

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**Regionalização de vazões máximas a partir do hidrograma unitário
instantâneo geomorfológico em bacias embutidas na bacia hidrográfica do
rio Ijuí - RS, com geometria hidráulica e geometria fractal.**

Marco Alésio Figueiredo Pereira

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental como pré-requisito parcial para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

Co-orientador: Prof^ª Dr^ª. Nilza Maria dos Reis Castro

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fernando Grison	UFFS
Prof ^ª Dr ^ª Rutinéia Tassi	UFMS
Prof. Dr. Juan Martín Bravo	UFRGS

Porto Alegre – RS

Julho - 2015

Folha de aprovação

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me dado à oportunidade e forças para concluir esta pesquisa.

Aos trabalhadores brasileiros que através de seus impostos financiaram a formação acadêmica deste filho.

Aos meus pais que me educaram e me incentivaram a buscar um futuro melhor.

Agradeço, em especial, a minha irmã Magda Cristina por todo seu apoio e suporte em minha trajetória acadêmica.

Ao meu amigo e orientador professor Masato Kobiyama por todos seus ensinamentos, tanto no âmbito hidrológico quanto no âmbito geral.

A minha co-orientadora professora Nilza por ter me acolhido no IPH e por sua ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos do LABHIDRO e GPDEN pelo convívio, amizade e troca de conhecimento.

A Léa Fernanda de Lay por me apoiar e compreender minha falta de tempo para nós.

Agradeço a todos os professores que me transmitiram o conhecimento e todas as instituições nas quais eu estudei, em especial ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

Ao CNPq e a CAPES pela concessão da bolsa de estudo, ao FINEP pelo financiamento da pesquisa dos projetos MATASUL, RHIMA e CLIMASUL.

Agradeço, sinceramente, todas as pessoas que me ajudaram de uma forma ou de outra para elaboração deste trabalho.

Muito obrigado a todos!

Hard work is necessary condition, but without the spark of imagination, the quantum jump to discovery doesn't usually occur.

Medawar (1969)

RESUMO

Em virtude da existência de falhas em séries históricas hidrológicas ou até mesmo da não existência de dados monitorados nas bacias de interesse, a regionalização hidrológica se configura como uma ferramenta propícia para preencher essa lacuna, tornando-se útil para o conhecimento e a gestão dos recursos hídricos. Existe na literatura da hidrologia uma gama de metodologias que abordam a regionalização de dados ambientais, como a análise de agrupamento, a curva de permanência, a regressão múltipla, entre outros. No entanto, o objetivo do presente trabalho foi regionalizar vazões máximas a partir do hidrograma unitário instantâneo geomorfológico em bacias embutidas, com inserção da geometria hidráulica e geometria fractal. Para tal, propõe-se uma metodologia, inserindo ao modelo do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (GIUH), novos parâmetros de “entrada”, a geometria hidráulica (GH), a geometria fractal (GF) e a precipitação média anual (Pma). Aplicou-se esta metodologia na bacia do rio Ijuí, localizada na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Para isto, foram necessárias as seguintes etapas de trabalho: determinar o comportamento pluviométrico da bacia em estudo; determinar as relações matemáticas (expoentes e coeficientes) da GH na seção transversal do exutório de cada bacia; determinar os valores da GF para cada bacia e inserir as informações da GH e da GF no GIUH. Os dados utilizados no presente estudo (dados de precipitações diárias, perfil topobatimétrico das seções, dados diários de cota, e dados diários de vazões e medições de vazões medidas em campo) foram observados e medidos em nove sub-bacias embutidas à bacia do rio Ijuí, monitoramento realizado por CPRM e IPH-UFRGS. Estes dados foram utilizados para determinar a precipitação média anual, parâmetros (expoentes e coeficientes) de GH e de GF. Com dados observados de sete eventos, ocorridos simultaneamente nas respectivas bacias, calibrado-se o modelo GIUH. Após calibrado o modelo, através de uma regressão multivariada, foram ajustadas equações lineares e potenciais que relacionam \bar{v}_j (velocidade) com parâmetros de GH, GF e Pma, visando regionalizar \bar{v}_j que é um parâmetro de entrada para a geração do GIUH. Com a inserção destes novos parâmetros validou-se o modelo, aplicando-o em outro evento distinto, no qual se pode observar que o modelo apresentou bons resultados quando comparado com os valores observados.

Palavras-chave: Regionalização da vazão máxima, geometria hidráulica, geometria fractal, bacia embutida.

ABSTRACT

Regionalization of maximum flow from the Geomorphological Instant Unit Hydrograph in embedded sub-basins inside the Ijuí river basin - RS, with hydraulic geometry and fractal geometry.

