas obrigatórias e finas são estabelecidas a partir desta variável.

2.3.2 Variáveis Explicativas

As variáveis explicativas são utilizadas na metodologia de regionalização para estimar o valor da variável dependente. A determinação destas variáveis deve ocorrer de forma fácil entre os usuários do método, com forte correlação entre as variáveis escolhidas. Nesse caso, evita-se a utilização de métodos diretos que carregam incertezas ao aplicar as variáveis (TUCCI, 2002).

Entre as variáveis explicativas mais utilizadas temos a variável hidrológica de precipitação, a variável dependente da formação geológica da região e as seguintes

variáveis físicas e geomorfológicas: área de drenagem, coeficiente de compacidade, comprimento e declividade do rio principal, fator de forma e tipo, uso e ocupação do solo.

2.3.2.1 Variáveis Hidrológicas

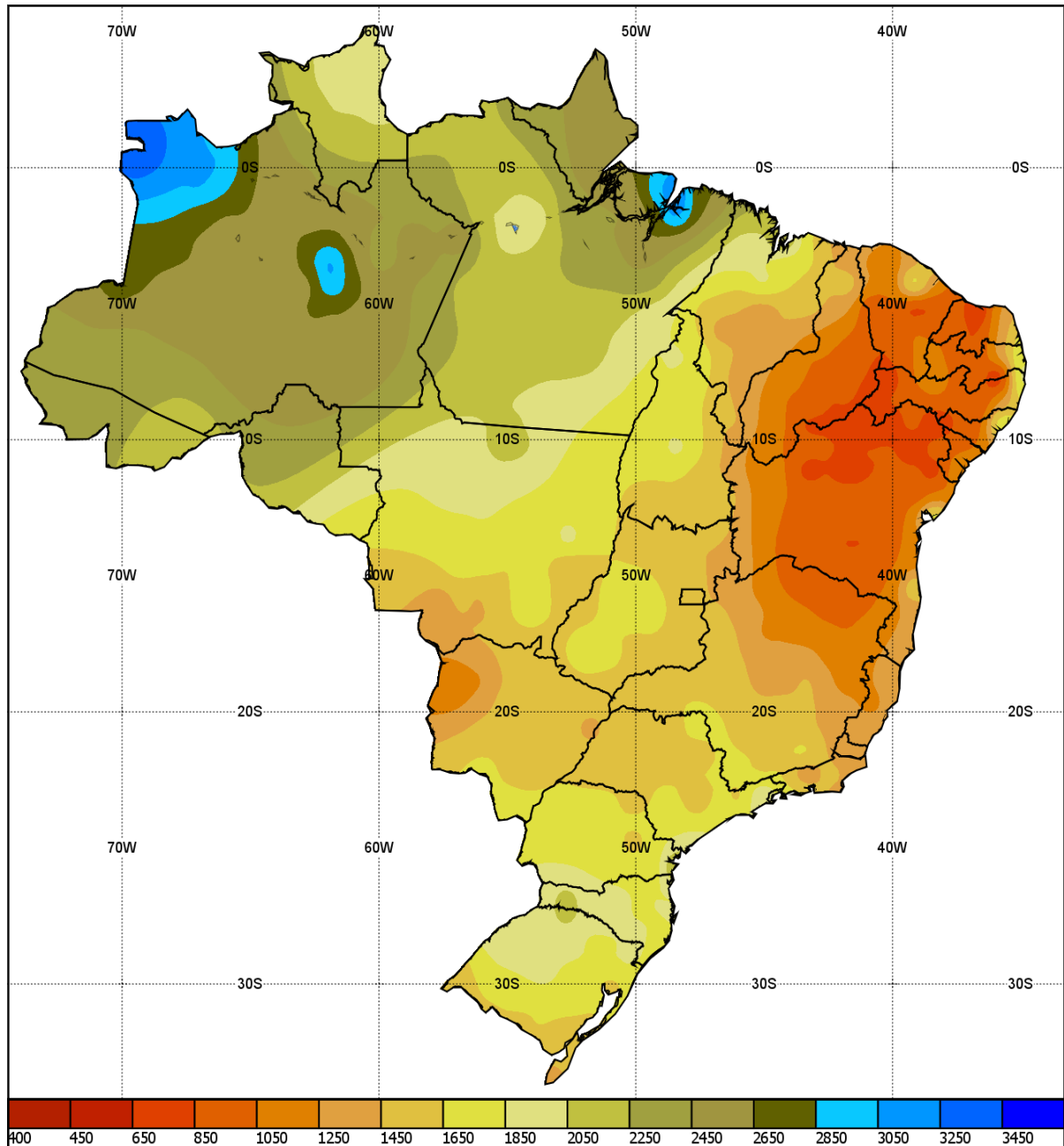
Pinto et al. (1976) descrevem a precipitação como a porção de água existente na atmosfera sob forma de vapor que precipita e atinge a superfície da Terra em forma de chuva, granizo, geada, orvalho, neblina ou neve. Equipamentos como o pluviômetro e pluviógrafo medem a quantidade de precipitação, geralmente expressa em milímetro, pela altura de lâmina d'água sob determinada superfície.

As grandezas que caracterizam a precipitação são: intensidade, duração e frequência. A intensidade faz ligação com a variabilidade temporal, ou seja, é volume precipitado pela unidade de tempo. A duração é o período no qual ocorre o evento de precipitação. A frequência é o inverso do tempo de recorrência, que é a probabilidade que determinado evento tem de ser igualado ou superado. (TUCCI, 2009a).

Segundo Tucci (1998), em muitas vezes a rede de monitoramento pluviométrico não abrange a área de estudo em quantidade suficiente para estimar a distribuição temporal e espacial dos eventos de chuva, principalmente em regiões com predominância de precipitações convectivas e orográfica. Nesse caso, são aplicados métodos para estimar a precipitação em locais com dados deficitários. Os métodos tradicionais são: método de regressão geoestatístico Kriging, método de Isoietas e método de Thiessen.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) elaborou um mapa com as normais climatológicas do Brasil para precipitação acumulada, em milímetros, para todo território nacional, com dados de 414 estações pluviométricas durante 30 anos de observação (1981-2010), como pode ser visualizado na Figura 5. No mapa, as manchas com tom em azul possuem as maiores precipitações e as manchas com tom em vermelho representam as menores precipitações.

Figura 5 – Precipitação média anual acumulada no Brasil entre 1981 e 2010



Fonte: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>

Verifica-se no mapa a grande variabilidade de precipitação no Brasil. Na região da Amazônia constam precipitações médias superiores a 3.000 milímetros por ano. Em contrapartida, em determinados locais da região do Cerrado, a média anual é de cerca de 500 milímetros.

Outra variável hidrológica a ser considerada são as águas subterrâneas, pois formam junto as águas superficiais um único sistema hídrico. Estudos hidrogeológicos indicam que os aquíferos interferem diretamente no fluxo de base, principalmente em pequenas bacias hidrográficas. O fluxo de base de um curso hídrico acontece após

um período de seca quando as águas subterrâneas fazem a descarga para o escoamento na superfície. (COSTA; BACELLAR, 2010).

2.3.2.2 Variáveis Físicas

As variáveis físicas e geomorfológicas são usualmente utilizadas como variável explicativa na formulação da técnica de regionalização. Atualmente, essas variáveis são facilmente medidas por meio das avançadas técnicas de geoprocessamento existentes.

A área de drenagem, de acordo com Villela & Mattos (1975), é uma variável explicativa utilizada para determinação de características físicas da bacia, como o coeficiente de compacidade e fator de forma. Grandes e médias bacias possuem uma forma característica, com geometria no formato de leque; pequenas bacias apresentam diversidade geométrica, dependente da geologia da região.

Segundo Porto et al., (1999), a área da bacia hidrográfica pode ser determinada por técnicas de geoprocessamento, e a partir de um modelo digital do terreno, calculada por *softwares* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Uma bacia hidrográfica pode estar inserida espacialmente em outra bacia hidrográfica, conforme a ilustração da Figura 6.

Figura 6 – Exemplificação da separação de duas bacias hidrográficas teóricas



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 6, a Bacia 02 faz parte fisicamente da Bacia 01, em seu trecho montante. Na confluência do Rio A com o Rio B é formado o Rio C e é o ponto exutório que delimita a Bacia 02. Por consequência, a área de drenagem da Bacia 02 é menor que a Bacia 01, dentro do mesmo contexto hidrológico.

De acordo com Tucci (2002) o comprimento do rio principal é a drenagem produzida por um rio principal, definido com o curso hídrico que drena a maior porção de área de escoamento superficial. Assim como a variável de área de drenagem, o comprimento do rio pode ser estimado pelas técnicas de geoprocessamento.

O coeficiente de compacidade, adimensional, está diretamente relacionado com a forma da bacia. Quanto maior for a regularidade geométrica da bacia, menor será o índice do coeficiente. A relação entre o perímetro da área de drenagem com a circunferência de determinado círculo que possua a mesma área da bacia hidrográfica de estudo, determina o coeficiente de compacidade. (VILLELA; MATTOS, 1975). Logo, o coeficiente de compacidade (K_c) pode ser determinado pela Equação 18.

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{P_m}{\sqrt{A}} \quad (18)$$

Onde:

K_c = coeficiente de compacidade;

P_m = perímetro de bacia (km);

A = área da bacia (km²).

A declividade longitudinal média do rio principal pode ser obtida em posse de um modelo digital do terreno com boa precisão topográfica. Determina-se com a variável comprimento do curso hídrico principal e a diferença de cota entre o ponto mais a montante e a jusante, por meio de técnicas de geoprocessamento e SIG, conforme a Equação 19.

$$S_m = \frac{(C_m - C_j)}{L_i} \cdot 100 \quad (19)$$

Onde:

S_m = declividade longitudinal média do curso hídrico principal (%);

C_m = cota de montante (m);

C_j = cota de jusante (m);

L_i = comprimento do curso hídrico principal (m).

A densidade de drenagem é uma variável física que faz a relação entre os comprimentos dos cursos hídricos de com a área de drenagem da bacia hidrográfica, ambas variáveis que podem ser estimadas por técnicas de geoprocessamento. Essa relação faz referência à eficiência do escoamento da bacia. (VILLELA; MATTOS, 1975).

A Equação 20 indica a relação entre as variáveis físicas que forma a densidade de drenagem.

$$Dd = \frac{L}{Ad} \quad (20)$$

Onde:

Dd = Densidade de drenagem (km/km²);

L = Comprimento dos cursos hídricos (km);

Ad = Área de drenagem (km²).

O fator de forma De acordo com Villela & Mattos (1975), é a relação proporcional entre a largura média da área de drenagem com o comprimento longitudinal. O comprimento mede-se pela distância entre a foz e o ponto mais a montante da bacia, por meio do talvegue do curso hídrico de maior comprimento. Logo, o fator de forma (Kf) pode ser determinado pela Equação 21.

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (21)$$

Onde:

Kf = fator de forma;

Ad = área da bacia (km²);

L = comprimento longitudinal (km).

2.3.2.3 Variáveis Geomorfológicas

As ações antrópicas na superfície de uma bacia hidrográfica refletem diretamente no regime dos sistemas hídricos. Em determinada região onde não ocorra variabilidade de precipitação, a simples mudança no uso à nível local pode resultar na alteração da vazão mínima, média e máxima. Uma significativa alteração de uso é o desmatamento que pode potencializar ou reduzir as vazões mínimas, condição dependente das características do solo pós atividade antrópica. Contudo, a

preservação do local e a recuperação da vegetação, em cerca de 20 anos, favorece o retorno das condições iniciais no local. (TUCCI; MENDES, 2006).

O Quadro 2 indica a relação entre uso do solo e o respectivo tipo de mudança na bacia hidrográfica.

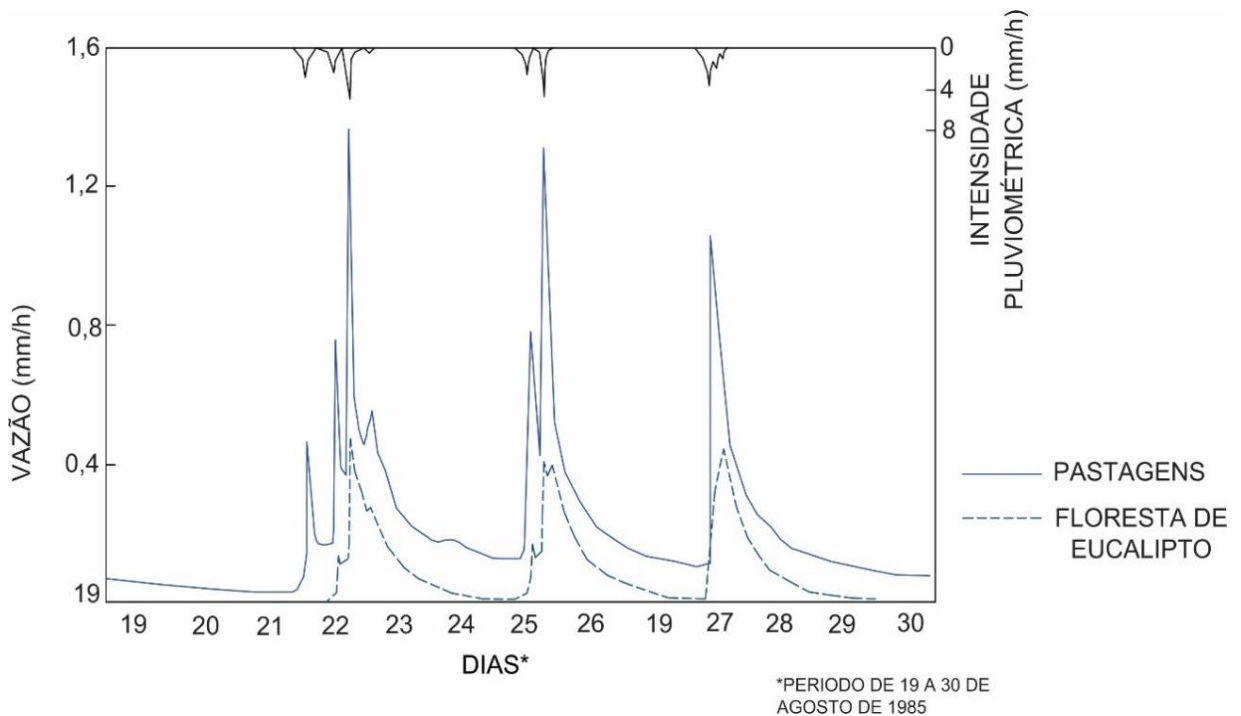
Quadro 2 – Classificação sobre o tipo de mudança e uso do solo

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	Desmatamento
	Reflorestamento
	Impermeabilização
O uso da superfície	Urbanização
	Reflorestamento para exploração sistemática
	Desmatamento: culturas anuais, de subsistência e permanentes
Método de alteração	Queimada
	Manual
	Equipamentos

Fonte: Tucci & Mendes (2006)

Burch et al. (1987) elaboraram um estudo na Austrália sobre os efeitos de uso do solo em relação ao escoamento superficial de duas pequenas bacias experimentais com distintas coberturas de superfície e semelhante área de drenagem, conforme pode ser visualizado nos hidrogramas das bacias experimentais do Gráfico 4.

Gráfico 4 – Hidrograma de duas bacias experimentais na Austrália



Fonte: Adaptado de Burch et al. (1987)

Durante o período chuvoso, a bacia com predominância de pastagens obteve altas vazões e grande volume escoado, independente das condições de umidade do solo. Já a bacia hidrográfica com expressiva quantidade de floresta de eucalipto obteve uma vazão significativamente inferior em comparação à bacia com pastagens. Um possível fator de interferência no escoamento é a resposta do lençol freático nas diferentes bacias experimentais, pois, na bacia de floresta de eucalipto o escoamento foi atrasado pela alta permeabilidade do solo até o ponto de saturação completa, diferentemente da bacia de pastagem, no qual o escoamento superficial foi rápido.

A urbanização é outro tipo de alteração antrópica de uso do solo que altera significativamente o comportamento hídrico de uma região. Os estudos de Targa et al. (2012) e Nunes, Fiori & Firpo (2011) concluem que o processo de impermeabilização do solo, originado pelo fenômeno de urbanização dos municípios, produz um aumento do escoamento superficial nas bacias hidrográficas. Esse efeito é originado pela redução da infiltração da água precipitada devido as estruturas impermeáveis, logo, a capacidade de armazenamento superficial é aumentada.

De acordo com SCS (1986), relatório do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos sobre hidrologia urbana para pequenas bacias hidrográficas, o *Curve Number* é um coeficiente dependente do tipo de solo, cobertura vegetal, grau de impermeabilização e outras características geomorfológicas, aplicado no modelo chuva-vazão *Soil Conservation Service* (SCS).

Segundo Tucci (2009), primeiramente, é feita uma classificação do grupo hidrológico de quatro tipos de solos distintos (A, B, C e D), conforme o teor de argila e areia que compõe os solos: o grupo A é referente a solos arenosos com baixo teor de argila (inferior a 8% e profundidade até 1,50 m), o grupo B é referente a solos com menor teor de argila (inferior a 20% e profundidade menor que grupo A), o grupo C são os solos barrentos (teor de argila entre 20 e 30%) e, por fim, o grupo D são os solos argilosos (30 a 40% de argila total).

Em sequência, é determinado a condição de umidade do solo. A condição I é referente a solo seco, a condição II trata dos solos em categoria média e a condição III condiz com solos úmidos. Após isso, é determinado o CN por meio da Tabela 1.

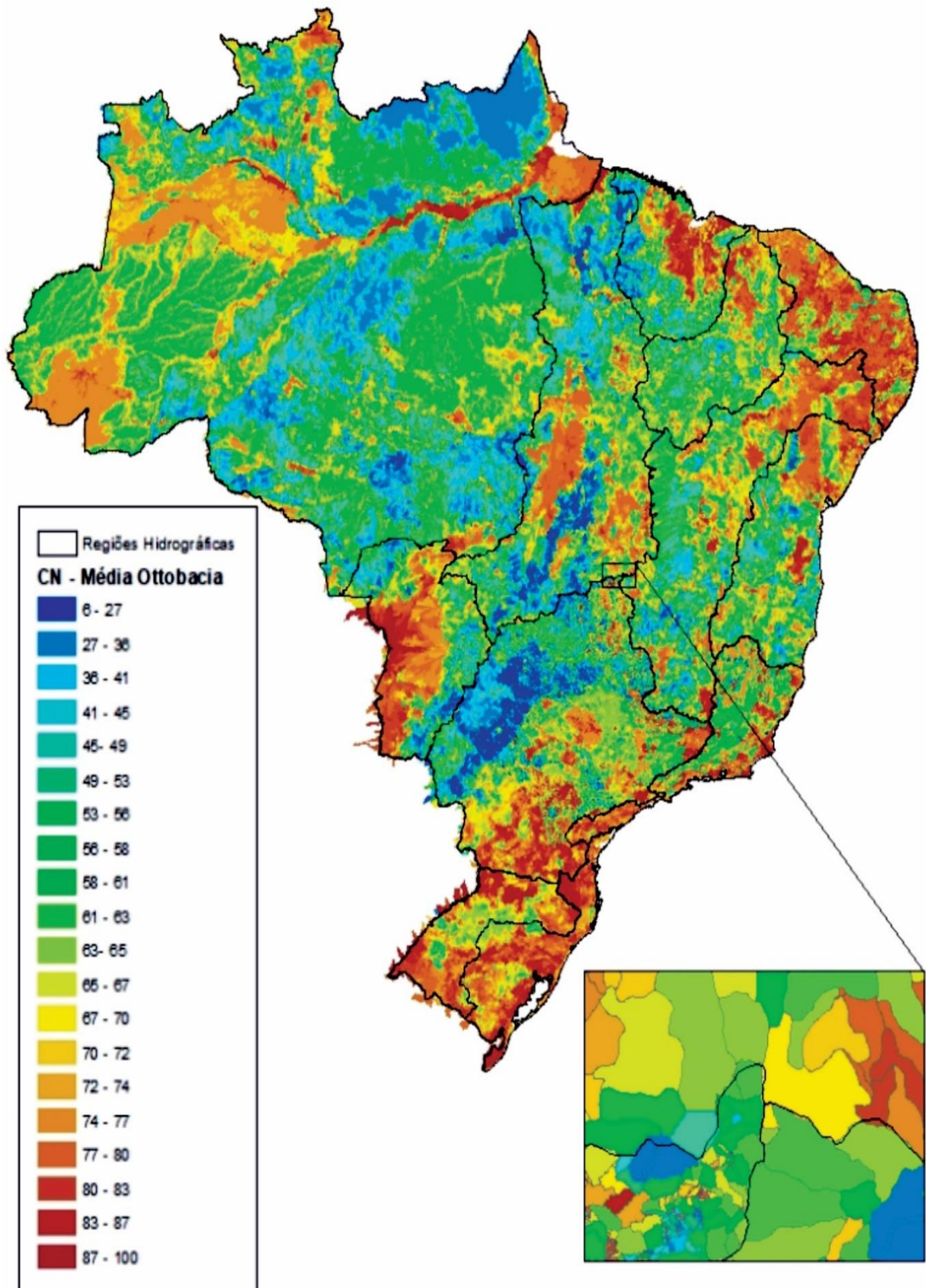
Tabela 1 – Valores de CN em bacias rurais e urbanas

Uso do solo	Superfície do solo	Grupo hidrológico do solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras e estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76
	Cobertura boa	25	55	70	77
Zonas cultivadas	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Urbano	Terra	72	82	87	89
	Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
	Zonas industriais	81	88	91	93
	Arruamentos e estradas	98	98	98	98

Fonte: Adaptado de Tucci (2009)

A Agência Nacional de Águas (ANA) elaborou mapa digital com a determinação do *Curve Number* em bacias hidrográficas otocodificadas, descrito com maior detalhe no item 3.3 Levantamento das Variáveis Explicativas. Como produto, além da base cartográfica, foi produzido um mapa com a diferenciação do coeficiente CN em todo território brasileiro. No mapa, as manchas com tom em azul possuem os menores valores de CN e, por consequência, os locais com maior permeabilidade do solo. Em contrapartida, as manchas com tom em vermelho representam os solos com maior coeficiente CN e maior escoamento superficial.