Because of the lack in hydrological time series or even the shortage of monitored data in the basins of interest, hydrological regionalization is configured as a good tool to fill this shortage, making it useful for water resource understanding and its management. In hydrology, there are methodologies that address the regionalization of environmental data, such as cluster analysis, the flow duration curve, multiple regression, etc. However, the main objective of this study is to develop a method of regionalization to estimate peak flows in watersheds. Thus, a method to use the model Geomorphological Instant Unit Hydrograph (GIUH), with the insertion of new input parameters, that is, hydraulic geometry (HG), fractal geometry (FG) and mean annual rainfall (Pma) was proposed. As a case study, this method was applied to the Ijuí river basin, located in the northwestern region of Rio Grande do Sul State. For this, several specific objectives were: Verification of the spatial homogeneity of the rainfall regime in the basin; determination of the mathematical relationships of HG in the cross section of outfall of each basin; determination of FG values for each basin; insertion of HG and FG information into GIUH. The data used in this study (daily rainfall data, cross sections profile, daily water-level data, daily discharge data) were observed and measured in nine embedded sub-basins inside the Ijuí river basin. The monitoring was carried out by CPRM and IPH-UFRGS. These data were used to determine the Pma, parameters (exponents and coefficients) of HG and FG. With data observed in seven events, occurred simultaneously in the respective basins, the GIUH model was calibrated. After the model calibration, linear and potential equations relating \bar{v}_j (speed) with parameters of HG, FG and Pma, that aimed to regionalize \bar{v}_j which is an input parameter for the generation of GIUH, were adjusted through a multivariate regression. With the insertion of these new parameters, the model was validated in another distinct event occurred in the basin, in which it can be observed the model showed good results when compared with observed values.

Keywords: Regionalization of maximum flow, hydraulic geometry, fractal geometry, embedded basin.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	15
1.1 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
2 – OBJETIVO	19
2.1 – OBJETIVO GERAL	19
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 – EFEITOS DA GEOMORFOLOGIA FLUVIAL SOBRE OS PROCESSOS DE GERAÇÃO DE VAZÃO.	20
3.2 – GEOMETRIA HIDRÁULICA (GH).....	24
3.3 – GEOMETRIA FRACTAL (GF)	29
3.4 – REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	32
3.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
4 - ÁREA DE ESTUDO	39
4.1 – DESCRIÇÃO FÍSICA DA BACIA.....	39
4.1.2 - Características físicas.....	41
4.2 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
5 - ANÁLISE DE HOMOGENEIDADE DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IJUÍ-RS.	44
5.1 – INTRODUÇÃO	44
5.2 - MATERIAIS E MÉTODOS	45
5.2.1 - Dados utilizados.....	45
5.2.2 - Análise estatística.....	46
5.3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.4 – CONCLUSÕES	51
5.5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
6. RELAÇÃO ENTRE VAZÕES MEDIDAS EM CAMPO E GEOMETRIA HIDRÁULICA: ESTUDO DE CASO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA DO TURCATO E TABOÃO, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.	54
6.1 - INTRODUÇÃO.....	54

6.2 - MATERIAIS E MÉTODOS	55
6.2.1 - Dados utilizados.....	55
6.2.2 - Construção da curva de frequência de vazões medidas em campo.....	56
6.2.3 - Análise da geometria hidráulica.....	56
6.3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
6.4 - CONCLUSÕES	60
6.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
7 - RELAÇÃO ENTRE A GEOMETRIA HIDRÁULICA E a CURVA DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES MEDIDAS EM CAMPO EM ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IJUÍ – RS	62
7.1 - INTRODUÇÃO	62
7.2 - CONCEITOS	63
7.3 - MATERIAIS E MÉTODOS	66
7.3.1 - Dados utilizados.....	66
7.3.2 – Estabelecimento da curva de frequência de vazões medidas em campo.....	67
7.3.3 - Análise da Geometria Hidráulica.....	67
7.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
7.4.1 - Relação $Q - w$	71
7.4.2 - Relação $Q - d$	72
7.4.3 - Relação $Q - v$	73
7.5 - CONCLUSÕES	75
7.6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
8 - REGIONALIZAÇÃO COM GEOMETRIA HIDRÁULICA E FRACTAL: ESTUDO DE CASO COM HIDROGRAMA Unitário INSTANTÂNEO GEOMORFOLÓGICO (GIUH)	78
8.1 – INTRODUÇÃO	78
8.2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	80
8.2.1 – Hidrograma unitário instantâneo geomorfológico.....	80
8.2.2 - Métodos que utilizam Leis de Horton (1945)	82
8.2.3 - Derivação do GIUH	82
8.2.4 - Critérios para determinação da variável v	84
8.2.5 - Geometria Hidráulica.....	85