Figura 7 – Mapa de Curve Number da Base Hidrográfica Ottocodificada



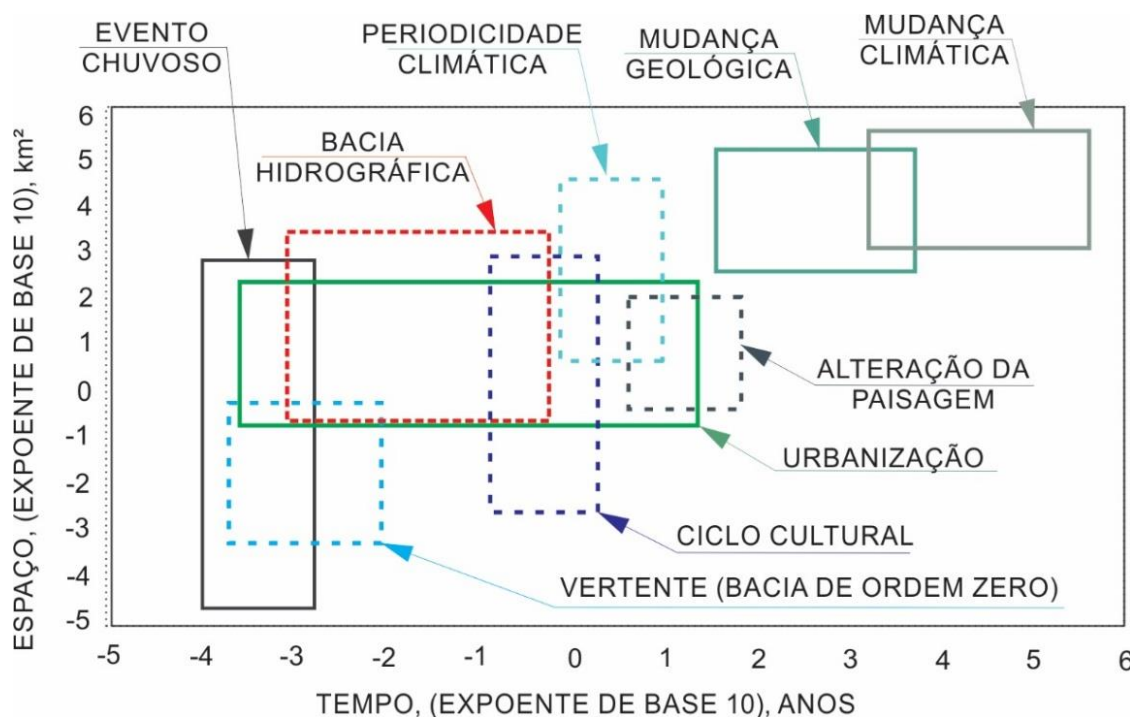
Fonte: Adaptado de ANA (2018b)

2.4 VARIABILIDADE HIDROLÓGICA

Os processos ocorridos em diferentes escalas interferem qualitativa e quantitativamente no comportamento hidrológico. O estudo hidrológico, em muitas vezes, é restringido a uma escala reduzida e a transferência de informações não ocorre diretamente entre a micro, meso e macro-escala. Os principais problemas encontrados neste tipo de representação são: pequena compatibilidade entre parâmetros que configurem as diferenças escalares, irresolução das medições de parâmetros e processos em distintas escalas e complexidade na representação da análise hidrológica da micro-escala de bacia hidrográfica outros níveis de escala. (MENDIONDO & TUCCI, 1997a).

O Gráfico 5 apresenta exemplos de processos dentro de um ciclo hidrológico com a relação entre as escalas espaciais e temporais.

Gráfico 5 – Exemplos de escalas temporais e espaciais para um ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de Mediondo & Tucci (1997a)

De acordo com Pompêo et al. (2015), as variáveis hidrológicas como a vazão ecológica, vazão específica, vazão média, vazão natural e vazão de permanência são sensíveis aos efeitos da variabilidade temporal e espacial em diferentes escalas. Os efeitos nas variáveis são proporcionados por atividades antrópicas e pela influência climática em escala regional.

De acordo com Mediondo & Tucci (1997b), a escala temporal possui relação direta com as atividades antrópicas e a variabilidade climática. As ações antrópicas modificam o ambiente, principalmente com alteração no solo pelo artifício do desmatamento ou da urbanização, que produzem efeitos ao longo de alguns anos em bacias de médio à grande porte.

O regime hidrológico possui forte relação com as características físicas de uma bacia hidrográfica. Os elementos físicos proporcionam, por meio da relação comparativa com dados hidrológicos conhecidos, a estimativa do comportamento hidrológico em relação a variabilidade espacial dos elementos. (VILLELA; MATTOS, 1975).

De acordo com Tucci & Mendes (2006), a maior disponibilidade de informações das variáveis hidrológicas no Brasil é pertencente a faixa de escala macro e transição meso-macro de bacias hidrográficas. Nas escalas micro, transição micro-meso e meso, ocorre a escassez de monitoramento hidrológico.

A Tabela 2 traz as dimensões de área de drenagem correspondente à faixa de escala espacial em que ocorrem os processos hidrológicos. As bacias com área entre 10 e 200 km² são classificadas como meso escala.

Tabela 2 – Escalas dos processos hidrológicos

Escala	Dimensão (km ²)
Macro	> 10 ⁴
Transição macro-meso	10 ³ e 10 ⁴
Meso	10 - 10 ³
Transição meso-micro	10 ⁻⁴ - 10
Micro	< 10 ⁻⁴

Fonte: Becker (1992) apud Tucci & Mendes (2006)

A extrapolação espacial na regionalização de vazão possui a tendência de apresentar incertezas na transferência de dados entre diferentes faixas de escala de áreas de drenagem. Em bacias menores (micro e meso-escala), a tomada de decisão para um resultado de vazão proveniente do método de regionalização hidrológica pode ser afetada pelas limitações produzidas durante o processo. (OMAR et al., 2003).

2.5 ESTUDOS ANTERIORES

Gasques et al. (2018) realizaram uma pesquisa bibliográfica sobre estudos com foco principal no tema regionalização hidrológica de vazões mínimas. A revisão teórica baseou-se nos bancos de dados de produções científicas e bases bibliográficas de dissertações de mestrados e teses de doutorado do período de 2007 a 2017, com referência aos principais trabalhos elaborados até o presente momento. Por meio desta pesquisa foi possível verificar a existência de muitos estudos de regionalização de vazões mínimas em bacias de escala macro e transição macro-meso, ou seja, os estudos em áreas de drenagem em escala meso ou inferior são escassos.

Eletrobrás (1985), conhecido como método tradicional de regionalização de vazões, muito utilizado por hidrólogos na estimativa de vazões, é estruturado por equações regionais e determinado em regiões hidrologicamente semelhantes. Existem muitos estudos com aplicação desta metodologia. Baena et al. (2004) aplicaram o método na bacia do rio Paraíba do Sul e o melhor modelo para estimar a Q_{95} utilizou a área da bacia e densidade de drenagem como variáveis explicativas.

Silveira & Tucci (1998), propuseram uma alternativa para quantificação de vazão em pequenas bacias hidrográficas sem dados, por meio de medições de pequena série de vazão em períodos de estiagem e aplicados em modelo chuva-vazão. No método proposto foi executado o balanço hídrico em seis bacias do estado do Rio Grande do Sul com área de drenagem de 1 a 11 km, com utilização das variáveis explicativas de precipitação, evaporação e o coeficiente de depleção, no qual obtiveram-se um erro padrão médio de 30% em relação aos valores observados e um erro padrão da ordem de 20% para a estimativa da curva de permanência.

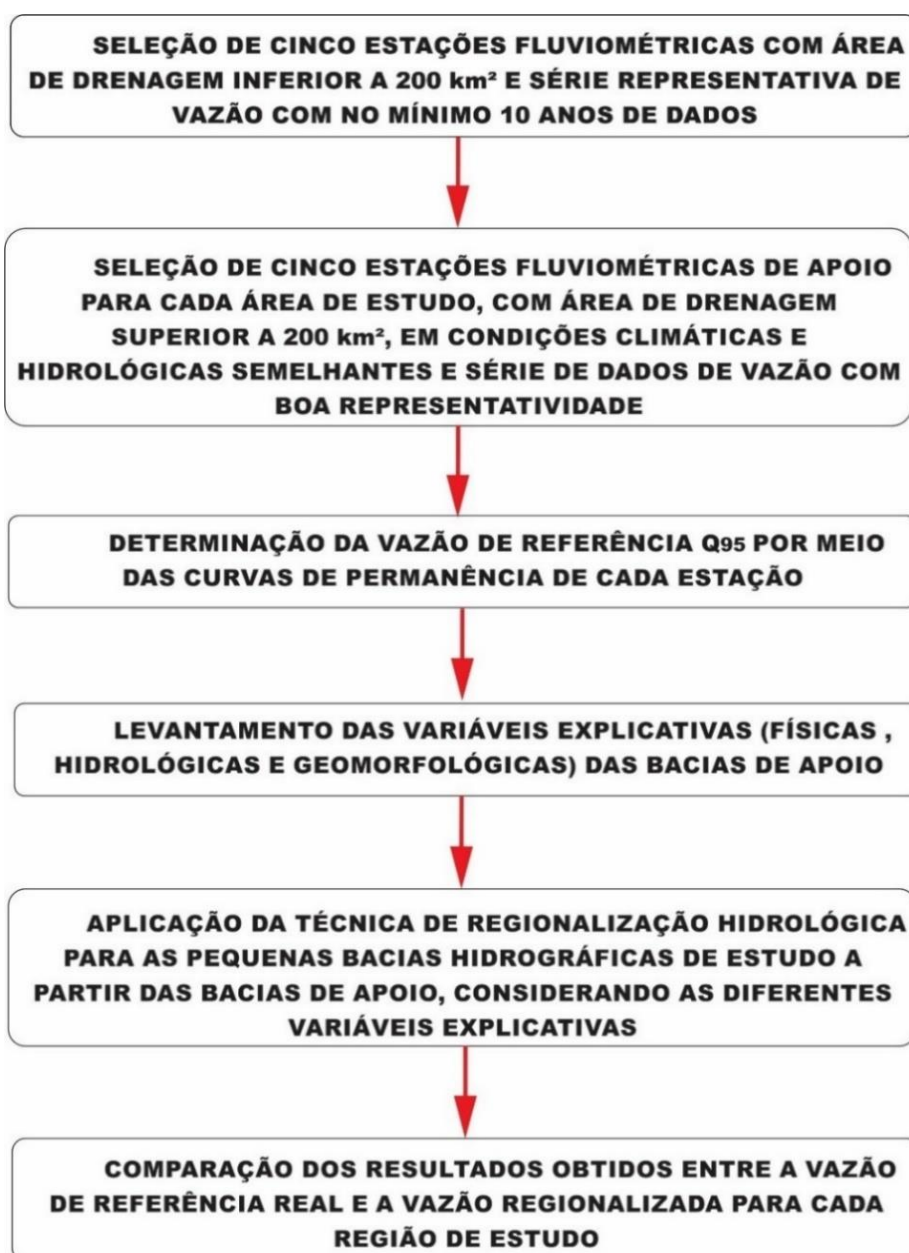
Pogian (2016) comparou os métodos de Eletrobrás (1985) e Silveira & Tucci (1998) em pequenas bacias hidrográficas de Minas Gerais e Espírito Santo, com área de drenagem que varia de 4,9 a 210,3 km², para determinação da Q_{90} e $Q_{7,10}$. Os resultados variam para cada região e em alguns pontos o erro relativo entre a vazão observada e a vazão estimada foi superior a 50%. A variável explicativa mais utilizada neste trabalho foi a área de drenagem, além da inserção da precipitação média na equação de regressão de alguns postos.

Os estudos descritos denotam a existência de lacuna de conhecimento quanto à incerteza associada à utilização da técnica de regionalização de vazões com foco em pequenas áreas de drenagem.

3 METODOLOGIA

A proposta do trabalho é a avaliação do erro relativo médio associado à aplicação do método de regionalização de vazões de referência (Q₉₅) em pequenas bacias hidrográficas. Para tal, foi considerado como bacia de pequeno porte as bacias com área de drenagem inferior a 200 km². A Figura 8 apresenta a estruturação do trabalho por meio de fluxograma.

Figura 8 – Fluxograma de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 SELEÇÃO DAS ESTAÇÃO DE ESTUDO E APOIO

Em pesquisa ao inventário de estações hidrometeorológicas do banco de dados do Portal HidroWeb da ANA, foi possível constatar a existência de 549 estações fluviométricas cadastradas no banco com área de drenagem menor que 200 km². Deste montante, 340 estações não possuem qualquer registro de medição de vazão, equivalente a 61,9%. Ressalta-se que muitas estações do banco de dados hidrométrico não possuem áreas de drenagem calculadas. No entanto, o número de estações com dados de vazão em pequenas bacias pode ser maior que o indicado.

A Tabela 3 apresenta o número de estações fluviométricas cadastradas no banco de dados *HidroWeb* com registro de vazão e área inferior a 200 km².

Tabela 3 – Número de estações fluviométricas com dados de vazão e área inferior a 200 km² por bacia hidrográfica

Região hidrográfica	Bacia hidrográfica	Número de estações
Rio Amazonas	Rios Madeira e Guaporé	1
Rio Tocantins	Rios Maranhão e Palmas	3
	Rio Paranã e Palma	2
Atlântico, Trecho Norte/Nordeste	Rios Acaraú e Pirangi	1
	Rios Paraíba e Potengi	1
	Rios Capibaribe e Mundaú	7
Rio São Francisco	Rio Paraopeba	5
	Rio das Velhas	2
	Rio Paracatu	4
	Rio Verde Grande	1
Atlântico, Trecho Leste	Rio Jequitinhonha	3
	Rio Doce	3
	Rios Itapemirim e Itabapoana	3
	Rio Paraíba Do Sul	19
	Rios Macaé e São João	6
Rio Paraná	Rio Paranaíba	38
	Rio Grande	21
	Rio Tietê	14
	Rio Pardo	1
	Rio Paranapanema	19
	Rio Iguaçu	24
Atlântico, Trecho Sudeste	Rios Itapanhaú e Itanhaém	2
	Rio Ribeira do Iguape	13
	Rios Nhundiaquara e Itapocu	8
	Rio Itajaí-Açu	2
	Rios Tubarão e Araranguá	1
	Rio Jacuí	1
	Lagoa Dos Patos	3

Fonte: Portal HidroWeb

Portanto, temos no Brasil o total de 209 estações fluviométricas com área de drenagem inferior a 200 km² e que possui dado de vazão disponível no banco de dados *HidroWeb*, independentemente do tamanho da série histórica. Destaca-se que na região hidrográfica do Rio Uruguai não foi localizada nenhuma estação fluviométrica com registro de dados de vazão e área inferior a 200 km².

A Figura 9 apresenta a distribuição espacial das 209 estações fluviométricas com dados de vazão e área de drenagem inferior a 200 km².

Figura 9 – Mapa de localização das estações fluviométricas com registro de vazão e área inferior a 200 km² no território brasileiro



Fonte: Elaborado pelo autor

Para definir as estações fluviométricas utilizadas neste trabalho, foram considerados os seguintes critérios:

- a) Disponibilidade dos dados de vazão da estação;
- b) Série histórica com mais de 10 anos de dados;
- c) Série histórica com dados atuais e porcentagem de dados superior a 90%;
- d) Disponibilidade de dados de estações fluviométricas em bacias hidrográficas próximas a região de estudo;
- e) Inexistência de interferência no escoamento natural da seção como: barragens, diques, desvios e outras estruturas hidráulicas.

Para definição das estações de apoio, é necessário que o período temporal da série histórica seja concomitante com o período de tempo da estação de estudo.

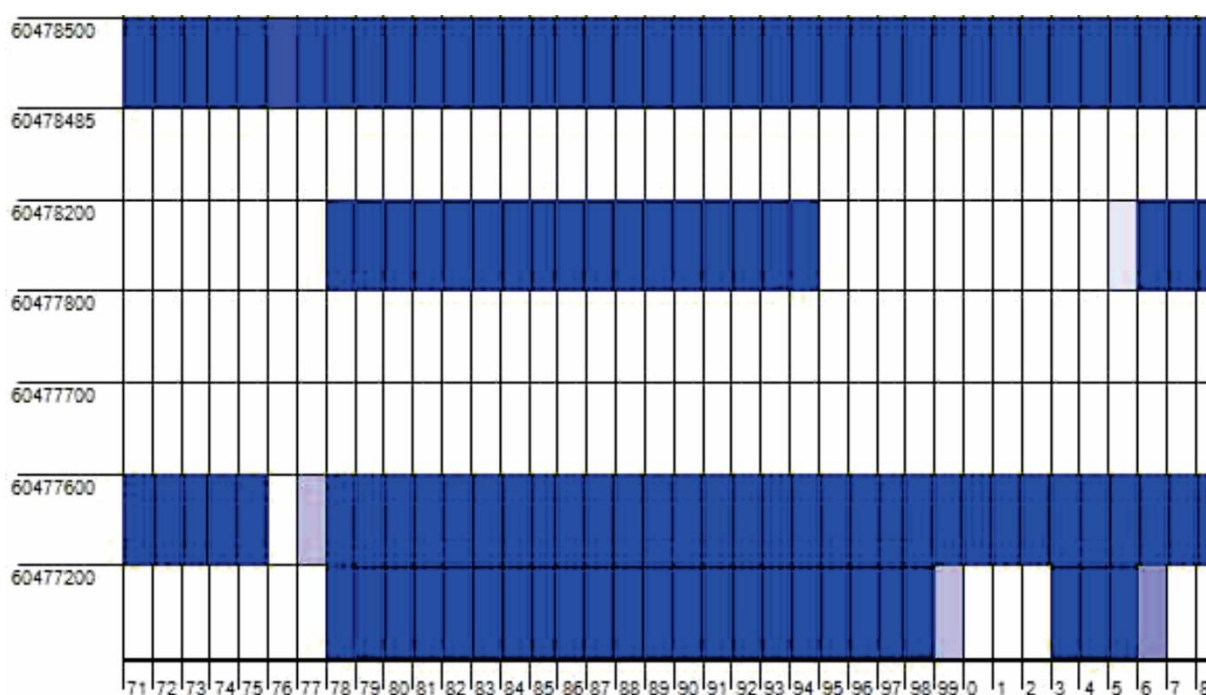
No cadastro das estações no *HidroWeb*, foram extraídas as informações de coordenadas de cada posto fluviométricos. Os pontos foram plotados no *software Google Earth* e, por meio de visualização da imagem de satélite, verificou-se a localização da seção de medição da estação. Para definir se a estação está apta para aplicação na metodologia de regionalização, foram conferidas as proximidades dos trechos de montante e jusante do ponto, para constatação da existência de estrutura hidráulica e barragens que possam interferir no escoamento natural do curso hídrico. Na existência de barramentos próximos ao ponto de interesse ou seção não natural de canal artificial a estação foi descartada.

3.2 DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES DE REFERÊNCIA REAIS PELA CURVA DE PERMANÊNCIA

A análise dos dados extraídos do *HidroWeb* é feita por meio do *software Super Manejo de Dados*, disponível em <https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/software-de-manejo-e-visualizacao-de-dados-hidrologicos/super-manejo-de-dados-2016/>. A ferramenta possibilita uma análise integrada dos postos fluviométricos, no qual é possível verificar a disponibilidade temporal dos dados e a rápida elaboração dos hidrogramas e curvas de permanência. Os dados de vazão são inseridos em formato de arquivo de texto no *software* e são exportados na forma de gráficos em formato de imagem. (COELHO; FAN, 2016).

Ao plotar o gráfico de disponibilidade de dados, foi possível fazer uma comparação entre os postos de monitoramento ao longo do tempo. O eixo horizontal do gráfico é referente ao tempo de monitoramento, em intervalo anual. O eixo vertical representa as estações fluviométricas identificadas com o código *HidroWeb*. Os pontos em azul representam a existência de dados para o período, os pontos com cores intermediárias que variam entre o azul e o branco indicam que há falhas no período e os pontos em branco significam a inexistência de dados de vazão para determinado ano, conforme pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 – Gráfico de barras de disponibilidade de dados de vazão



Fonte: Elaborado pelo autor

Para determinação da variável dependente, no caso da vazão de estiagem Q95, foram criadas as curvas de permanência para cada estação fluviométricas. Primeiramente, os dados brutos de vazão no formato texto do portal *HidroWeb* foram processados no software *Super Manejo de Dados*, no qual é gerado um arquivo de texto com os dados em valores diários de vazão, tabelados em ordem cronológica. Após isso, a série histórica de vazão é expressa em forma de gráfico e tabela com a relação entre vazão e frequência com que esta vazão é superada ou igualada, no qual determinam-se as vazões com excedência em 90% e 95% do tempo.

Tucci (2002) indica que para a curva de permanência de série de vazões é necessário contar com no mínimo cinco anos de dados. Nesse caso, foram

descartadas as estações que possuem séries de vazões com período menor do que dez anos e que represente um período temporal recente. O período de dados das estações de estudo e de apoio devem ser sincronizados com a mesma data inicial e final da série de dados, com o objetivo de reduzir os erros provenientes da variabilidade temporal.

Para determinação da curva de permanência o procedimento foi adotado conforme as seguintes etapas:

- a) Determinar a curva de permanência dos postos fluviométricos de vazão de nível diário, ordenados de forma decrescente da máxima para mínima vazão medida, com série de no mínimo 10 anos de dados;
- b) Determinar as vazões de referência Q_{90} e Q_{95} das estações de estudo por meio da curva de permanência;
- c) Limitar a série de vazões das estações de apoio de acordo com o período-base da estação de estudo;
- d) Determinar as vazões de referência Q_{90} e Q_{95} das estações de apoio por meio da curva de permanência.

3.3 LEVANTAMENTO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

As variáveis explicativas geomorfométricas foram calculadas por meio de técnicas de geoprocessamento. Inicialmente, foi criado o Modelo Digital de Elevação (MDE) com a base de dados do radar SRTM (Missão Topográfica de Radar de Transporte) de autoria do USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos) com resolução de 30 metros. Os arquivos, em *raster*, de altitude foram extraídos do banco de dados do SRTM e unificados no *software* ArcGis®ArcMapTM 10.5, no qual foi gerado um mosaico georreferenciado no sistema de referência geocêntrico SIRGAS 2000 e sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator). Por meio deste modelo foi possível determinar as variáveis explicativas com as seguintes metodologias:

- a) Área de drenagem (km^2) e perímetro da bacia (km): em posse do MDE formado pelo mosaico, utiliza-se o pacote *Archydro* do *software* ArcGis®ArcMapTM para cálculo automático da área de drenagem dos pontos de interesse por meio da ferramenta *Watershed Processing*. Para este procedimento é selecionado o ponto de localização de seção

- transversal da estação fluviométrica, que representa o exutório da bacia no ponto mais baixo e, por meio da delimitação dos divisores de água, calcula-se o tamanho de área que flui a água até o ponto de interesse;
- b) Comprimento do rio principal (km) e comprimento dos cursos hídricos (km): as variáveis foram extraídas do *ArcGis®ArcMap* pela ferramenta *Drainage Line Processing* do *ArctHydro*, limitada pela área de drenagem calculada e projetada sobre modelo digital do terreno;
- c) Vazão específica (l/s.km²), coeficiente de compacidade, declividade média do rio principal (%), densidade de drenagem (km/km²) e fator de forma: as variáveis citadas foram calculadas em planilha eletrônica do *Microsoft Excel®* a partir dos dados das outras variáveis, de acordo com as equações descritas no item 2.3.2 Variáveis Explicativas;
- d) Precipitação média anual (mm): Para determinação da precipitação média anual incidente na bacia, em milímetros, utilizou-se metodologia semelhante àquela da determinação do CN. Foi utilizada a base de dados do projeto “Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas anuais médias período 1977 a 2006”, elaborado por CPRM (2011). Os arquivos de isoietas em formato *shapefile* foram processados no *ArcGis®ArcMap* por meio de interpolação das curvas para a geração de TIN (Rede Irregular Triangulada), que posteriormente foi transformado em *raster* para a conversão em polígonos com área e precipitação conhecidos. Por fim, foi calculada a precipitação média anual, em milímetros, de cada bacia de interesse pela proporção de área de cada polígono valorizado;
- e) *Curve Number* médio (CN): Para determinação do coeficiente CN foi utilizada a base de dados o projeto “Produção de base vetorial com o CN para BHO 2014”, elaborada por ANA (2018b). Esta produção dispõe de arquivo em *raster* com valor de coeficiente CN para cada pixel, separados em bacias hidrográficas ottocodificadas e relaciona o escoamento superficial ao tipo e uso de solo (ANA, 2018b). O projeto é baseado no cruzamento da classificação hidrológica proposta por Sartori et. al (2005), no qual são definidos grupos classificatórios dependentes dos tipos de solo, com a classificação de uso e ocupação de solo proposta por IBGE (2013), no qual foi criado um sistema classificatório dos solos em grade de 1 km por 1km e escala de 1:250.000. No software

ArcGis@ArcMap o arquivo *raster* com as informações de *Curve Number* é convertido em milhares de polígonos com área e CN conhecidos. Então, os polígonos com dados de CN são delimitados pelos polígonos das áreas de drenagem dos postos fluviométricos. Por fim, é calculado o CN médio de cada bacia de interesse pela proporção de área do polígono valorizado com o coeficiente CN.

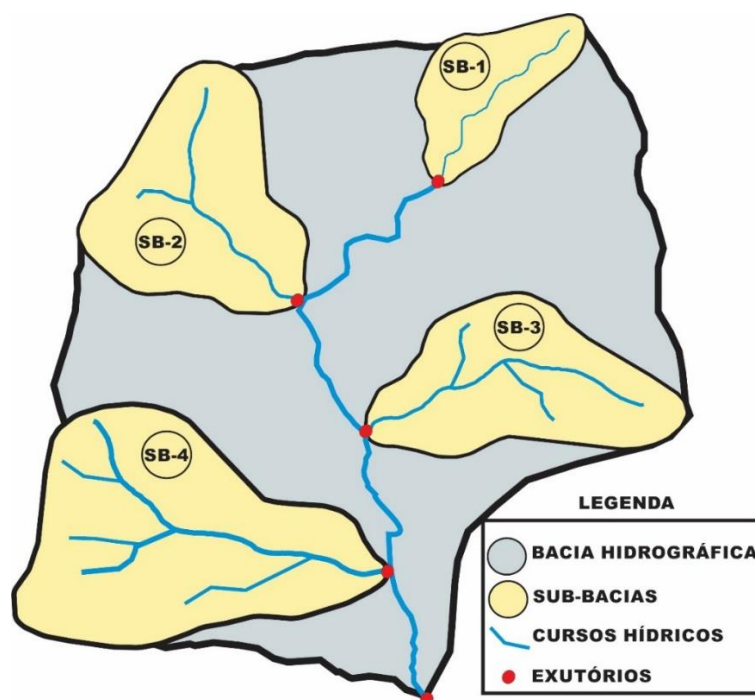
Conforme Nascimento & Fernandes (2017), as ferramentas de geoprocessamento e SIG propiciam a elaboração de mapas com alto grau de detalhamento do uso e ocupação do solo. Esses mapas temáticos auxiliam estudos socioambientais como instrumento de planejamento e gestão de bacias hidrográficas.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS

No método de regionalização a ser empregado, cada área de drenagem a ser regionalizada conta com ao menos cinco estações fluviométricas de apoio, com sua respectiva área de drenagem e série de vazão conhecidas. A bacia hidrográfica de estudo, com área até 200 km², faz grupo com as sub-bacias de apoio.

A Figura 11 ilustra um esquema característico da proposta de metodologia, com a espacialização das bacias hidrográficas dentro de um mesmo contexto hidrológico.

Figura 11 – Esquema característico da metodologia de regionalização proposta



Fonte: Elaborado pelo autor

No esquema característico da Figura 11, a SB-1 é a sub-bacia de estudo, com área de drenagem inferior a 200 km² e série de dados de vazão conhecida. Nesta bacia foi aplicada a técnica de regionalização hidrológica com as sub-bacias de apoio SB-2, SB-3 e SB-4. As sub-bacias de apoio possuem área de drenagem entre 200 e 20.000 km² e série de vazões com o mesmo intervalo temporal de dados da sub-bacia de estudo SB-1. As variáveis explicativas testadas na metodologia serão: área de drenagem, comprimento dos cursos hídricos da bacia, precipitação média anual e coeficiente *Curve Number*. Por fim, foram realizados testes em planilha eletrônica da *Microsoft Excel®* de três métodos de regionalização: interpolação linear por proporcionalidade de áreas, equação regional por regressão simples do tipo potencial e equação regional por regressão múltipla do tipo linear.

Para o método de interpolação linear, procede-se com a estimativa da vazão de estiagem da bacia de estudo por meio da relação direta entre áreas de drenagem. De forma linear, este é o método mais simples de regionalização hidrológica, conforme a Equação 22.

$$Q_{95\%estudo} = Q_{95\%apoio} \cdot \frac{AD_{estudo}}{AD_{apoio}} \quad (22)$$

Onde:

$Q_{95\%estudo}$ = vazão de referência maior ou igual durante 95% do tempo na estação de estudo (m³/s);

$Q_{95\%apoio}$ = vazão de referência maior ou igual durante 95% do tempo na estação de apoio (m³/s);

AD_{estudo} = área de drenagem da estação de estudo (km²);

AD_{apoio} = área de drenagem da estação de apoio (km²).

Com o objetivo de corrigir a vazão regionalizada no método de proporção de áreas de drenagem, incrementa-se na equação de regionalização as variáveis de precipitação e coeficiente CN. Neste método é aplicada a razão entre as variáveis explicativas da estação de apoio e da estação de estudo, conforme a Equação 23.

$$Q_{95\%estudo} = Q_{95\%apoio} \cdot \frac{AD_{estudo}}{AD_{apoio}} \cdot \frac{P_{estudo}}{P_{apoio}} \cdot \frac{CN_{estudo}}{CN_{apoio}} \quad (23)$$

Onde:

$Q_{95\%estudo}$ = vazão de referência maior ou igual durante 95% do tempo na estação de estudo (m³/s);

$Q_{95\%apoio}$ = vazão de referência maior ou igual durante 95% do tempo na estação de apoio (m³/s);

AD_{estudo} = área de drenagem da estação de estudo (km²);

AD_{apoio} = área de drenagem da estação de apoio (km²);

P_{estudo} = precipitação da estação de estudo (mm);

P_{apoio} = precipitação da estação de apoio (mm);

CN_{estudo} = *curve number* da estação de estudo;

CN_{apoio} = *curve number* da estação de apoio.

Para a regionalização por equação regional foram plotados gráficos de dispersão, em planilha eletrônica, com a relação entre a variável dependente (Q_{90} e Q_{95}) no eixo das ordenadas e cada variável explicativa no eixo das abscissas. Em cada gráfico é gerada uma equação potencial de regressão não-linear entre os pontos (Equação 24), além do coeficiente de determinação (R^2) para análise dos resultados e erros significativos.

$$Q_{regionalizada} = c \cdot X^d \quad (24)$$

Onde:

$Q_{regionalizada}$ = vazão de estiagem regionalizada (m³/s);

X = variável explicativa;

c e d = coeficientes obtidos na análise de regressão.

Com o intuito de obter a redução do erro relativo, foram inseridas mais de uma variável explicativa na equação regional. Nesse caso, trata-se de uma equação de regressão linear entre os pontos baseada no método dos mínimos quadrados (Equação 25), além do coeficiente de determinação (R^2) para análise dos resultados e erros significativos.

$$Q_{regionalizada} = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ad + \beta_2 \cdot P + \beta_3 \cdot CN \quad (25)$$

Onde:

$Q_{regionalizada}$ = vazão de estiagem regionalizada (m³/s);

Ad, P e Cn = variáveis explicativas;

β_0 = coeficiente de intersecção da reta com o eixo y

β_1, β_2 e β_3 = coeficientes obtidos na análise de regressão.

As estimativas de equação regional são aplicadas para as vazões de referência Q_{90} e Q_{95} . Os coeficientes são gerados por meio da ferramenta Análise de Dados do Microsoft® Office Excel. Na planilha eletrônica, é desenvolvida a regressão múltipla

linear selecionando os dados de entrada da variável dependente (Y) e das variáveis explicativas (X). O nível de confiança adotado para os modelos de regressão é de 95%. A mesma aplicação gera resultados de coeficiente de determinação (R^2), que indica o grau de correlação entre as variáveis do modelo matemático, e os valores do f de significação (Teste F), que é o parâmetro adotados para estabelecer se o modelo de regressão é válido.

No teste de regionalização foi calculado, para efeito de comparação, o erro relativo percentual. Calcula-se o erro relativo, em planilha eletrônica, pela razão entre erro absoluto e o valor estimado. O erro absoluto é calculado pela diferença do valor real e o valor estimado (JUSTO et al., 2019). O erro relativo percentual é calculado conforme a Equação 26.

$$ER = \frac{Q_{real} - Q_{regionalizada}}{Q_{real}} \cdot 100 \quad (26)$$

Onde:

ER = erro relativo percentual (%);

Q_{real} = vazão de estiagem real calculada pela curva de permanência;

$Q_{regionalizada}$ = vazão de estiagem regionalizada.

Para os testes de regionalização que utilizam a equação regional de regressão, adotou-se o nível de confiança do modelo em 95%. O nível de significância, ou seja, a discrepância do modelo em relação aos dados observados é de 5%. Nesse caso, as equações serão parametrizadas pelo f de significação, que deve ser inferior a 0,05 para que a regressão seja significativa no nível de confiança adotado.

Optou-se por não trabalhar com indicadores regionais na metodologia proposta. De acordo com Reis et al., (2008), indicadores regionais de vazão mínima, como o rcp_{95} , não é recomendado para estimativa de vazões de estiagem em pequenas bacias hidrográficas. Em seu trabalho de regionalização de vazões na bacia do rio Itabapoana, os autores encontraram erros significativos nas vazões estimadas por este método.

4 ÁREA DE ESTUDO

Foram determinadas cinco estações fluviométricas, com séries de dados de vazão superiores a 10 anos e área de drenagem inferior a 200 km², conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo das cinco estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Nome	Entidade Responsável	Operador	Área de drenagem (km ²)	Cobertura de dados (%)
40810800	Fazenda Pasto Grande	ANA	CPRM	54,7	100,0
42454000	Rio São Bernardo	ANA	CPRM	98,7	92,2
59120000	Macaé de Cima	ANA	CPRM	67,0	99,3
81290500	Montante da Ponte	AGUASPARANÁ	AGUASPARANÁ	17,0	97,5
83101000	Baixo Caeté	ANA	EPAGRI-SC	165,0	100,0

Fonte: Portal HidroWeb

Para cada estação fluviométrica de estudo, foram selecionadas outras cinco estações fluviométricas de apoio. As estações de apoio foram determinadas por meio de critérios como: semelhança climática e de características morfogeológicas, proximidade geográfica, diversidade de área de drenagem e série de dados de vazão disponível, longa e consistente. Evitou-se a escolha de estações próximas à barramentos e estruturas hidráulicas, devido a possível interferência no escoamento dos cursos hídricos.

A Tabela 5 lista as estações que servem de apoio para utilização das variáveis explicativas na elaboração do modelo de regressão das vazões de referência.

Tabela 5 – Estações fluviométricas de apoio das estações de estudo

(Continua)

Estação de estudo	Estação de Apoio	Código da Estação de Apoio	Curso Hídrico	Área de Drenagem (km ²)	Cobertura da série (%)
Fazenda Pasto Grande (40810800)	Jardim	40811100	Ribeirão Serra Azul	113	97,8
	São Brás do Suaçuí Mont.	40549998	Rio Paraopeba	462	100,0
	Belo Vale	40710000	Rio Paraopeba	2770	98,3
	Alberto Flores	40740000	Rio Paraopeba	4120	99,3
	Ponte Da Taquara	40850000	Rio Paraopeba	8750	99,5
Rio São Bernardo (42454000)	Ribeirão Jacaré	42450300	Córrego Buriti Grande	163	98,0
	Fazenda Santa Cruz	42546000	Rio Salobro	553	98,2
	Fazenda Barra Da Égua	42435000	Ribeirão Barra Égua	1590	94,7
	Buritis Jusante	43250002	Rio Urucuia	3020	92,3
	Fazenda Carvalho	43300000	Rio São Domingos	3160	97,6

(Conclusão)

Estação de estudo	Estação de Apoio	Código da Estação de Apoio	Curso Hídrico	Área de Drenagem (km ²)	Preenchimento da série (%)
Macaé de Cima (59120000)	Parque Ribeira	59240000	Rio Macacu	289	98,7
	Correntezas - Nova	59181000	Rio São João	404	100,0
	Macabuzinho	59100000	Rio Macabu	630	99,2
	Manuel De Moraes	58846000	Rio Grande	1370	76,9
Montante da Ponte (81290500)	Pimentel	58850000	Rio Grande	1810	99,5
	Chácara Da Luz	81291000	Rio Capivari	128	90,4
	Itambezinho	81019300	Rio Açungui	212	100,0
	Turvo	81125000	Rio Turvo	421	100,0
Baixo Caeté (83101000)	Balsa Do Jacaré	81102000	Rio Açungui	1700	99,7
	Balsa Do Cerro Azul	81135000	Rio Ribeira Do Iguape	4600	99,3
	Vila Nova	83069900	Rio Trombudo	397	100,0
	Saltinho	83105000	Rio Itajaí Do Sul	434	100,0
	Botuvera - Montante	83892998	Rio Itajaí-Mirim	827	99,2
Apiúna - Régua Nova	Rio Do Sul - Novo	83300200	Rio Itajaí-Açu	5160	100,0
		83500000	Rio Itajaí-Açu	9070	100,0

Fonte: Portal HidroWeb

As estações fluviométricas escolhidas, de acordo com as informações disponibilizadas no *Portal HidroWeb*, possuem as seguintes características:

- 1) A estação Fazenda Pasto Grande, sob código de número 40810800, está localizada na bacia do Rio Paraopeba, da região do Rio São Francisco, no curso do Ribeirão Serra Azul, pertencente ao estado de Minas Gerais. A área de drenagem deste ponto é de 54,7 km² e a série histórica possui 41 anos de dados de vazão, com 100,0 % de cobertura de dados;
- 2) A estação Rio São Bernardo, sob código de número 42454000, está situada na bacia do Rio Paracatu da região do Rio São Francisco, no curso do Ribeirão São Bernardo, pertencente ao Distrito Federal. A área de drenagem deste ponto é de 98,7 km² e a série histórica possui 13 anos de dados de vazão, com 92,2 % de cobertura de dados;
- 3) A estação Macaé de Cima, sob código de número 59120000, está situada na bacia da Baía de Guanabara, no curso do Rio Macaé de Cima, localizado no estado do Rio de Janeiro. A área de drenagem neste

ponto é de 67,0 km² e a série histórica possui 52 anos de dados de vazão, com 99,3 % de cobertura de dados;

- 4) A estação Montante Da Ponte, sob código de número 81290500, está localizada na bacia do Rio Ribeira do Iguape da região do Atlântico, Trecho Sudeste, no curso do Rio da Onça, localizado no estado do Paraná. A área de drenagem deste ponto é de 17,0 km² e a série histórica possui 13 anos de dados de vazão, com 97,5 % de cobertura de dados;
- 5) A estação Baixo Caeté, sob código de número 83101000, está situada região do Atlântico, Trecho Sudeste, na bacia do Rio Itajaí, no curso do Rio Itajaí-Açu, estado de Santa Catarina. A área de drenagem neste ponto é de 165,0 km² e a série histórica possui 10 anos de dados de vazão, com 100,0 % de cobertura de dados.

A Tabela 6 traz um resumo das regiões e bacias hidrográficas das estações fluviométricas de estudo, assim como o corpo hídrico no qual a estação está localizada e unidade federativa.

Tabela 6 – Regiões das estações fluviométricas de estudo

Estação de estudo	Região Hidrográfica	Bacia Hidrográfica	Corpo Hídrico	UF
40810800	Rio São Francisco	Rio Paraopeba	Ribeirão Serra Azul	MG
42454000	Rio São Francisco	Rio Paracatu	Ribeirão São Bernardo	DF
59120000	Atlântico, Trecho Leste	Baía de Guanabara	Rio Macaé de Cima	RJ
81290500	Atlântico, Trecho Sudeste	Rio Ribeira do Iguape	Rio da Onça	PR
83101000	Atlântico, Trecho Sudeste	Rio Itajaí	Rio Itajaí-Açu	SC

Fonte: Portal HidroWeb

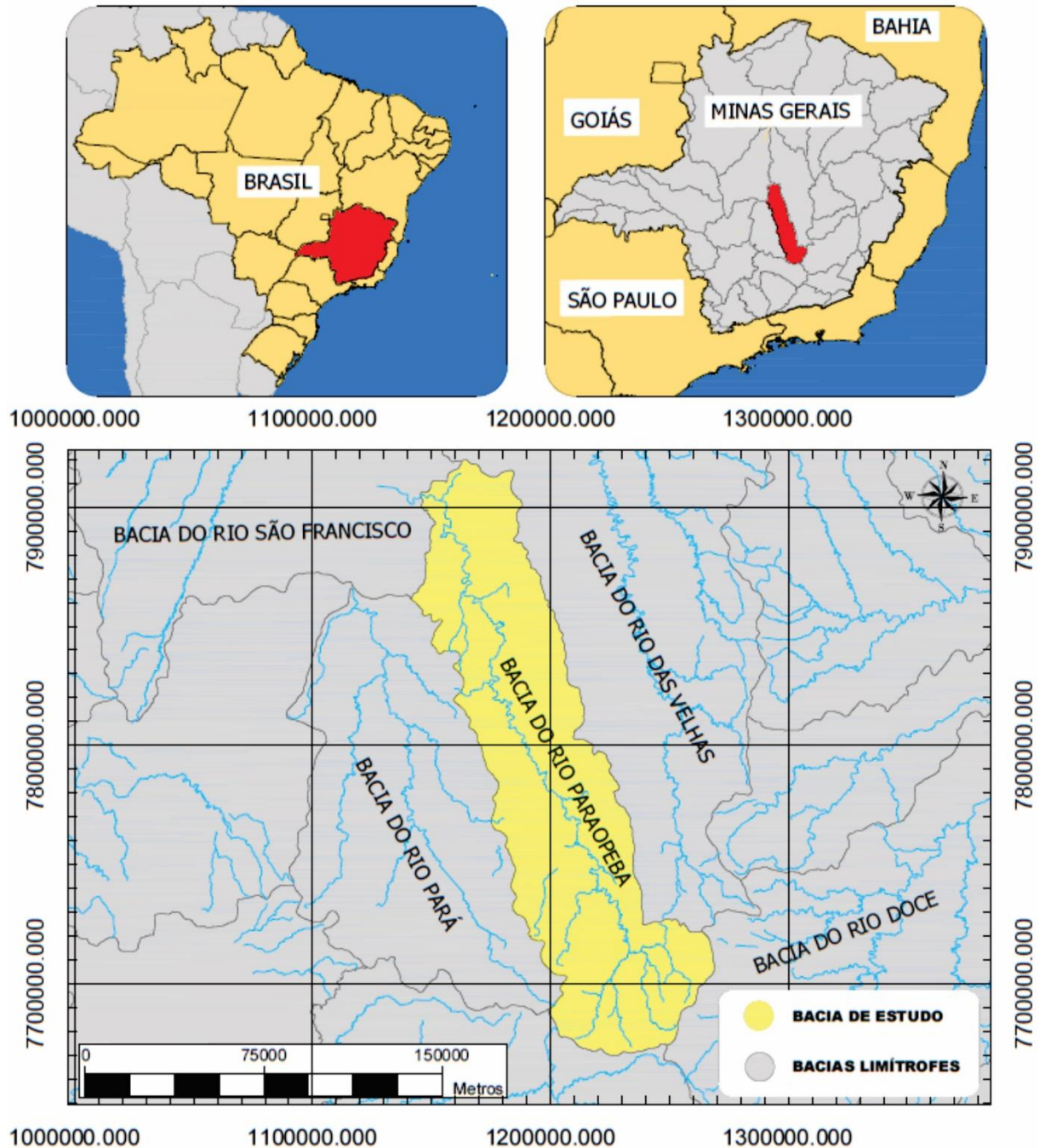
4.1 RIO PARAPEBA

A Bacia do Rio Paraopeba drena uma área de 12.054,25 km², equivalente a 5,14% da área de drenagem da bacia do Rio São Francisco, ao longo de 48 municípios como: Betim, Brumadinho, Igarapé, Sete Lagoas, entre outros. A bacia localiza-se próxima a Região Metropolitana de Belo Horizonte, na faixa central do estado de Minas Gerais. O Rio Paraopeba, principal drenagem da bacia, é afluente do Rio São Francisco com confluência pela margem direita do curso. Entre os usos de água na bacia, destacam-se a geração de energia elétrica, abastecimento públicos e industrial,

além da mineração e irrigação. Os principais cursos hídricos são o Rio Paraopeba, Rio Maranhão, Rio Brumado e Ribeirão Mateus Leme (CPRM, 2019).

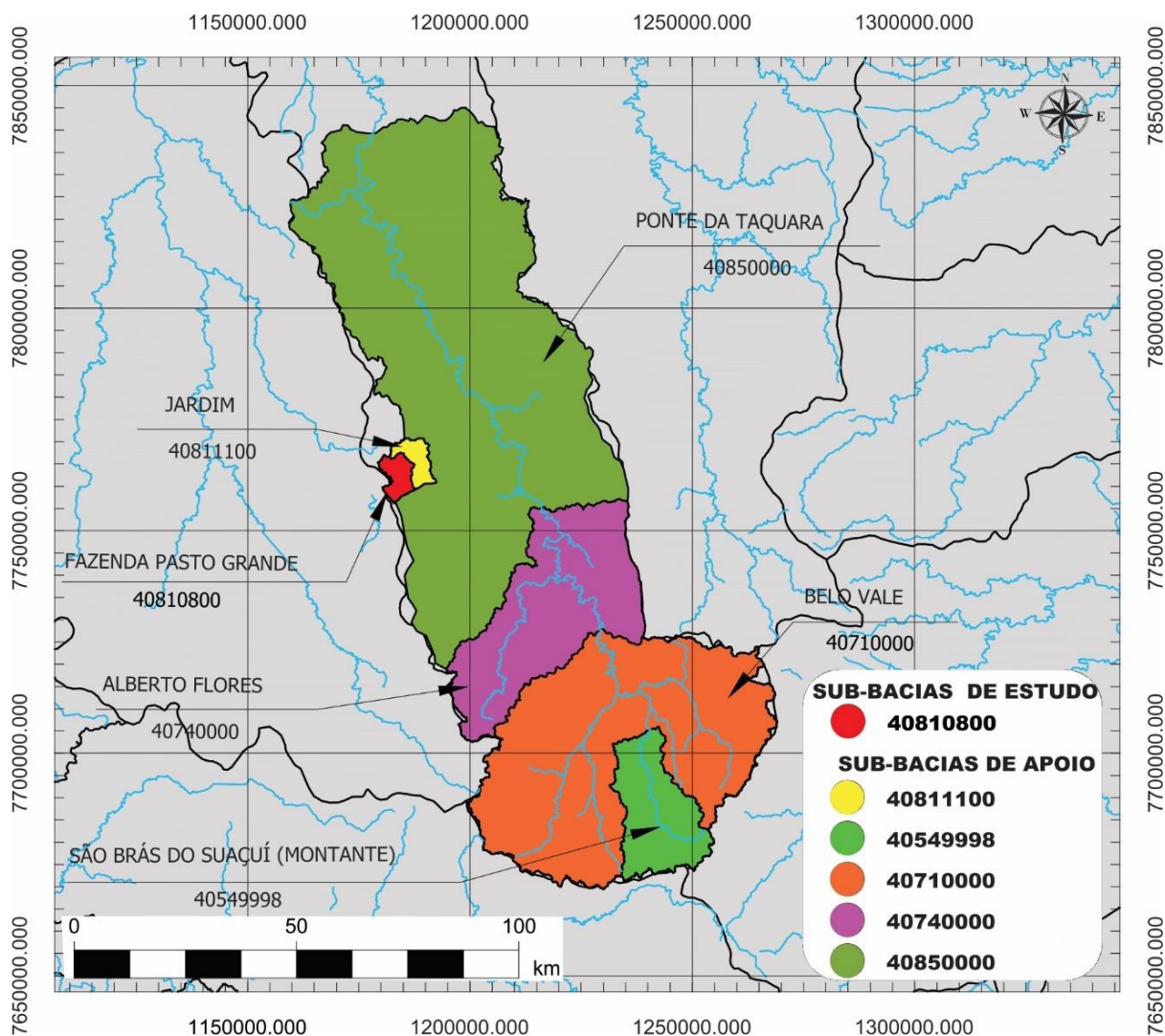
A Figura 12 ilustra a localização da Bacia do Rio Paraopeba e bacias limítrofes. A Figura 13 ilustra a bacia de estudo Fazenda Pasto Grande (40810800) e as estações de apoio com áreas de drenagem demarcadas.

Figura 12 – Localização da Bacia do Rio Paraopeba



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 – Localização da bacia de estudo da estação Fazenda Pasto Grande (40810800) e suas bacias de apoio.



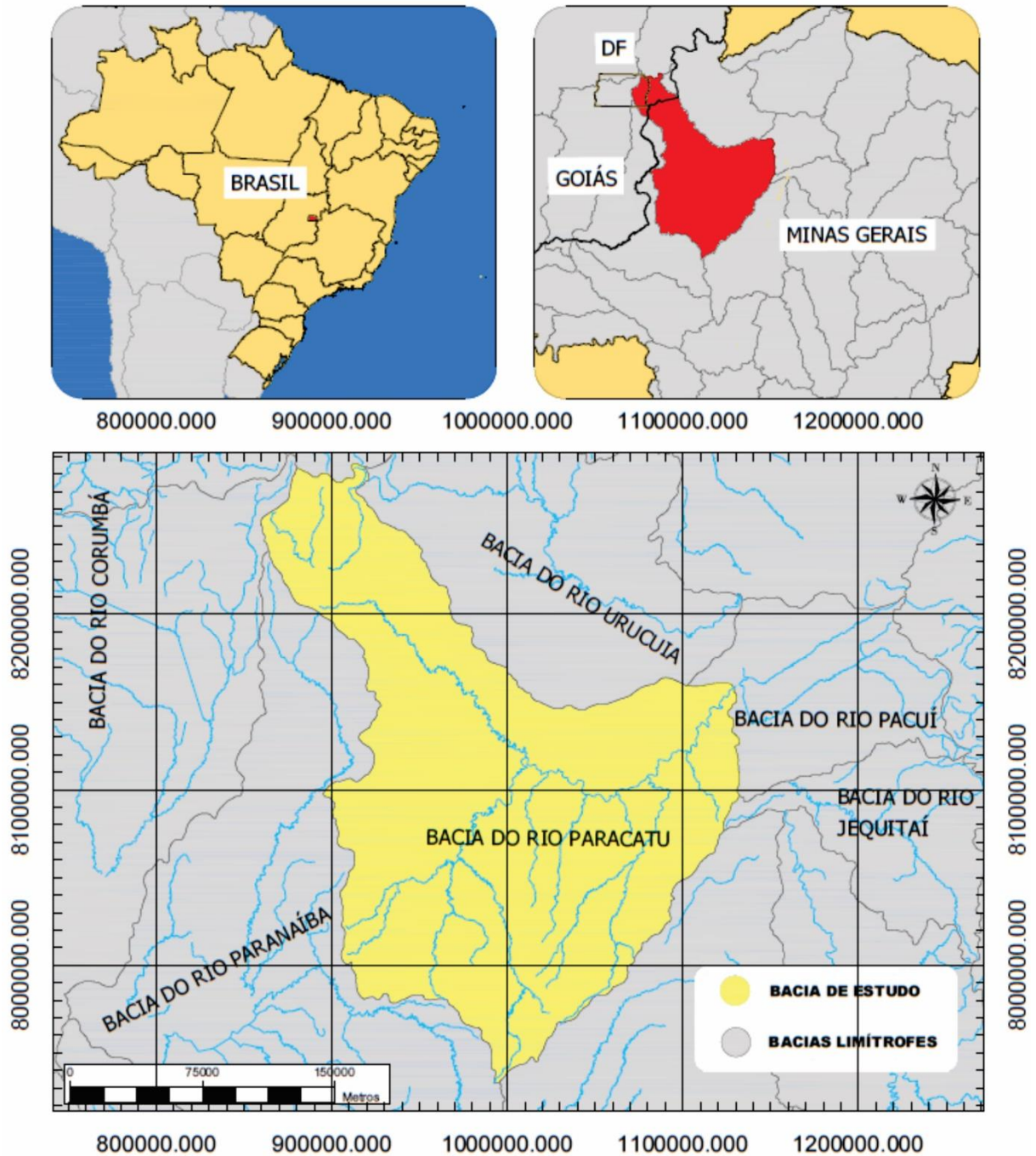
4.2 RIO PARACATU

A Bacia do Rio Paracatu possui área de 41.371,71 km², equivalente a 17,64% da área de drenagem da bacia do Rio São Francisco, ao longo de 16 municípios como: Buritizeiro, Paracatu, Patos de Minas, Unaí, entre outros. A bacia localiza-se em grande parte no estado de Minas Gerais, com pequena porção (cerca de 8,0%) no Distrito Federal. O Rio Paracatu, principal drenagem da bacia, tem comprimento de 485 km. Os usos de água na bacia hidrográfica são: abastecimento de água e diluição de efluentes, irrigação, pecuária, mineral, geração de energia e proteção da

comunidade aquática. Os principais cursos hídricos são o Rio Paracatu, Rio Preto, Rio do Sono, Rio Escuro, Ribeirão Entre-Ribeiros e Rio da Prata (IGAM, 2006).

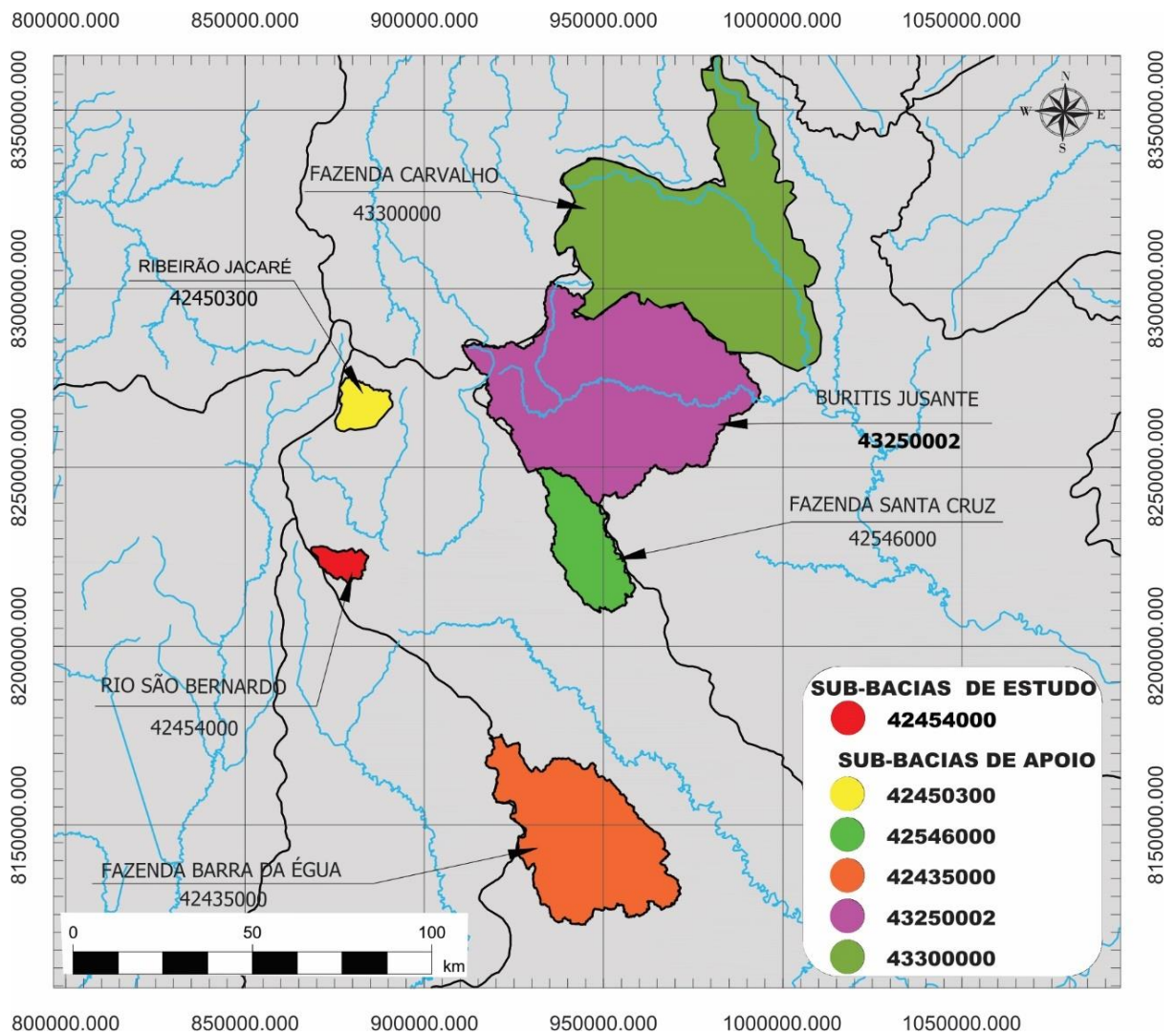
A Figura 14 ilustra a localização da Bacia do Rio Paracatu e bacias limítrofes. A Figura 15 ilustra a bacia de estudo Rio São Bernardo (42454000) e as estações de apoio com áreas de drenagem demarcadas.

Figura 14 – Localização da Bacia do Rio Paracatu



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Localização da bacia de estudo da estação Rio São Bernardo (42454000) e suas bacias de apoio

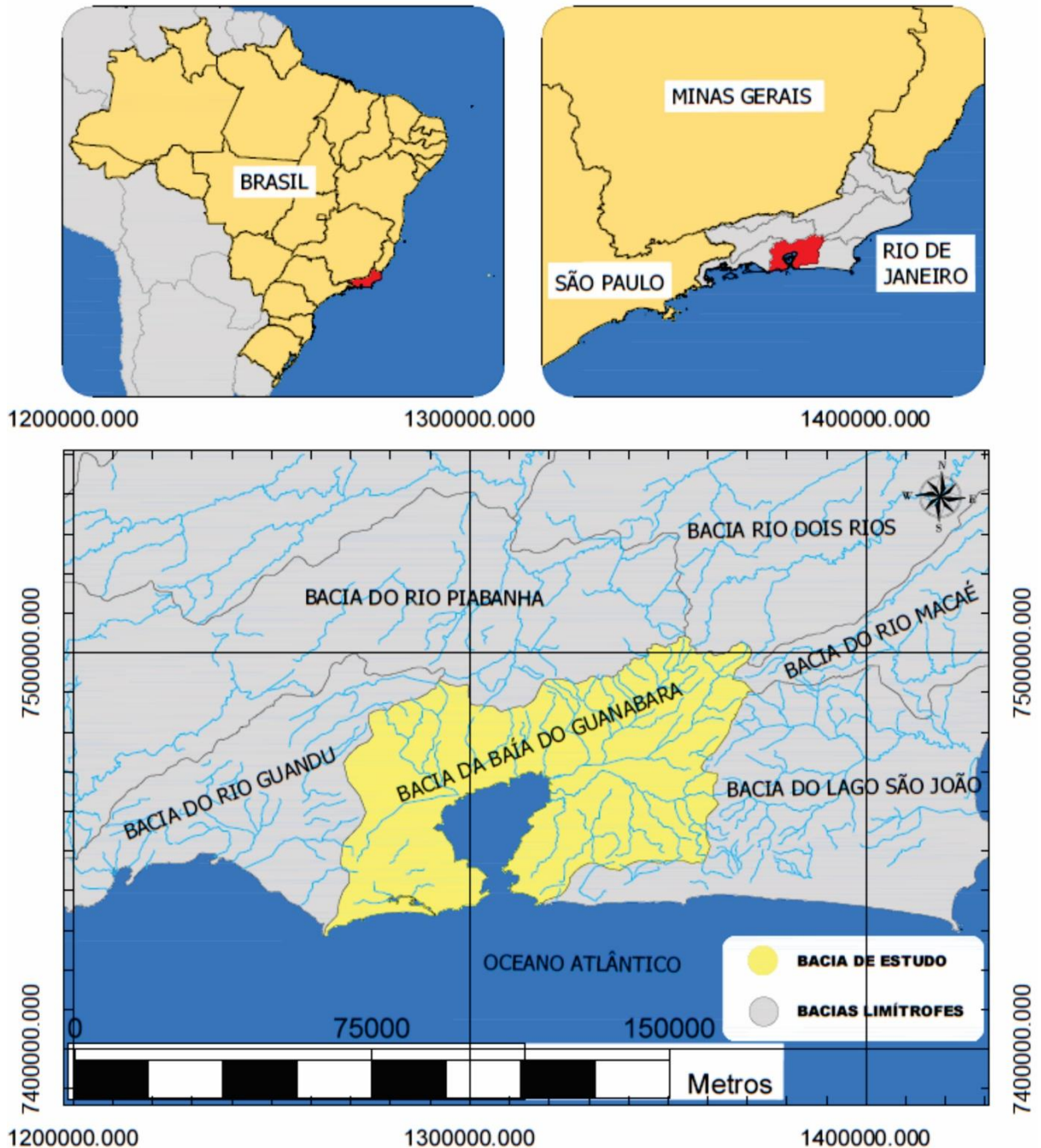


4.3 BAÍA DE GUANABARA

A bacia de drenagem da Baía da Guanabara possui área de aproximadamente 4.000 km², pertencente 16 municípios do estado do Rio de Janeiro, como a capital Rio de Janeiro, Belford Roxo, Duque de Caxias, São Gonçalo, entre outros. O principal curso hídrico da bacia é o rio Guapi-Macacu, com comprimento de 72,68 km. O uso e ocupação do solo na bacia são bastante diversificados. Os principais cursos hídricos são o rio Guapi-Macacu, rio Caceribu e rio Guaxindiba. (ROBERTO, 2009).

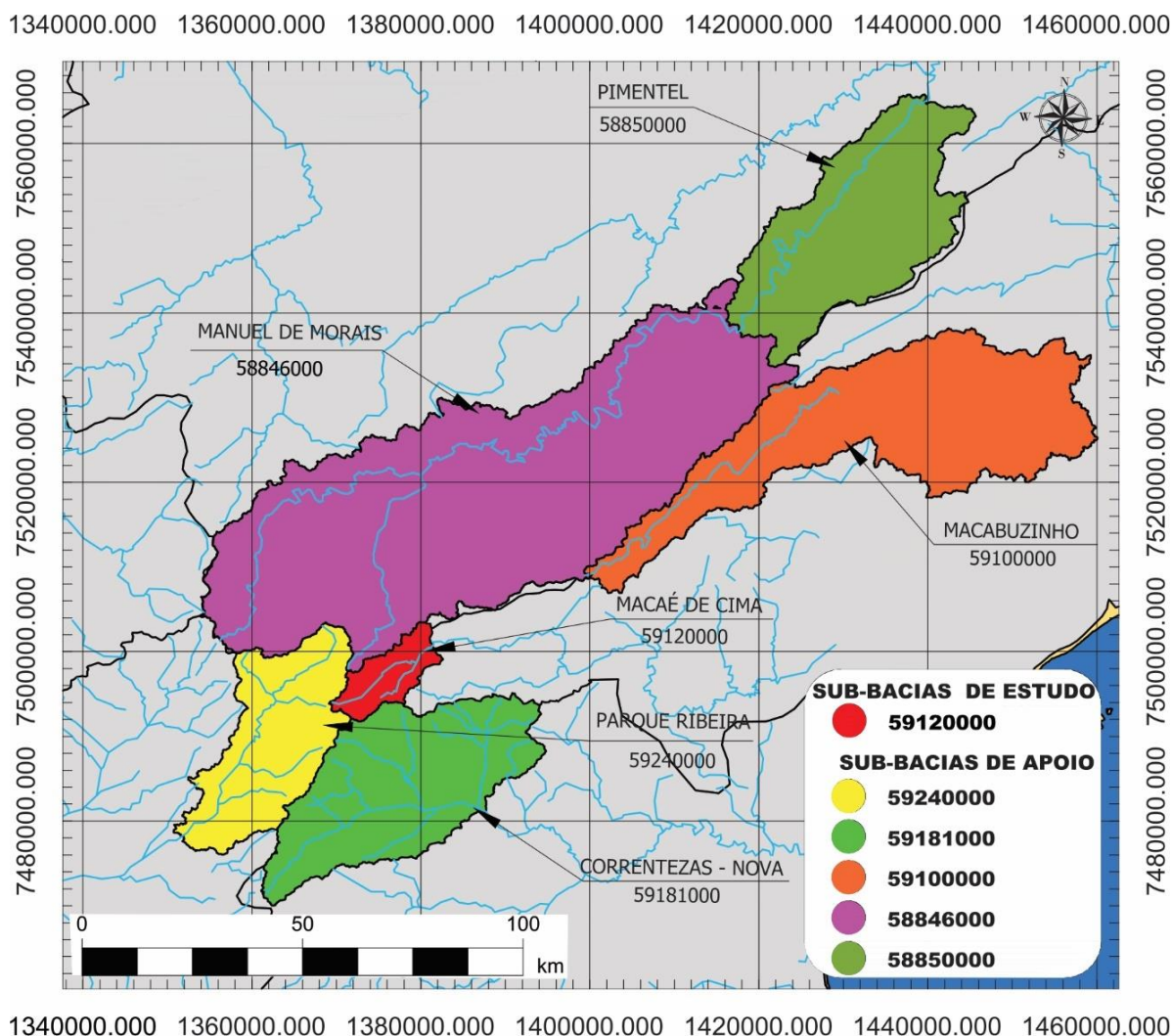
A Figura 16 ilustra a localização da bacia da Baía de Guanabara e bacias limítrofes. A Figura 17 ilustra a bacia de estudo Macaé de Cima (59120000) e as estações de apoio com áreas de drenagem demarcadas.

Figura 16 – Localização da Bacia da Baía de Guanabara



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 – Localização da bacia de estudo da estação Macaé de Cima (59120000) e suas bacias de apoio



Fonte: Elaborado pelo autor

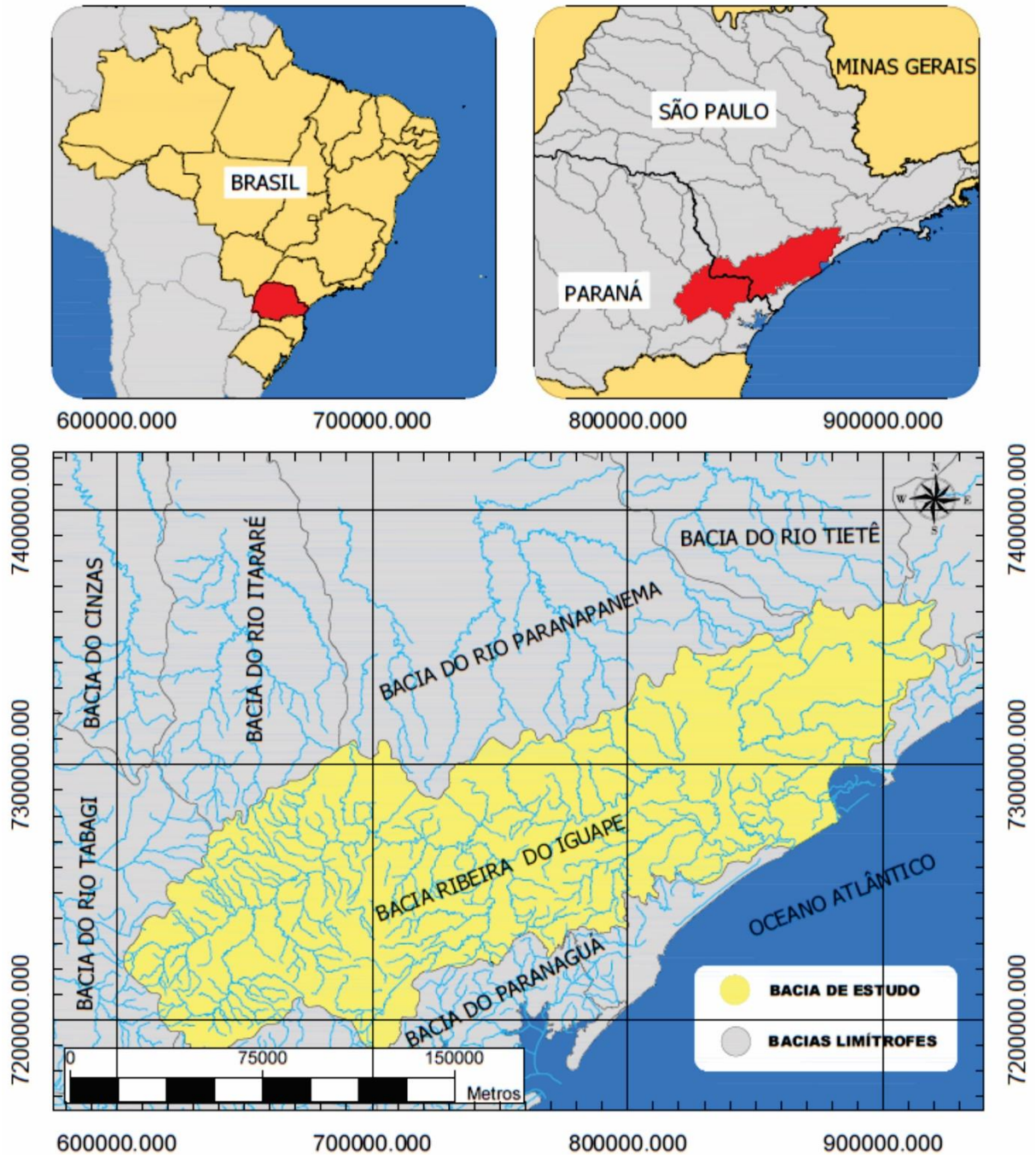
4.4 RIO RIBEIRA DO IGUAPE

A bacia do Rio Ribeira do Iguape drena uma área de 24.980 km², dividida entre os estados do Paraná e São Paulo, ao longo de 32 municípios como: Iguape, Juquiá, Registro, Rio Branco do Sul, entre outros. O Rio Ribeira do Iguape, principal drenagem da bacia, possui cerca de 470 km de comprimento, com 25,53% do percurso em território paranaense e 74,47% em território paulista, até a sua foz no oceano atlântico, no litoral paulista. A ocupação de solo da bacia caracteriza-se preferencialmente por uso rural, pois tanto a taxa de urbanização quanto a densidade demográfica da bacia hidrográfica são consideravelmente baixas em comparação com a média do estado

de São Paulo. Os principais cursos hídricos são o Rio Ribeira do Iguape, Rio Jacupiranga, Rio Juquiá e Rio São Lourenço. (SANTANA, 2008).

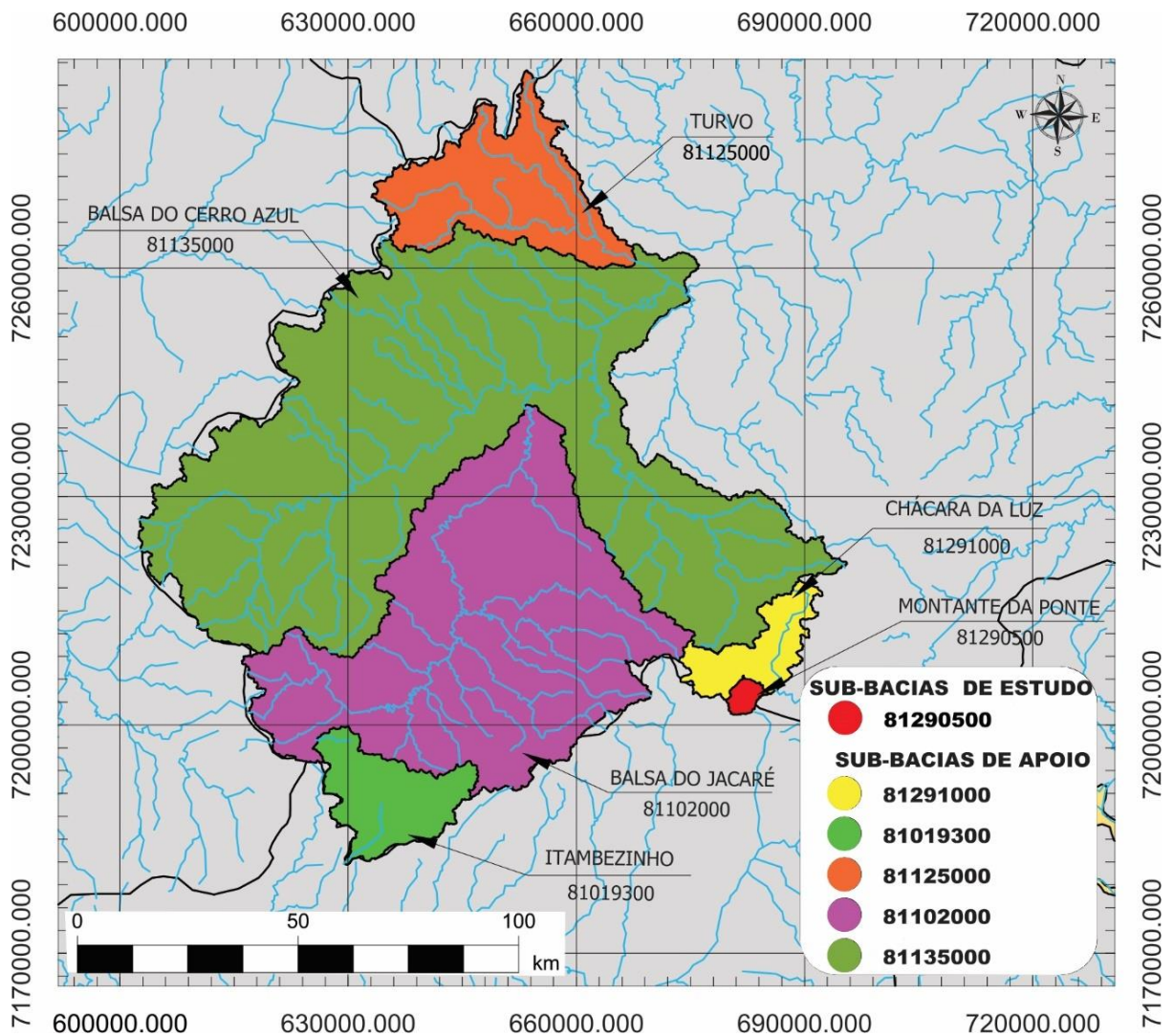
A Figura 18 ilustra a localização da bacia do Rio Ribeira do Iguape e bacias limítrofes. A Figura 19 ilustra a bacia de estudo Montante Da Ponte (81290500) e as estações de apoio com áreas de drenagem demarcadas.

Figura 18 – Localização da Bacia do Rio Ribeira do Iguape



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Localização da bacia de estudo da estação Montante Da Ponte (81290500) e suas bacias de apoio



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 RIO ITAJAÍ

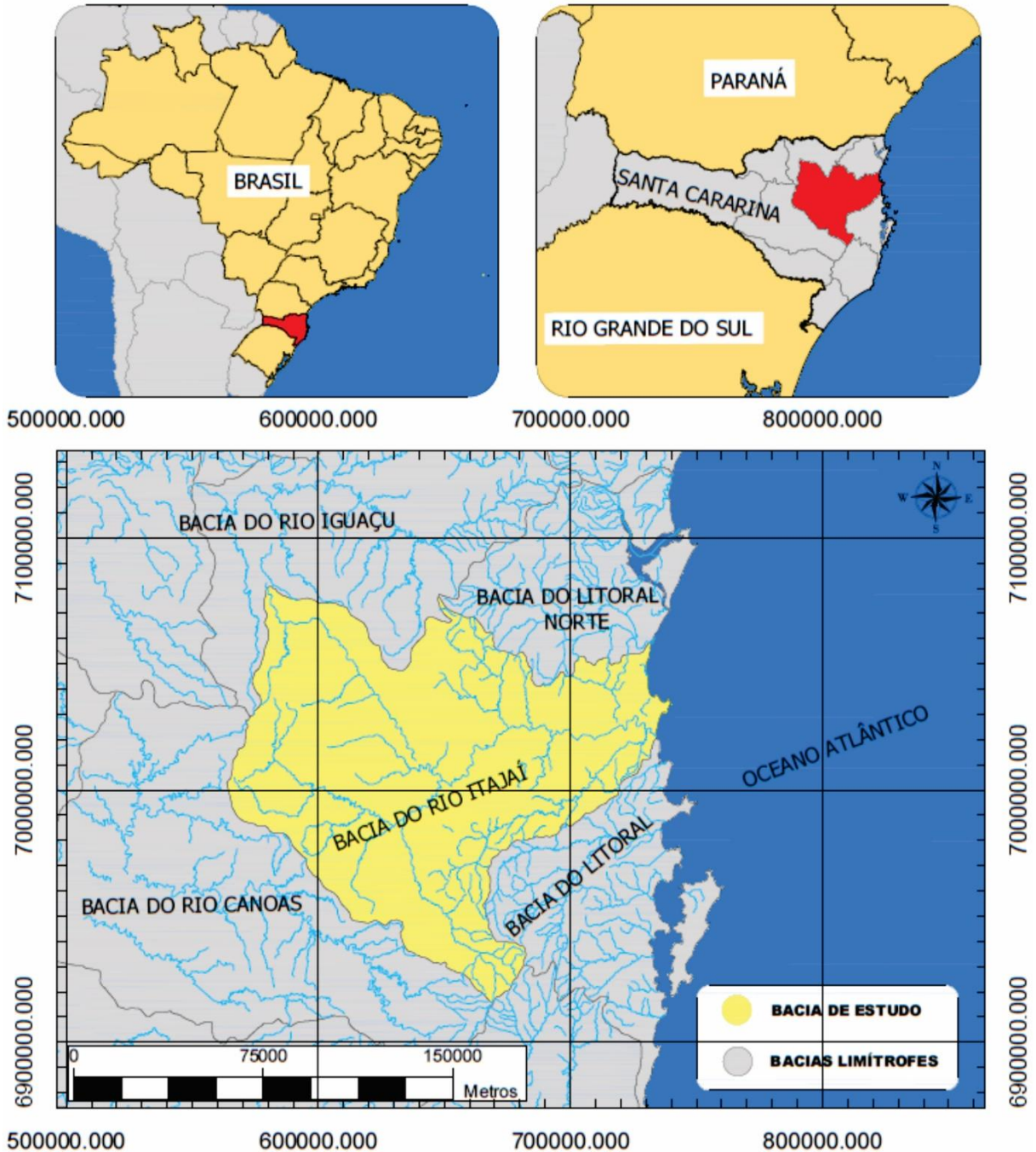
A bacia do Rio Itajaí possui área de 15.000 km², equivalente a 16,15% do território do estado de Santa Catarina, pertencente a 52 municípios como: Blumenau, Brusque, Itajaí, Ibirama, entre outros.

O Rio Itajaí-açu, principal drenagem da bacia, possui cerca de 188 km de comprimento. A população estimada da bacia hidrográfica é de mais de um milhão e cem mil habitantes e os principais usos de água são, respectivamente, abastecimento público, esgotamento sanitário, criação animal, indústria, aquicultura e irrigação. Os

principais cursos hídricos são o Rio Itajaí-açu, Rio Benedito, Rio Luís Alves e Rio Itajaí Mirim (BRANDT et al., 2010).

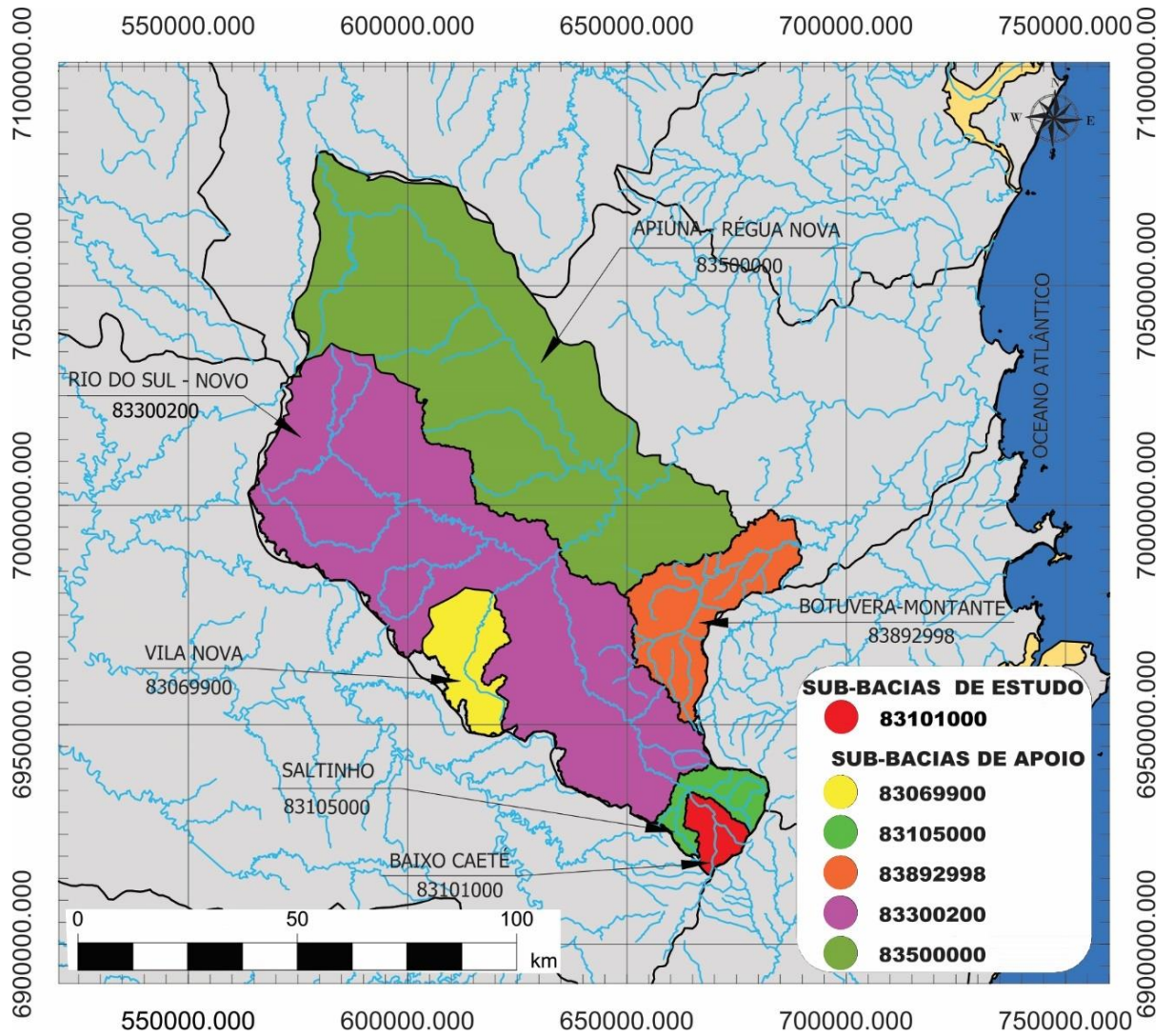
A Figura 20 ilustra a localização da bacia do Rio Itajaí e bacias limítrofes. A Figura 21 ilustra a bacia de estudo Baixo Caeté (83101000) e as estações de apoio com áreas de drenagem demarcadas.

Figura 20 – Localização da Bacia do Rio Itajaí



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 - Localização da bacia de estudo da estação Baixo Caeté (83101000) e suas bacias de apoio



Fonte: Elaborado pelo autor

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo são produto da análise nas cinco regiões de estudo. Com as vazões de referência obtidas por meio da curva de permanência e com a determinação das variáveis explicativas, foram estimadas as vazões regionalizadas pelos métodos de interpolação linear e equação regional.

5.1 VAZÕES DE REFERÊNCIA REAIS DA CURVA DE PERMANÊNCIA

A Tabela 7 traz um resumo das estações fluviométricas de estudo com o período de tempo da série de dados de vazão.

Tabela 7 – Tamanho da série de vazões das estações de estudo

Código	Nome	Área de drenagem (km ²)	Início da série	Final da série	Tamanho da série (anos)
40810800	Fazenda Pasto Grande	54,7	24/05/1978	30/04/2019	40,93
42454000	Rio São Bernardo	98,7	20/03/2006	31/01/2019	12,87
59120000	Macaé de Cima	67,0	21/05/1967	30/04/2019	51,94
81290500	Montante da Ponte	17,0	08/07/1997	31/12/2010	13,48
83101000	Baixo Caeté	165,0	01/01/2005	31/12/2014	10,0

Fonte: Elaborado pelo autor

A série de dados das estações de apoio foram ajustadas para o mesmo período de tempo das séries de estudo. No APÊNDICE A constam as confrontações das curvas de permanência de cada região de estudo.

Devido à baixa porcentagem de falhas nos dados das séries de vazão, evitou-se o preenchimento das séries com o objetivo de não criar tendenciosidade nos resultados.

Portanto, as vazões de referência reais Q_{90} e Q_{95} das estações de estudo e de apoio determinadas por meio das curvas de permanência, constam, respectivamente, na Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Vazões de referência reais Q_{90} e Q_{95} das estações de estudo

Estação	Área de drenagem calculada (km ²)	Q_{90} (m ³ /s)	Q_{95} (m ³ /s)
40810800	55,08	0,17	0,08
42454000	69,12	0,23	0,16
59120000	66,75	1,03	0,88
81290500	16,43	0,10	0,08
83101000	156,64	0,23	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9 – Vazões de referência reais Q_{90} e Q_{95} das estações de apoio

Estação	Área de drenagem calculada (km ²)	Q_{90} (m ³ /s)	Q_{95} (m ³ /s)
40811100	112,95	0,35	0,22
40549998	461,05	2,36	1,99
40710000	2765,11	15,41	12,33
40740000	3958,70	19,73	16,27
40850000	8661,15	32,61	24,89
42450300	163,31	0,85	0,71
42546000	551,15	0,89	0,71
42435000	1554,81	1,36	0,91
43250002	2978,36	3,30	2,29
43300000	3159,28	5,59	3,52
59240000	288,43	3,51	2,97
59181000	428,82	6,21	5,28
59100000	632,95	2,40	1,97
58846000	1370,70	10,12	8,58
58850000	1812,09	10,82	9,26
81291000	125,43	1,10	1,10
81019300	200,47	1,30	1,06
81125000	398,34	4,77	4,15
81102000	1651,00	15,50	13,90
81135000	4544,23	46,44	42,22
83069900	397,00	1,42	0,91
83105000	434,00	1,62	1,27
83892998	827,00	5,42	4,44
83300200	5160,00	25,89	20,26
83500000	9070,00	39,15	24,04

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS E COMPARATIVO ENTRE ÁREAS DE DRENAGEM

ANA (2013b) estabelece que fica a cargo das responsáveis pela instalação das estações hidrométricas as informações a serem inseridas no banco de dados do *HidroWeb*. Nesse caso, o manual de instalação exige a apresentação da metodologia de cálculo e o resultado de área de drenagem para a estação cadastrada, assim como outras informações pertinentes.

Na Tabela 10 consta o erro relativo percentual entre a diferença da área de drenagem cadastrada e calculada.

Tabela 10 – Confrontação entre as áreas de drenagem disponibilizadas no portal *HidroWeb* e as áreas de drenagem calculadas

Estação	Área de Drenagem <i>HidroWeb</i> (km ²)	Área de Drenagem Calculada (km ²)	Erro Relativo	Estação	Área de Drenagem <i>HidroWeb</i> (km ²)	Área de Drenagem Calculada (km ²)	Erro Relativo
40810800	54,70	55,08	0,70%	59100000	630,00	632,95	0,47%
40811100	113,00	112,95	0,05%	58846000	1370,00	1370,70	0,05%
40549998	462,00	461,05	0,21%	58850000	1810,00	1812,09	0,12%
40710000	2770,00	2765,11	0,18%	81290500	17,00	16,43	3,35%
40740000	4120,00	3958,70	3,92%	81291000	128,00	125,43	2,01%
40850000	8750,00	8661,15	1,02%	81019300	212,00	200,47	5,44%
42454000	98,70	69,12	29,97%	81125000	400,00	398,34	0,42%
42450300	163,00	163,31	0,19%	81102000	1700,00	1651,00	2,88%
42546000	553,00	551,15	0,33%	81135000	4600,00	4544,23	1,21%
42435000	1590,00	1554,81	2,21%	83101000	165,00	156,64	5,07%
43250002	3020,00	2978,36	1,38%	83069900	397,00	416,82	4,99%
43300000	3160,00	3159,28	0,02%	83105000	434,00	401,55	7,48%
59240000	289,00	288,43	0,38%	83892998	827,00	790,64	4,40%
59120000	67,00	66,75	0,20%	83300200	5160,00	4994,72	3,20%
59181000	404,00	428,82	6,14%	83500000	9070,00	9174,11	1,15%

Fonte: Elaborado pelo autor

No total foram calculadas 30 áreas de drenagem, sendo cinco provenientes das estações de estudo e 25 estações de apoio. Em suma, não foi observado nenhum desvio considerável entre as áreas de drenagem cadastrada e calculada, com exceção da estação de estudo Rio São Bernardo (42454000), com erro de 29,97%. O erro relativo médio das 30 confrontações é de 2,97%, com desvio padrão de 5,44%.

Bazzo et al., (2017) realizaram um estudo de regionalização da Q₉₅ em 18 estações da bacia do rio Taquari-Antas. Foi adotado o método de cálculo das áreas de drenagem para a criação do MDE a partir de mosaico SRTM com resolução espacial de 90,0 metros. As áreas de drenagem foram calculadas com a mesma metodologia deste trabalho, por meio da ferramenta *ArchHydro* do software ArcGis®ArcMapTM. O erro relativo médio das 18 confrontações foi de 11,90%, com desvio padrão de 14,40%.

A Tabela 11 apresenta os resultados das variáveis explicativas calculadas para as 30 estações fluviométricas (cinco estações de estudo e 25 estações de apoio) das cinco regiões de estudo.

Tabela 11 – Variáveis explicativas das estações fluviométricas de estudo

Região	Estação	Área de drenagem (km ²)	Perímetro de bacia (km)	Coefficiente de compacidade	Comprimento do rio principal (km)	Comprimento dos cursos hídricos (km)	Declividade do rio Principal (%)	Densidade de drenagem (km/km ²)	Fator de forma	Precipitação Média anual (mm)	Curve Number médio (CN)
Rio Paraopeba	40810800	55,08	51,72	1,95	10,50	38,96	3,71	0,71	0,50	1499,26	60,62
	40811100	112,95	70,00	1,84	17,19	82,08	2,46	0,73	0,38	1499,55	60,64
	40549998	461,05	166,26	2,17	45,66	340,00	0,62	0,74	0,22	1500,00	75,53
	40710000	2765,11	374,10	1,99	96,42	2187,43	0,36	0,79	0,30	1500,64	78,68
	40740000	3958,70	495,12	2,20	161,41	2032,83	0,24	0,51	0,15	1503,37	74,99
	40850000	8661,15	644,43	1,94	332,41	6388,36	0,15	0,74	0,08	1478,68	66,05
Rio Paracatu	42454000	98,7	69,00	2,32	19,58	59,95	0,92	0,87	0,18	1537,57	66,96
	42450300	163,00	55,90	1,22	18,87	61,37	1,60	0,38	0,46	1580,35	62,83
	42546000	553,00	182,70	2,18	57,70	406,25	0,60	0,74	0,17	1553,19	71,98
	42435000	1590,00	333,66	2,37	117,97	1071,76	0,37	0,69	0,11	1383,49	52,24
	43250002	3020,00	439,50	2,25	136,20	2086,86	0,36	0,70	0,16	1499,66	71,39
	43300000	3160,00	341,95	1,70	124,33	2010,30	0,40	0,64	0,20	1325,63	67,31
Baía de Guanabara	59120000	66,75	59,04	2,02	15,36	42,62	4,08	0,64	0,28	2430,97	76,02
	59240000	288,43	130,74	2,16	36,72	207,91	5,23	0,72	0,21	2282,11	77,78
	59181000	428,82	143,88	1,95	30,92	324,61	1,25	0,76	0,45	2060,80	80,73
	59100000	632,95	256,02	2,85	86,44	455,97	1,64	0,72	0,08	1480,22	71,34
	58846000	1370,70	321,90	2,43	127,57	1004,53	0,74	0,73	0,08	1495,82	80,76
	58850000	1812,09	428,94	2,82	180,05	1333,50	0,63	0,74	0,06	1445,64	79,14
Rio Ribeira do Iguape	81290500	16,43	24,71	1,71	5,46	15,18	1,98	0,92	0,55	1400,00	78,41
	81291000	125,43	108,18	2,70	18,56	136,70	1,03	1,09	0,36	1400,00	78,41
	81019300	200,47	113,04	2,24	26,97	214,15	1,13	1,07	0,28	1434,51	78,84
	81125000	398,34	190,68	2,68	50,10	407,61	1,21	1,02	0,16	1400,00	76,54
	81102000	1651,00	339,30	2,34	101,20	1728,63	0,59	1,05	0,16	1454,16	80,53
	81135000	4544,23	637,86	2,65	129,91	4718,59	0,53	1,04	0,27	1426,59	77,06
Rio Itajaí	83101000	156,64	79,00	1,77	22,76	100,59	2,17	0,64	0,30	1698,61	79,68
	83069900	416,82	151,78	2,08	38,37	230,28	1,39	0,55	0,28	1572,17	84,08
	83105000	401,55	115,86	1,62	28,29	262,88	1,78	0,65	0,50	1657,57	81,67
	83892998	790,64	235,38	2,34	85,43	530,81	1,08	0,67	0,11	1540,43	84,65
	83300200	4994,72	627,00	2,48	129,90	3227,31	0,45	0,65	0,30	1575,94	86,93
	83500000	9174,11	568,00	1,66	193,84	6348,71	0,50	0,69	0,24	1563,96	86,70

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 REGIONALIZAÇÃO POR INTERPOLAÇÃO LINEAR

Com os dados de área de drenagem estabelecidos, foram obtidas as vazões de referência pela interpolação direta por proporção de áreas de drenagem, conforme os dados da Tabela 12. Os erros relativos percentuais negativos significam que as vazões foram superestimadas; já os erros relativos percentuais positivos significam que as vazões foram subestimadas.

Tabela 12 – Q_{95} regionalizada por interpolação direta de área de drenagem

Estação de estudo	Q_{95} real (m ³ /s)	Estação de apoio	Q_{95} regionalizada (m ³ /s)	Diferença entre área de drenagem de estudo e apoio (km ² /km ²)	Erro relativo percentual
40810800	0,08	40811100	0,11	2,05	-34,15%
		40549998	0,24	8,37	-192,68%
		40710000	0,25	50,20	-204,88%
		40740000	0,23	71,87	-180,49%
		40850000	0,16	157,23	-95,12%
42454000	0,16	42450300	0,30	2,36	-91,08%
		42546000	0,09	7,97	42,68%
		42435000	0,04	22,49	74,52%
		43250002	0,05	43,09	68,15%
		43300000	0,08	45,71	49,04%
59240000	0,88	59120000	0,69	4,32	21,41%
		59181000	0,82	6,42	6,61%
		59100000	0,21	9,48	76,08%
		58846000	0,42	20,54	52,16%
		58850000	0,34	27,15	61,28%
81290500	0,08	81291000	0,14	7,63	-75,00%
		81019300	0,09	12,20	-12,50%
		81125000	0,17	24,24	-112,50%
		81102000	0,14	100,49	-75,00%
		81135000	0,15	276,58	-87,50%
83101000	0,17	83069900	0,34	2,66	-106,06%
		83105000	0,50	2,56	-203,03%
		83892998	0,88	5,05	-433,33%
		83300200	0,64	31,89	-287,88%
		83500000	0,41	58,57	-148,48%

Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 6 ilustra a relação entre o erro relativo normalizado entre a vazão real e a vazão regionalizada no eixo vertical, pela diferença da área de drenagem da estação de estudo e as estações de apoio no eixo horizontal, discriminados por região de estudo.

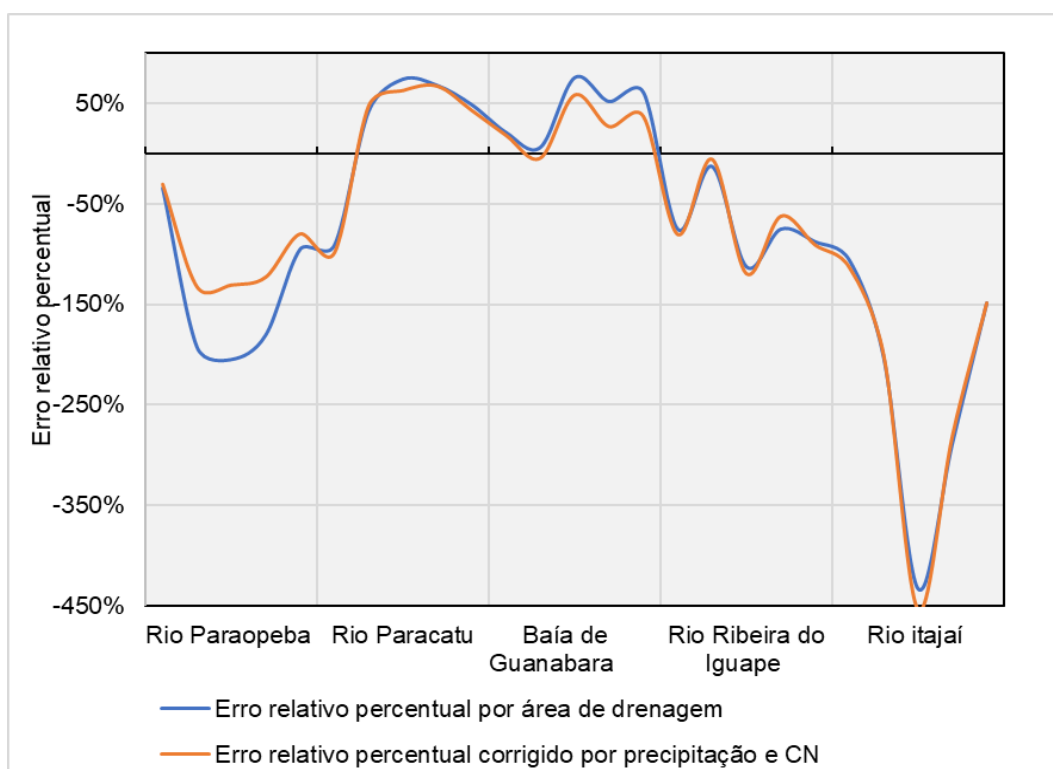
Tabela 13 – Q_{95} regionalizada por interpolação direta de área de drenagem corrigida por precipitação e *Curve Number*

Estação de estudo	Q_{95} real (m ³ /s)	Estação de apoio	Q_{95} regionalizada (m ³ /s)	Erro relativo percentual por área de drenagem	Erro relativo percentual corrigido por precipitação e CN	Redução do erro relativo após correção
40810800	0,08	40811100	0,11	-34,15%	-30,18%	3,96%
		40549998	0,19	-192,68%	-132,35%	60,33%
		40710000	0,19	-204,88%	-130,47%	74,40%
		40740000	0,18	-180,49%	-122,59%	57,89%
		40850000	0,15	-95,12%	-79,64%	15,49%
42454000	0,16	42450300	0,31	-91,08%	-98,46%	-7,37%
		42546000	0,08	42,68%	47,92%	-5,24%
		42435000	0,06	74,52%	63,13%	11,39%
		43250002	0,05	68,15%	67,45%	0,71%
		43300000	0,09	49,04%	43,40%	5,64%
59240000	0,88	59120000	0,72	21,41%	18,47%	2,94%
		59181000	0,91	6,61%	-4,04%	2,57%
		59100000	0,36	76,08%	58,65%	17,43%
		58846000	0,64	52,16%	27,21%	24,96%
		58850000	0,55	61,28%	37,26%	24,02%
81290500	0,08	81291000	0,14	-75,00%	-80,11%	-5,11%
		81019300	0,08	-12,50%	-5,40%	7,10%
		81125000	0,18	-112,50%	-119,18%	-6,68%
		81102000	0,13	-75,00%	-62,09%	12,91%
		81135000	0,15	-87,50%	-90,53%	-3,03%
83101000	0,17	83069900	0,35	-106,06%	-113,13%	-7,07%
		83105000	0,50	-203,03%	-200,66%	2,37%
		83892998	0,91	-433,33%	-453,46%	-20,13%
		83300200	0,63	-287,88%	-280,35%	7,53%
		83500000	0,41	-148,48%	-148,29%	0,19%

Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 7 ilustra comparação entre as curvas de erros relativos. A curva azul representa o erro relativo percentual da regionalização linear que considera somente área de drenagem. A curva laranja representa o erro relativo percentual da regionalização linear de área de drenagem corrigida por precipitação e coeficiente *Curve Number*.

Gráfico 7 – Erro relativo percentual (%) das vazões de referência pela diferença de área de drenagem (km^2/km^2)



Fonte: Elaborado pelo autor

A inserção das variáveis explicativas de precipitação e coeficiente CN auxiliaram na redução do erro relativo das vazões de estiagem. A redução média do erro foi de 11,09%, porém, em algumas estações a redução foi significativa e em outras a diferença foi levemente aumentada. A estação 40710000 obteve aproximação da Q_{95} real em 68,95%. A região no qual a metodologia de correção alcançou maior eficácia foi a do rio Paraopeba, com redução média do erro de 42,41%; a região da Baía de Guanabara também obteve redução média considerável de 14,38%. Em compensação, na região do rio Itajaí, na média das estações, teve um pequeno aumento do desvio da vazão real para a vazão regionalizada em 3,42%. Por fim, as regiões do rio Paracatu e rio Ribeira do Iguape atingiram pequena redução média do erro em torno de 1,00%.

A Tabela 14 apresenta a proporção entre a vazão real e a vazão regionalizada e proporção média por região. Por meio da proporcionalidade entre as vazões é possível estabelecer o quanto a vazão regionalizada por bacias média e grandes representa em relação a vazão real de estiagem da pequena bacia hidrográfica. Quanto mais próximo de 1,0, maior o índice de proporção entre as vazões.

Tabela 14 – Q_{95} regionalizada por interpolação direta de área de drenagem corrigida por precipitação e *Curve Number*

Estação de estudo	Região de estudo	Q_{95} real (m ³ /s)	Estação de apoio	Q_{95} regionalizada (m ³ /s)	Proporção entre Q_{95} real / Q_{95} regionalizada	Proporção média por região
40810800	Rio Paraopeba	0,08	40811100	0,11	0,73	0,51
			40549998	0,19	0,42	
			40710000	0,19	0,42	
			40740000	0,18	0,44	
			40850000	0,15	0,53	
42454000	Rio Paracatu	0,16	42450300	0,31	0,52	2,03
			42546000	0,08	2,00	
			42435000	0,06	2,67	
			43250002	0,05	3,20	
			43300000	0,09	1,78	
59240000	Baía de Guanabara	0,88	59120000	0,72	1,22	1,52
			59181000	0,91	0,97	
			59100000	0,36	2,44	
			58846000	0,64	1,38	
			58850000	0,55	1,60	
81290500	Rio Ribeira do Iguape	0,08	81291000	0,14	0,57	0,63
			81019300	0,08	1,00	
			81125000	0,18	0,44	
			81102000	0,13	0,62	
			81135000	0,15	0,53	
83101000	Rio Itajaí	0,17	83069900	0,35	0,49	0,34
			83105000	0,50	0,34	
			83892998	0,91	0,19	
			83300200	0,63	0,27	
			83500000	0,41	0,41	

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta metodologia, a região do rio Ribeira do Iguape atingiu a melhor proporção média entre as regiões de estudo. O índice indica que, na média, a vazão real da estação de estudo é cerca de dois terços da vazão regionalizada, com desvio padrão de 0,19. Conclui-se, também, que na região do Rio Itajaí a vazão real é da ordem de um terço da vazão regionalizada, com desvio padrão de 0,10, e na região do rio Paraopeba a vazão real é metade da vazão regionalizada, com desvio padrão de 0,12. A vazão real da estação de estudo da região do rio Paracatu representa, em média, o dobro da vazão regionalizada, contudo, o desvio padrão é de 0,91. Por fim, a região da Baía de Guanabara tem a vazão real da pequena bacia de estudo equivalente a 1,5 vezes a vazão regionalizada, com desvio padrão de 0,50.

Por ser um método que considera a interpolação linear de grandezas de variáveis, o erro relativo tende a ser semelhante para regionalização de outras vazões de referência, como a Q_{90} .

5.4 REGIONALIZAÇÃO POR EQUAÇÃO REGIONAL

5.4.1 Equação Regional por Regressão Simples Potencial

Foram criadas equações de regressão do tipo potencial para cada variável explicativa, isoladamente, em cada região de estudo. Com isso, foi possível estabelecer o coeficiente de determinação de cada equação regional para o cálculo das vazões de referência. Na Tabela 15 e Tabela 16 apresentam-se os coeficientes de determinação da equação regional para a Q_{90} e Q_{95} , respectivamente.

Tabela 15 – Coeficientes de determinação para as variáveis explicativas das equações de regressão para vazão de referência Q_{90}

Estação	Q_{90}									
	Ad (km ²)	Pm (km)	L (km)	$\sum L$ (km)	Sm (%)	Dd (km/km ²)	Kc	Kf	P médio (mm)	CN médio
40810800	0,99	0,99	0,14	0,94	0,96	0,51	0,00	0,66	0,16	0,28
42454000	0,74	0,50	0,03	0,53	0,42	0,25	0,04	0,06	0,51	0,06
59120000	0,52	0,30	0,00	0,25	0,56	0,40	0,03	0,07	0,10	0,67
81290500	0,98	0,99	0,02	0,97	0,76	0,68	0,00	0,00	0,18	0,01
83101000	0,97	0,96	0,02	0,94	0,92	0,74	0,08	0,05	0,20	0,80
Média	0,84	0,75	0,04	0,72	0,72	0,52	0,01	0,17	0,23	0,36

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16 -- Coeficientes de determinação para as variáveis explicativas das equações de regressão para vazão de referência Q_{95}

Estação	Q_{95}									
	Ad (km ²)	Pm (km)	L (km)	$\sum L$ (km)	Sm (%)	Dd (km/km ²)	Kc	Kf	P médio (mm)	CN médio
40810800	0,97	0,99	0,93	0,96	0,53	0,00	0,17	0,67	0,14	0,31
42454000	0,68	0,44	0,46	0,59	0,24	0,04	0,01	0,06	0,44	0,10
59120000	0,51	0,29	0,24	0,53	0,40	0,03	0,00	0,07	0,10	0,68
81290500	0,98	0,99	0,95	0,98	0,68	0,00	0,03	0,00	0,17	0,01
83101000	0,94	0,95	0,92	0,95	0,80	0,08	0,03	0,05	0,19	0,77
Média	0,82	0,73	0,70	0,80	0,53	0,01	0,05	0,17	0,21	0,38

Fonte: Elaborado pelo autor

De forma geral, as equações que definem as vazões de 90% de permanência obtiveram coeficientes de determinação levemente superior em relação as vazões de 95% de permanência. De acordo com Tucci (2002), as vazões da curva de permanência com área de drenagem fora do intervalo de grandeza das estações usadas na equação de regressão possuem tendência de apresentar maior erro relativo. Ou seja, ao regionalizar a vazão para uma estação de área pequena com estações que possuem áreas de médio e grande porte, a extrapolação pode produzir erros consideráveis.

As variáveis com maior determinação para Q_{90} foram área de drenagem, perímetro da bacia e declividade média do rio principal; para a Q_{95} as maiores correlações foram para área de drenagem e comprimento dos cursos hídricos. A Tabela 17 apresenta os resultados da aplicação da equação regional elaborada pela variável área de drenagem.

Tabela 17 – Resultados da equação regional com variável área de drenagem (Ad)

Estação	Equação regional	Vazão real (m³/s)	Vazão regionalizada (m³/s)	Erro relativo percentual (%)	R²
40810800	$Q_{90} = 0,0028 \cdot Ad^{1,0602}$	0,17	0,20	-17,65%	0,986
	$Q_{95} = 0,0017 \cdot Ad^{1,0985}$	0,08	0,14	-75,00%	0,975
42454000	$Q_{90} = 0,0338 \cdot Ad^{0,571}$	0,23	0,38	-65,22%	0,740
	$Q_{95} = 0,0446 \cdot Ad^{0,4842}$	0,16	0,35	-118,75%	0,684
59120000	$Q_{90} = 0,0980 \cdot Ad^{0,616}$	1,03	1,30	-26,21%	0,524
	$Q_{95} = 0,0798 \cdot Ad^{0,6215}$	0,88	1,09	-23,86%	0,512
81290500	$Q_{90} = 0,0061 \cdot Ad^{1,0653}$	0,10	0,12	-20,00%	0,984
	$Q_{95} = 0,0055 \cdot Ad^{1,0623}$	0,08	0,11	-37,50%	0,977
83101000	$Q_{90} = 0,0035 \cdot Ad^{1,037}$	0,23	0,66	-186,96%	0,971
	$Q_{95} = 0,0031 \cdot Ad^{1,0082}$	0,17	0,51	-200,00%	0,941

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse método todas as vazões regionalizadas apresentaram superestimação em relação à vazão real. A média da diferença entre vazão real e vazão regionalizada das cinco estações de estudo indica para a Q_{90} o erro relativo de 63,21%. Para Q_{95} o erro relativo médio é de 91,02%. Os valores do coeficiente de determinação indicam que a maioria das equações são representativas, com exceção da região da Baía de Guanabara.

Os maiores valores médios de coeficiente de correlação foram utilizados para criar as equações regionais de regressão simples do tipo potencial. Para Q_{90} foi utilizada a variável declividade média do rio principal (Tabela 18) e para a Q_{95} com a variável do somatório dos comprimentos dos cursos hídricos (Tabela 19).

Tabela 18 – Resultados da equação regional para Q_{90} com variável declividade média do rio principal (S_m)

Estação	Equação regional	Vazão real (m ³ /s)	Vazão regionalizada (m ³ /s)	Erro relativo percentual (%)	R ²
40810800	$Q_{90} = 1,5807 \cdot S_m^{1,707}$	0,17	0,35	-105,88%	0,961
42454000	$Q_{90} = 1,085 \cdot S_m^{-0,856}$	0,23	1,16	-404,35%	0,416
59120000	$Q_{90} = 6,8264 \cdot S_m^{-0,59}$	1,03	2,98	-189,32%	0,565
81290500	$Q_{90} = 3,0276 \cdot S_m^{-3,594}$	0,10	0,26	-160,00%	0,757
83101000	$Q_{90} = 4,2944 \cdot S_m^{-2,836}$	0,23	0,48	-108,70%	0,923

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19 – Resultados da equação regional para Q_{90} com variável somatório do comprimento dos cursos hídricos ($\sum L$)

Estação	Equação regional	Vazão real (m ³ /s)	Vazão regionalizada (m ³ /s)	Erro relativo percentual (%)	R ²
40810800	$Q_{95} = 0,0022 \cdot \sum L^{1,1137}$	0,08	0,13	-62,50%	0,964
42454000	$Q_{95} = 0,1091 \cdot \sum L^{0,3829}$	0,16	0,52	-225,00%	0,586
59120000	$Q_{95} = 0,0912 \cdot \sum L^{0,6309}$	0,88	0,97	-10,23%	0,529
81290500	$Q_{95} = 0,0049 \cdot \sum L^{1,0724}$	0,08	0,09	-12,50%	0,975
83101000	$Q_{95} = 0,0059 \cdot \sum L^{0,9809}$	0,17	0,54	-217,65%	0,952

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como para a variável área de drenagem, todas as equações de regressão simples com uso da declividade média do rio principal ou somatório do comprimento dos cursos hídricos apresentam superestimação das vazões regionalizadas em comparação com a vazão real das estações de estudo. Para a vazão de 90% de permanência a equação regional simples com variável declividade média do rio principal não apresentou bons resultados de forma geral, pois, em nenhuma região foi encontrado erro relativo inferior à 100%.

Para a vazão de 95% de permanência a equação regional simples com variável comprimento dos cursos hídricos apresentou ótimos resultados para as regiões da Baía de Guanabara e rio Ribeira do Iguape, com erros relativos de 10,23% e 12,50%. Porém, as estações das regiões Rio Paracatu e Rio Itajaí apresentam altos erros relativos para este método.

5.4.2 Equação Regional por Regressão Múltipla Linear

Para a inserção de mais variáveis, aplicaram-se testes com equações de regressão múltiplas. A Tabela 20 apresenta um resumo dos resultados da aplicação da equação regional de regressão linear múltipla considerando os seguintes cenários:

- a) Área de drenagem + precipitação média anual;
- b) Área de drenagem + *Curve Number*;
- c) Área de drenagem + precipitação média anual + *Curve Number*;
- d) Área de drenagem + declividade do rio principal (somente Q_{90});
- e) Área de drenagem + comprimentos dos cursos hídricos (somente Q_{95}).

Tabela 20 – Resultados da equação regional com variável explicativa de área de drenagem e precipitação

(Continua)

Estação	Vazão de referência	Vazão real (m³/s)	Variável utilizada	Equação regional	Vazão regionalizada (m³/s)	Erro relativo (%)	R²	f de significação
40810800	Q90	0,17	Ad+P	$Q_{90} = -624,2 + 0,0047 \cdot Ad + 0,4164 \cdot P$	0,35	-105,88%	0,949	0,01
	Q95	0,08		$Q_{95} = -609,8 + 0,0038 \cdot Ad + 0,4067 \cdot P$	0,22	-175,00%	0,923	0,00
	Q90	0,17	Ad+CN	$Q_{90} = -16,802 + 0,0038 \cdot Ad + 0,2631 \cdot CN$	-0,64	476,47%	0,990	0,02
	Q95	0,08		$Q_{95} = -15,706 + 0,0029 \cdot Ad + 0,2461 \cdot CN$	-0,63	887,50%	0,991	0,03
	Q90	0,17	Ad+P+	$Q_{90} = -513,93 + 0,0045 \cdot Ad + 0,3386 \cdot P + 0,0931 \cdot CN$	-0,32	288,24%	0,967	0,07
	Q95	0,08	CN	$Q_{95} = -524,47 + 0,0037 \cdot Ad + 0,3465 \cdot P + 0,0721 \cdot CN$	-0,30	475,00%	0,950	0,07
42454000	Q90	0,17	Ad+Sm	$Q_{90} = 4,9187 + 0,0033 \cdot Ad - 2,1450 \cdot Sm$	-2,85	1776,47%	0,952	0,07
	Q95	0,08	Ad+∑ L	$Q_{95} = 1,6197 + 0,0052 \cdot Ad - 0,0032 \cdot \sum L$	0,23	-187,50%	0,919	0,04
	Q90	0,23	Ad+P	$Q_{90} = 4,455 + 0,0011 \cdot Ad - 0,0027 \cdot P$	0,28	-21,74%	0,952	0,02
	Q95	0,16		$Q_{95} = 1,367 + 0,0007 \cdot Ad - 0,0007 \cdot P$	0,31	-93,75%	0,764	0,18
	Q90	0,23	Ad+CN	$Q_{90} = -1,7328 + 0,0013 \cdot Ad + 0,0294 \cdot CN$	0,33	-43,48%	0,644	0,18
	Q95	0,16		$Q_{95} = -1,2839 + 0,0008 \cdot Ad + 0,0240 \cdot CN$	0,38	-137,50%	0,649	0,15
Q90	0,23	Ad+P+	$Q_{90} = 10,1470 + 0,0006 \cdot Ad - 0,0106 \cdot P + 0,1056 \cdot CN$	0,85	-269,57%	0,648	0,40	
Q95	0,16	CN	$Q_{95} = 4,7488 + 0,0004 \cdot Ad - 0,0054 \cdot P + 0,0627 \cdot CN$	0,65	-306,25%	0,692	0,40	
59120000	Q90	0,23	Ad+Sm	$Q_{90} = -1,2812 + 0,0017 \cdot Ad + 1,2383 \cdot Sm$	-3,14	1465,22%	0,721	0,14
	Q95	0,16	Ad+∑ L	$Q_{95} = 0,2564 + 0,0047 \cdot Ad - 0,0058 \cdot \sum L$	1,78	-1012,50%	0,916	0,04
	Q90	1,03	Ad+P	$Q_{90} = -9,003 + 0,0074 \cdot Ad + 0,0050 \cdot P$	3,83	-271,84%	0,686	0,13
	Q95	0,88		$Q_{95} = -8,002 + 0,0064 \cdot Ad + 0,0044 \cdot P$	3,25	-269,32%	0,684	0,12
	Q90	1,03	Ad+CN	$Q_{90} = -35,212 + 0,0042 \cdot Ad + 0,4875 \cdot CN$	2,13	-106,80%	0,744	0,01
	Q95	0,88		$Q_{95} = -30,4844 + 0,0036 \cdot Ad + 0,4210 \cdot CN$	1,76	-100,00%	0,750	0,00
Q90	1,03	Ad+P+	$Q_{90} = -38,427 + 0,0031 \cdot Ad - 0,0018 \cdot P + 0,5819 \cdot CN$	1,56	-51,46%	0,988	0,02	
Q95	0,88	CN	$Q_{95} = -32,945 + 0,0028 \cdot Ad - 0,0014 \cdot P + 0,4932 \cdot CN$	1,32	-50,00%	0,990	0,03	
Q90	1,03	Ad+Sm	$Q_{90} = 2,6621 + 0,0047 \cdot Ad - 0,1725 \cdot Sm$	2,27	-120,39%	0,537	0,23	
Q95	0,88	Ad+∑ L	$Q_{95} = 1,9295 - 0,1293 \cdot Ad + 0,1818 \cdot \sum L$	1,04	-18,18%	0,832	0,08	

(Conclusão)

Estação	Vazão de referência	Vazão real (m³/s)	Variável utilizada	Equação regional	Vazão regionalizada (m³/s)	Erro relativo (%)	R²	f de significação
81290500	Q90	0,10	Ad+P	$Q_{90} = 46,092 + 0,0103 \cdot Ad - 0,0327 \cdot P$	0,41	-310,00%	0,998	0,00
	Q95	0,08		$Q_{95} = 36,406 + 0,0092 \cdot Ad - 0,4687 \cdot P$	0,33	-312,50%	0,998	0,00
	Q90	0,10	Ad+CN	$Q_{90} = 38,896 + 0,0101 \cdot Ad - 0,4995 \cdot CN$	-0,11	210,00%	0,999	0,00
	Q95	0,08		$Q_{95} = 36,406 + 0,0092 \cdot Ad - 0,46870 \cdot CN$	-0,19	337,50%	0,999	0,00
	Q90	0,10	Ad+P+	$Q_{90} = 42,840 + 0,0101 \cdot Ad - 0,0090 \cdot P - 0,3856 \cdot CN$	0,04	60,00%	0,999	0,01
	Q95	0,08	CN	$Q_{95} = 44,108 + 0,0093 \cdot Ad - 0,01775 \cdot P - 0,24618 \cdot CN$	0,09	-12,50%	0,999	0,00
	Q90	0,10	Ad+Sm	$Q_{90} = -4,6133 + 0,0107 \cdot Ad + 3,9153 \cdot Sm$	3,32	-3220,00%	0,999	0,00
	Q95	0,08	Ad+∑ L	$Q_{95} = 0,0298 + 0,1028 \cdot Ad - 0,0900 \cdot \sum L$	0,35	-337,50%	0,999	0,00
83101000	Q90	0,23	Ad+P	$Q_{90} = 23,139 + 0,0043 \cdot Ad - 0,0139 \cdot P$	0,18	21,74%	0,980	0,01
	Q95	0,17		$Q_{95} = 23,293 + 0,0026 \cdot Ad - 0,0136 \cdot P$	0,50	-194,12%	0,898	0,07
	Q90	0,23	Ad+CN	$Q_{90} = -92,471 + 0,0038 \cdot Ad + 1,1201 \cdot CN$	-2,61	1234,78%	0,973	0,01
	Q95	0,17		$Q_{95} = -129,7 + 0,0020 \cdot Ad + 1,5733 \cdot CN$	-4,05	2482,35%	0,852	0,04
	Q90	0,23	Ad+P+	$Q_{90} = -248,9 + 0,0035 \cdot Ad + 0,0416 \cdot P + 2,2008 \cdot CN$	-2,30	1100,00%	0,985	0,08
	Q95	0,17	CN	$Q_{95} = -413,5 + 0,0014 \cdot Ad + 0,0755 \cdot P + 3,5335 \cdot CN$	-3,49	2152,94%	0,917	0,14
	Q90	0,23	Ad+Sm	$Q_{90} = 8,978 + 0,0036 \cdot Ad - 5,5991 \cdot Sm$	-2,60	1230,43%	0,992	0,00
	Q95	0,17	Ad+∑ L	$Q_{95} = -0,0629 + 0,0229 \cdot Ad + -0,0293 \cdot \sum L$	0,58	-241,18%	0,970	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor

De forma geral, as vazões regionalizadas pelas por regressões múltiplas, com o uso de mais de uma variável explicativa, demonstraram grandes erros relativos percentuais. Além disso, das 40 equações regionais múltiplas testadas, o total de 16 equações tem significância rejeitada pelo teste do f de significação, equivalente a 40%. Os maiores valores produzidos pelo teste F, do f de significação, foram através das equações com maior número de variáveis explicativas, nesse caso, as equações com três variáveis, no comparativo com as equações que envolvem duas variáveis.

Ao desconsiderar as equações não significativas, foi determinada a maior aproximação entre vazão real e regionalizada foi atingida, para a vazão de 90% de permanência, na estação de estudo 83101000 da região do rio Itajaí, com erro relativo de 24% na equação que utiliza as variáveis área de drenagem e precipitação média. Para a vazão de 95% de permanência, o menor erro relativo encontrado foi de 18% na estação 81290500 da região do rio Ribeira do Iguape.

5.5 COMPARAÇÃO DO ERRO RELATIVO ENTRE OS MÉTODOS

Os erros produzidos pelos diferentes métodos de regionalização, por região, para a vazão de 95% de permanência, foram:

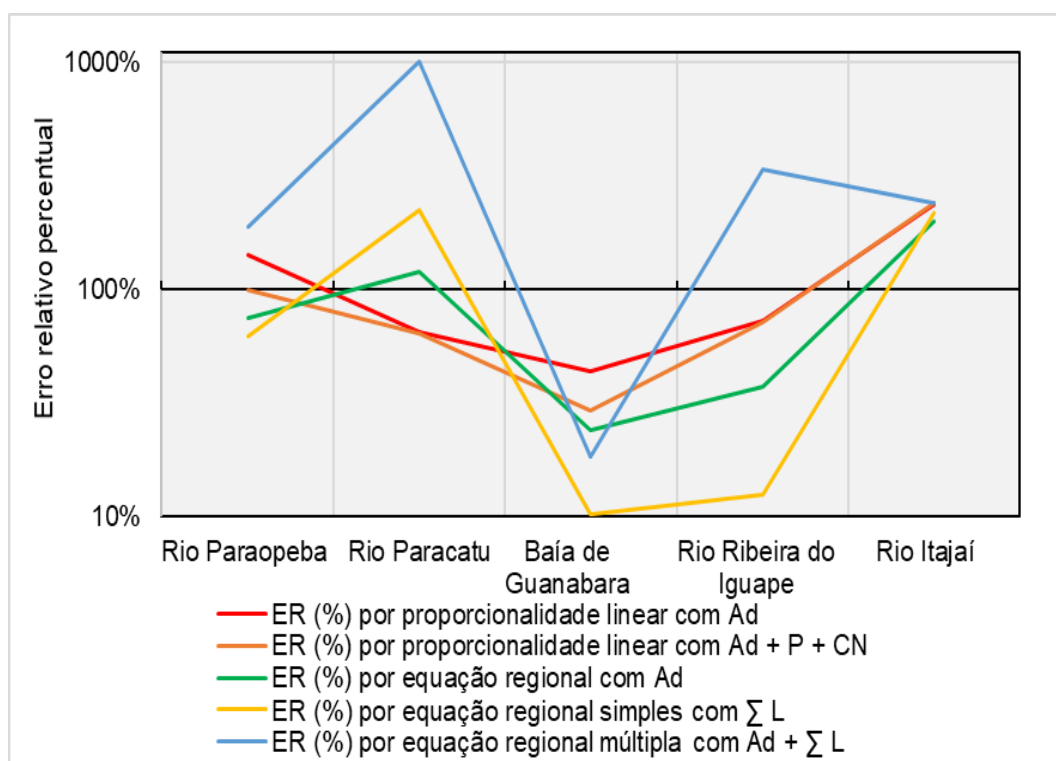
- a) Rio Paraopeba: erro relativo médio de 141,46% para interpolação linear com área de drenagem, erro relativo médio de 99,05% para interpolação linear com área de drenagem corrigido por precipitação e CN, erro relativo de 75,00% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando área de drenagem, erro relativo de 65,50% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando somatório do comprimentos dos cursos hídricos e erro relativo de 187,50% para equação regional de regressão múltipla do tipo linear utilizando área de drenagem e somatório do comprimentos dos cursos hídricos;
- b) Rio Paracatu: erro relativo médio de 65,09% para interpolação linear com área de drenagem, erro relativo médio de 64,07% para interpolação linear com área de drenagem corrigido por precipitação e CN, erro relativo de 118,75% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando área de drenagem, erro relativo de 225,00% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando

somatório do comprimentos dos cursos hídricos e erro relativo de 1012,50% para equação regional de regressão múltipla do tipo linear utilizando área de drenagem e somatório do comprimentos dos cursos hídricos;

- c) Baía de Guanabara: erro relativo médio de 43,51% para interpolação linear com área de drenagem, erro relativo médio de 29,13% para interpolação linear com área de drenagem corrigido por precipitação e CN, erro relativo de 23,86% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando área de drenagem, erro relativo de 10,23% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando somatório do comprimentos dos cursos hídricos e erro relativo de 18,18% para equação regional de regressão múltipla do tipo linear utilizando área de drenagem e somatório do comprimento dos cursos hídricos;
- d) Rio Ribeira do Iguape: erro relativo médio de 72,50% para interpolação linear com área de drenagem, erro relativo médio de 71,46% para interpolação linear com área de drenagem corrigido por precipitação e CN, erro relativo de 37,50% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando área de drenagem, erro relativo de 12,50% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando somatório do comprimento dos cursos hídricos e erro relativo de 337,50% para equação regional de regressão múltipla do tipo linear utilizando área de drenagem e somatório do comprimentos dos cursos hídricos;
- e) Rio Itajaí: erro relativo médio de 235,76% para interpolação linear com área de drenagem, erro relativo médio de 239,18% para interpolação linear com área de drenagem corrigido por precipitação e CN, erro relativo de 200,00% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando área de drenagem, erro relativo de 217,65% para equação regional de regressão simples do tipo potencial utilizando somatório do comprimento dos cursos hídricos e erro relativo de 241,18% para equação regional de regressão múltipla do tipo linear utilizando área de drenagem e somatório do comprimentos dos cursos hídricos.

O Gráfico 8 ilustra os erros relativos médios, por região, dos métodos de regionalização utilizados no estudo.

Gráfico 8 – Confrontação entre os erros relativos dos métodos de regionalização para vazão de 95% de permanência



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 21 resume os erros relativos médio de cada metodologia, separado por região, e apresenta o erro médio entre a vazão de 95% de permanência regionalizada e real que cada metodologia produziu.

Tabela 21 - Erro relativo médio dos métodos de regionalização para Q_{95}

Região	Proporcionalidade linear com Ad	Proporcionalidade linear com Ad + P + CN	Equação regional potencial com Ad	Equação regional potencial com ΣL	Equação regional linear com Ad + ΣL
Rio Paraopeba	141,46%	99,05%	75,00%	62,50%	187,50%
Rio Paracatu	65,09%	64,07%	118,75%	225,00%	1012,50%
Baía de Guanabara	43,51%	29,13%	23,86%	10,23%	18,18%
Rio Ribeira do Iguape	72,50%	71,46%	37,50%	12,50%	337,50%
Rio Itajaí	235,76%	239,18%	200,00%	217,65%	241,18%
Média	111,66%	100,58%	91,02%	105,58%	359,37%

Fonte: Elaborado pelo autor

O método com menor erro mediano é a regionalização por equação regional do tipo potencial, com 91,16%, que utilizou como variável explicativa a área de drenagem.

O método de proporcionalidade linear entre áreas de drenagem corrigido por precipitação e *Curve Number* apresentou erro mediano de 100,58%. O método de proporção corrigido por outras duas variáveis explicativas além da área de drenagem reduziu em cerca de 15% o erro mediano em relação ao método linear que considera somente a proporcionalidade entre as áreas.

O método de equação regional por regressão potencial com somatório do comprimento dos cursos hídricos apresentou erro mediano de 109,02%. Porém, analisando separadamente as regiões, esse método foi o que se aproximou, em média regional, as vazões regionalizadas e reais, especificamente nas regiões Baía de Guanabara e Rio Ribeira do Iguape com uso da equação que envolve área de drenagem, precipitação média anual e *Curve Number*.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Para este trabalho estimou-se os erros relativos à aplicação de técnicas de regionalização de vazões de estiagem em pequenas bacias hidrográficas, menores que 200 km², a partir do uso de vazões monitoradas em bacias médias e grandes.

A relação entre áreas calculadas e áreas cadastradas no banco de dados *HidroWeb* apresentou erro relativo médio das 30 confrontações de 2,97%. Grande parte das estações cadastradas foram calculadas em modelos digitais de elevação criados por imagem SRTM com resolução de 90 metros. As áreas das bacias de interesse deste trabalho foram calculadas em MDE com imagem SRTM resolução 30 metros. Portanto, a discretização da base cartográfica influi na diferença de resultados e, devido a maior resolução da base utilizada, as áreas de drenagem apresentadas neste trabalho possuem maior precisão.

Em relação a regionalização de vazões de estiagem, para metodologia de proporcionalidade linear entre áreas de drenagem os resultados obtidos com correção por variáveis de precipitação e coeficiente CN se mostraram satisfatórios. Para a região do rio Paraopeba os erros relativos foram reduzidos de maneira significativa, além da redução de erro considerável na região da Baía de Guanabara e de sensíveis reduções nas outras regiões. Portanto, em uso desta metodologia na falta de estações de apoio para delimitação de região hidrológica homogênea, recomenda-se a aplicação da correção pelas variáveis citadas no método proposto.

Os dados que sugerem um indicador médio regional, que relaciona vazão real e vazão regionalizada, podem ser considerados. As regiões do rio Paraopeba, rio Ribeira do Iguape e Rio Itajaí demonstraram proporcionalidade regular, principalmente pelo baixo desvio padrão. Já os indicadores de proporcionalidade da região do rio Paracatu e Baía de Guanabara possuem desvio padrão consideráveis e devem produzir erros substanciais.

Na metodologia de equação regional, tanto na regressão simples do tipo potencial quanto na regressão múltipla linear, foram utilizadas cinco estações de apoio para elaboração da equação de regressão. A inserção de uma maior quantidade de estações de apoio nas equações produzem aumento do grau de liberdade, o que tende a apresentar melhores resultados, principalmente nas regressões múltiplas,

pelo fato do f de significação ser consideravelmente maior nas equações que utilizam três variáveis explicativas, em comparação com as equações de duas variáveis. Porém, em muitas regiões do território nacional são encontradas dificuldades na localização de um grupo homogêneo de estações fluviométricas com série de vazão representativa e, com a definição de um período-base para aplicação da regionalização, os dados tornam-se ainda mais escassos. Nesse caso, ressalta-se que o método de regionalização não cria informações em locais sem dados, mas sim transfere espacialmente os dados de vazão, e o nível do resultado está condicionado à qualidade dos dados.

As vazões regionalizadas por regressões múltiplas, com o uso de mais de uma variável explicativa, demonstraram grandes erros relativos percentuais. Além disso, das 40 equações regionais múltiplas testadas, o total de 16 equações tem sua significância rejeitada pelo teste do f de significação, equivalente a 40%, além de apenas oito equação (equivalente a 20%) apresentarem erros relativos inferiores a 100%.

A análise individual das variáveis explicativas, em equações regionais de regressão simples, indicou que o maior coeficiente de determinação para as vazões com 90% de permanência são área de drenagem e comprimentos dos cursos hídricos; já para as vazões com 95% de permanência os maiores coeficientes estão relacionados as variáveis área de drenagem e somatório do comprimento dos cursos hídricos.

A regionalização que utiliza equação regional de regressão simples com variável de somatório de comprimento dos cursos hídricos apresentou erros medianos baixos para a região da Baía de Guanabara e rio Ribeira do Iguape, sendo recomendada a aplicação desta metodologia nestas regiões. A regionalização que utiliza equação regional de regressão simples com variável de área de drenagem apresentou menor erro mediano entre todas metodologias testadas no estudo.

Em análise entre as regiões, Baía de Guanabara foi a região com menor erro mediano para maior aproximação entre valor regionalizado e real. A região contou neste trabalho com bacias de apoio com área de quatro a trinta vezes maior que a bacia de estudo, seguido da região do rio Ribeira do Iguape, com bacias de apoio com área de sete a 276 vezes maior que a bacia de estudo.

Em resumo, os menores erros relativos na estimativa da Q_{90} e Q_{95} foram obtidos por meio das equações regionais de regressão simples do tipo potencial com

variável de área de drenagem ou com somatório do comprimento dos cursos hídricos para a estimativa da Q_{95} . Não é recomendada a aplicação de equações regionais de regressão múltipla que utilizem até cinco estações de apoio, sendo a metodologia que apresentou maior erro relativo mediano. Na falta de dados para criação equações regionais, o método da proporcionalidade linear apresentou bons resultados e reduziu o erro relativo médio em 11,09% com a correção conjunta das variáveis de precipitação média anual e coeficiente *Curve Number*.

Por fim, reafirma-se a importância da consideração às incertezas associadas à regionalização de vazões de estiagem em pequenas bacias hidrográficas.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se, com o objetivo de complementar este trabalho e conferir continuidade à pesquisa, as seguintes recomendações:

- a) Sejam adicionadas, nos métodos de regionalização proposto neste trabalho, variáveis explicativas que considerem a hidrogeologia das regiões de estudo;
- b) Avaliar a aplicabilidade dos indicadores de proporcionalidade criados neste trabalho, em outras estações fluviométricas com pequenas bacias hidrográficas das mesmas regiões de estudo;
- c) Avaliar a aplicação do método de regionalização de vazões de estiagem com equações regionais de regressão linear múltipla com mais de cinco estações de apoio;
- d) Avaliar a aplicação do método de proporcionalidade de área com correção das variáveis precipitação média anual e *Curve Number* médio entre pequenas bacias e bacias com ordem de grandeza dez vezes superior, que apresentou bons resultados em algumas regiões deste trabalho;
- e) Aplicar as metodologias propostas neste trabalho de análise do erro relativo da regionalização de vazões de estiagem em pequenas bacias hidrográficas para outras regiões de estudo do país.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil**: Abastecimento Urbano de Água (2010). Disponível em <http://atlas.ana.gov.br/Atlas>. Acesso em 25/05/2019.

ANA. Agência Nacional de Águas. **HidroWeb**: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: Acesso em: 05/05/2019.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Marco Legal - Lei das Águas Módulo 2** : O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos Sumário. In: Brasília, 2013a.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Orientações para Elaboração do Projeto de Instalações Hidrométricas**. Brasília, 2013b. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesparaElaboracaodeRelatoriodelInstalacaodasEstacoesHidrometricas.pdf>. Acesso em 20/06/2019.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Mudanças climáticas e recursos hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. 1. ed. Brasília, 2015.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018**: informe anual. Brasília, 2018a.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Nota Técnica nº 46/2018/SPR**. Brasília, 2018b. Disponível em: https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/en/resources.get?id=580&fname=NOTA_TECNICA_46_2018_SPR.pdf.

BAENA, Luiz G. N. et al. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 612-624, 2004.

BAZZO, Kássia Regina et al. Regionalização da vazão Q₉₅: comparação de métodos para a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, RS. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, p. 855-870, 2017.

BRANDT, Ana Cristina Cancherini et al. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Itajaí**. Blumenau/SC. Disponível em: http://www.aguas.sc.gov.br/base-documental/rioitajai/noticiasrioitajai/item/download/xs173_162158b668453a53c5b010ac0aa1f41f. Acesso em 10/10/2019.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357** de 17 de março de 2005. Brasília, DF, 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Lei n. 9.433**: Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997. 72p.

BURCH, G. J. et al. Comparative hydrological behaviour of forested and cleared catchments in southeastern Australia. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 90, n. 1/2, p. 19-42, 1987.

CHOW V. T. et al. **Applied Hydrology**. 1ª ed. New York, McGraw Hill, 1988.

COELHO, Vanessa Righi; FAN, Fernando Mainardi. **Manual do programa Super Manejo de Dados**. Porto Alegre, v. 1.1, p. 1-17, 2016.

COSTA, Fernanda Martineli; BACELLAR, Luis De Almeida Prado. Caracterização Hidrogeológica de Aquíferos a Partir do Fluxo de Base. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Ouro Preto, v. 15, n. 1994, p. 173-183, 2010.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto atlas pluviométrico do Brasil: Levantamento da Geodiversidade - Isoetas Anuais Médias Período 1977 a 2006**. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/Isoetas_Totais_Anuais_1977_2006.pdf. Acesso em 07/11/2019.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 50**. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/11562>. Acesso em 17/10/2019.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Monitoramento especial da bacia do rio Paraopeba**. Belo Horizonte. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/paraopeba/RT_02_2019_PARAOPEBA.pdf. Acesso em 18/10/2019.

ELETROBRÁS. Centrais de Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões** Rio de Janeiro, 1985.

FARIA, Bruno Fernando Pinheiro. **Teste F na regressão linear múltipla para dados temporais com correlação serial**. Universidade Aberta de Portugal, 2011.

GASQUES, A.; NEVES, G.; SANTOS, J.; MAUAD, F.; OKAWA, C. Regionalização de vazões mínimas: breve revisão teórica. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, 6 mar. 2018.

GRIBBIN, John E. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais: tradução da 4ª edição norte-americana**. 1. ed. São Paulo.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de uso da terra**. 3. ed. Rio de Janeiro. Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acesso em 13/09/2019.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Rio Paracatu: Resumo executivo do Comitê da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Paracatu**. Belo Horizonte, p. 384, 2006.

JUSTO, Dagoberto Adriano Rizzotto et al. **Cálculo numérico**. Porto Alegre, p. 373, 2019.

MENDIONDO, Eduardo M.; TUCCI, Carlos E. M. Escalas hidrológicas I: Conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 59-79, 1997a.

MENDIONDO, Eduardo M.; TUCCI, Carlos E. M. Escalas hidrológicas II: Diversidade de processos na bacia vertente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 81-100, 1997b.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. Análise Local de **Frequência de variáveis hidrológicas**. In: BRASIL, CPRM-Serviço Geológico Do (Ed.). Hidrologia Estatística. 1. ed. Belo Horizonte. p. 293-351.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Correlação e regressão**. In: CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (Ed.). Hidrologia Estatística. 1. ed. Belo Horizonte. p. 352-400.

NASCIMENTO, Thays Valente Do; FERNANDES, Lindemberg Lima. Mapeamento do uso e ocupação do solo em uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 170, 2017.

NUNES, Fabrizia Gioppo; FIORI, Alberto Pio; FIRPO, Giacomo. Estimativa de coeficientes de escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Atuba : Curitiba e região metropolitana - Paraná / Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 64, p. 27-39, 2011.

ONU. **Perspectivas da população mundial: a revisão 2017** | Biblioteca Multimídia - Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas. 2017. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html>. Acesso em: 13/04/2019.

PINTO, Nelson L. de Sousa et al. **Hidrologia Básica**. Editora Edgard Blucher Ltda, 1976.

PIOL, Vinícius Marcos Alpoin. **Análise regional de curvas de permanência e de curvas de probabilidade de vazões mínimas: avaliação do desempenho de diferentes métodos de regionalização**. 2017. Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

POGIAN, Mauricio Freixo. **Estimativa de vazão mínima em pequenas bacias hidrográficas**. Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

POMPÊO, Marcelo et al. **Estudo de variáveis hidrológicas e de balanço hídrico**. In: IB/USP (Ed.). Ecologia de Reservatórios e Interfaces. 1. ed. São Paulo. p. 434-447.

PORTO, Rubem La Laina; FILHO, Kamel Zahed; SILVA, Ricardo Martins Da. **Bacias hidrográficas**. Universidade de São Paulo, 1999.

REIS, José Antônio Tosta Dos et al. **Indicadores regionais aplicáveis à avaliação do regime de vazão dos cursos d'água**. UNESP, Geociências, São Paulo, p. 509-516, 2008.

ROBERTO, Douglas Mendes. **Estação ecológica da Guanabara e região**. 2009.

SANTANA, Claudinei Lopes. **Geomorfologia da planície fluvial do rio Ribeira de Iguape entre Sete Barras e Eldorado (SP)**. 2008. Universidade de São Paulo, 2008.

SARTORI, Aderson; NETO, Francisco Lombardi; GENOVEZ, Abel Maia. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. Parte 1 : Classificação. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, p. 5-18, 2005.

SILVA JÚNIOR, Omar B. et al. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre. p. 21-37, 2003.

SILVEIRA, Geraldo L.; SILVEIRA, André L. L.; TUCCI, Carlos E. M. **Quantificação de Vazão em Pequenas Bacias sem Dados**, Porto Alegre, 1998.

SOUZA, Rodrigo Marcos De; SANTOS, Irani Dos. **Vazões mínimas na bacia hidrográfica do altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT**. Departamento de Geografia - UFPR, Curitiba, v. 28, p. 134-153, 2013.

TARGA, Marcelo dos Santos et al. **Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil**. Revista Ambiente & Água, [s. l.], n. 12, p. 120-142, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.905>. Acesso em 19/09/2019.

TOMAZ, Plínio. **Regionalização hidrográfica**. In: Manejo de Águas Pluviais. p. 1-12. 2012. Livro Eletrônico.

TUCCI, Carlos E. M. **Modelos hidrológicos**. Ed. Universidade UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, p. 668, 1998.

TUCCI, Carlos E. M. **Regionalização de vazões**. Editora da UFRGS/ABRH. 1. ed. Porto Alegre, 2002.

TUCCI, Carlos E. M. Regionalização de Vazões. Editora da UFRGS/ABRH. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre. p. 573-619, 2009.

TUCCI, Carlos E. M.; MENDES, Carlos A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

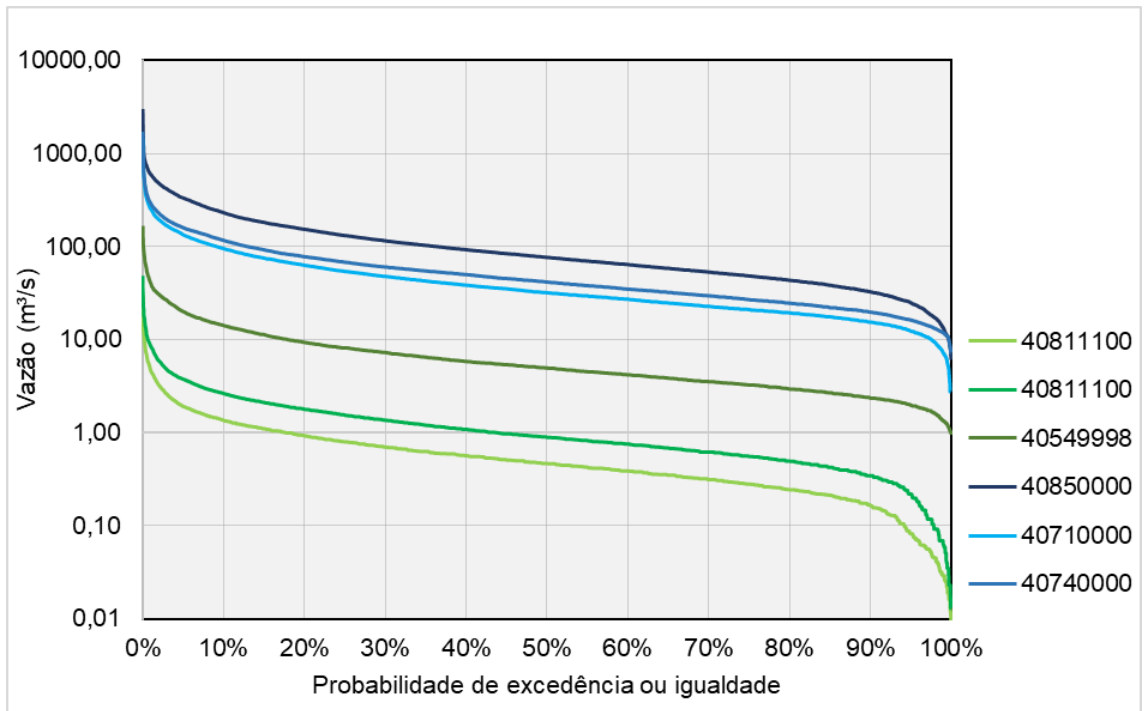
UNESCO. **The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind, facts and figures**. Perúgia, 2019.

SCS. **Urban hydrology for small watersheds**. Technical Release 55. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), 1986.

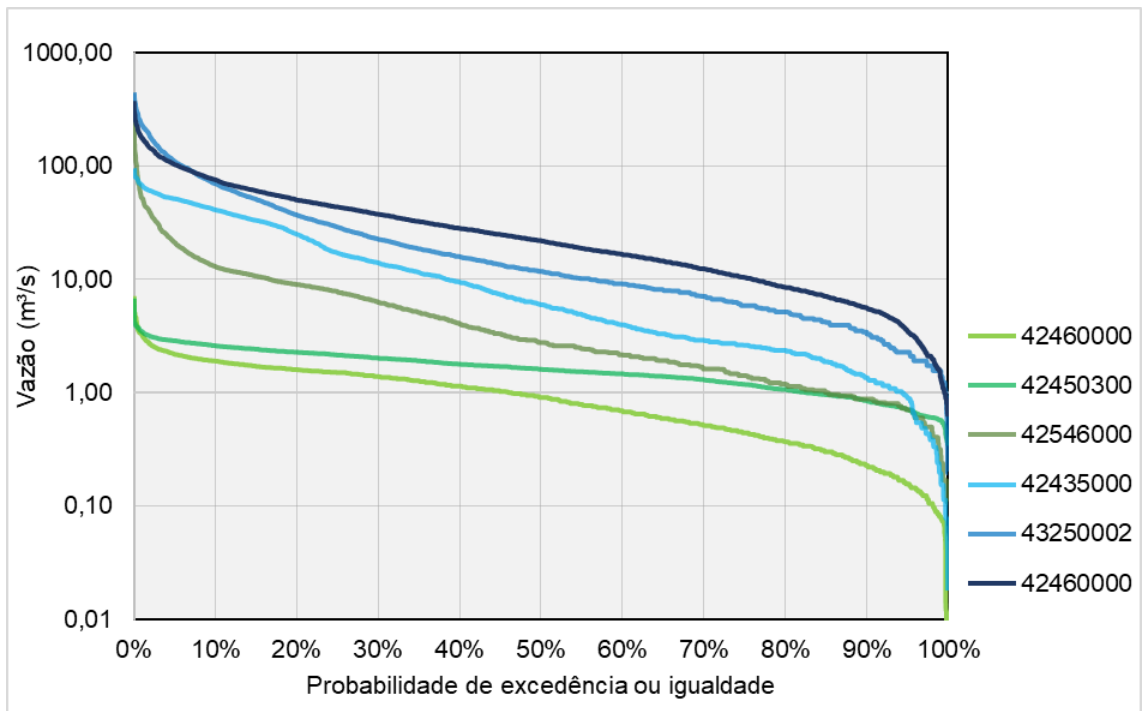
VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 245p. 1995.

APÊNDICE A - CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS REGIÕES DE ESTUDO

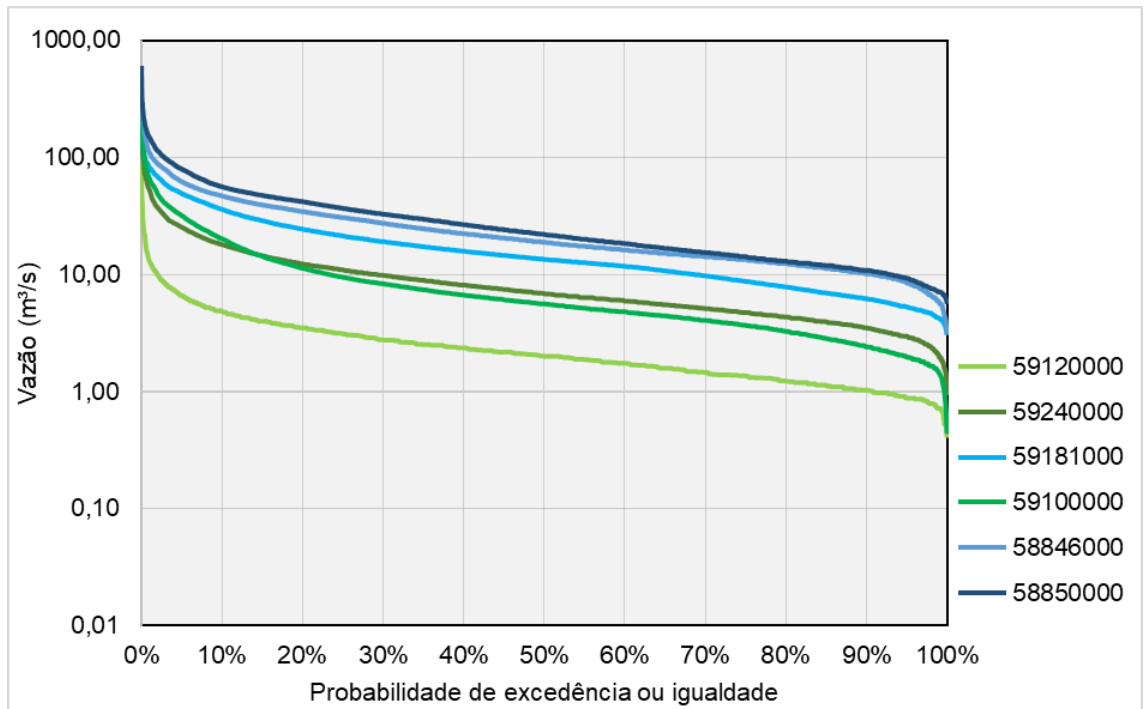
Confrontação das curvas de permanência das estações de apoio e estudo da região do rio Paraopeba.



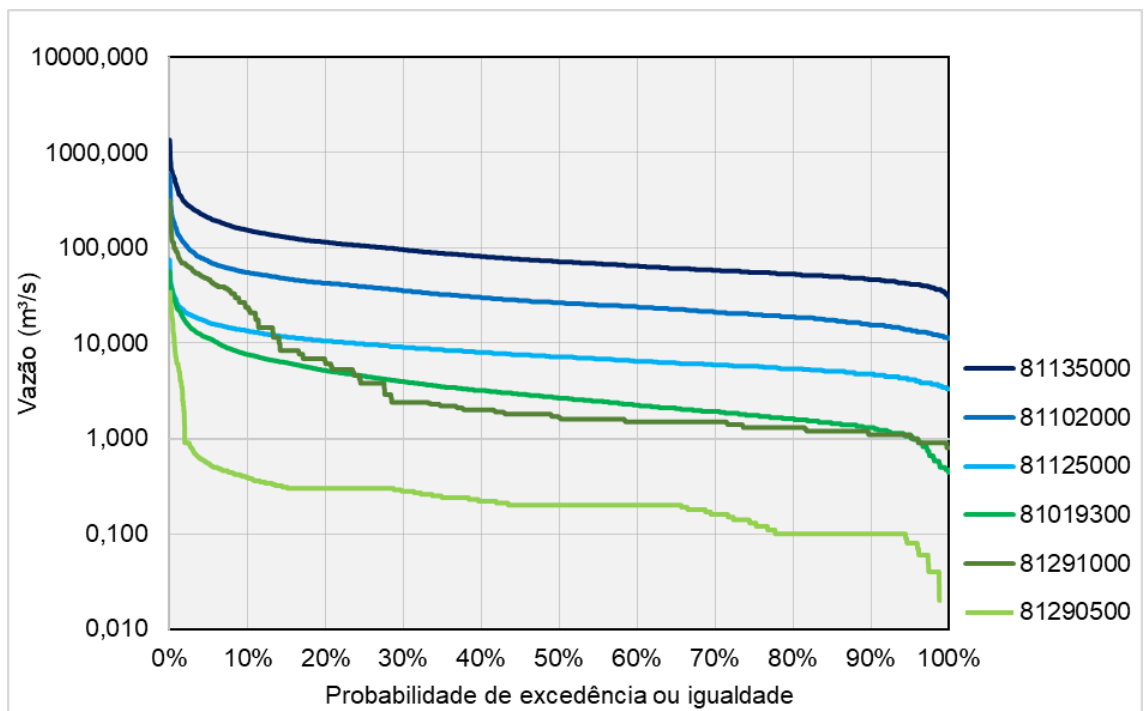
Confrontação das curvas de permanência das estações de apoio e estudo da região do rio Paracatu.



Confrontação das curvas de permanência das estações de apoio e estudo da região da Baía de Guanabara.



Confrontação das curvas de permanência das estações de apoio e estudo da região do rio Ribeira do Iguape.



Confrontação das curvas de permanência das estações de apoio e estudo da região do rio Itajaí.