8.2.6 - Geometria Fractal.....	86
8.3 - MATERIAIS E MÉTODOS	87
8.3.1 - Dados utilizados.....	87
8.3.2 - Calibração e análise de regressão múltipla para determinação de (v).....	89
8.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
8.4.1 - Hidrogramas calibrados	91
8.4.2 - Hidrogramas Validados	93
8.5 - CONCLUSÕES.....	98
8.6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
9 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –Organograma de apresentação da Tese.....	17
Figura 3.1 - Comportamento das variáveis da geometria hidráulica em função da variação da vazão (adaptada de Leopold & Maddock, (1953) por Grison (2013))......	27
Figura 3.2 - Diagrama triaxial com suas subdivisões ($b=f$; $m=f$; $m=f/2$; $b+f=m$; $m/f=2/3$ e expoente r), tipos de canais (1 a 10) (adaptada de Leopold & Maddock, (1953) por Grison (2013))......	28
Figura 3.3 - Subdivisão $b = f$	28
Figura 3.4 - Precedentes clássicos a geometria fractal: (a) conjunto de Cantor; (b) curva de Koch; (c) triângulo de Sierpinski; e (d) conjunto de Julia.	31
Figura 4.1 - Localização das bacias hidrográficas embutidas a bacia do rio Ijuí.....	40
Figura 4.2 - Localização da bacia do rio Ijuí com a espacialização das estações pluviométricas.	42
Figura 5.1 - Histograma da série antes da transformação; (b) Histograma da série depois da transformação. Figura referente à série histórica da estação pluviométrica de Passo Faxinal.	49
Figura 5.2 - Dendograma para o agrupamento das estações analisadas.....	50
Figura 5.3 - Teste de homogeneidade pelos gráficos da variância da média para distribuição Gama. (a) dois grupos (b) três grupos	50
Figura 6.1 - Esquema ilustrativo do Q_5 , Q_{50} e Q_{95} de cada bacia e seus respectivos expoentes b , f e m , na bacia do Turcato.....	57
Figura 6.2 - Exemplificação da determinação dos expoentes b , f e m na bacia Turcato com vazões $\geq Q_{50}$	58
Figura 7.1 - Variáveis da geometria hidráulica. (a) em um perfil transversal; (b) em um perfil transversal e longitudinal. Fonte: adaptada de FISRWG, 1998).	64
Figura 7.2 - Esquema ilustrativo do $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$ de cada estação e seus respectivos expoentes b , f e m	68
Figura 7.3 - Relação de w vs. Q da estação Passo Faxinal: (a) $\geq Q_5$, (b) $\geq Q_{50}$ e (c) $\geq Q_{95}$	72
Figura 7.4 - Relação de d vs. Q da estação Conceição: (a) $\geq Q_5$, (b) $\geq Q_{50}$ e (c) $\geq Q_{95}$	73
Figura 7.5 - Gráfico de dispersão v vs. Q da estação Santo Ângelo: (a) $\geq Q_5$, (b) $\geq Q_{50}$ e (c) $\geq Q_{95}$	74
Figura 8.1 - Teoria do GIUH: (a) uma bacia hipotética de 3ª ordem com a representação das sub-bacias divididas de acordo com a ordem (i) dos canais e (b) representação de reservatórios lineares em cascata. (Modificado de Franchini & O’Connell, 1996).	81
Figura 8.2 - Fluxograma de calibração e validação dos modelos GIUH-C, GIUH-L e GIUH-P.....	90
Figura 8.3 - Modelo calibrado e observado na bacia hidrográfica Santo Ângelo, no período de 13/11 a 12/12/1993.	92
Figura 8.4 - Avaliação da eficiência dos hidrogramas calibrados em relação aos hidrogramas observados.	92
Figura 8.5 - Erro do tempo de pico dos valores simulados.	93
Figura 8.6 - Percentagem de erros dos valores calculados em relação aos valores de pico observados.	96
Figura 8.7 - Tempo de picos dos modelos propostos.	97
Figura 8.8 - Hidrogramas observado, calibrado, linear e potencial.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Estado de variáveis de controle do rio considerando diferentes escalas temporais.....	21
Tabela 3.2 - Significância hidrológica de parâmetros morfométricos.....	22
Tabela 3.3 - Exemplos de variáveis na regionalização.....	33
Tabela 4.1 - Descrição das estações fluviométricas da bacia do rio Ijuí.....	40
Tabela 5.1 - Dados básicos das estações pluviométricas.....	45
Tabela 5.2 - Teste de normalidade pelo método Shapiro-Wilk.....	49
Tabela 5.3 - Teste de independência de HSD de dois grupos para distribuição Gama.....	51
Tabela 6.1 - Resumo dos dados das estações fluviométricas.....	55
Tabela 6.2 - Valores dos expoentes b, f e m , dos coeficientes a, c e k , seus respectivos R^2 e o número de vazões utilizadas em cada parte da curva de frequência.....	59
Tabela 7.1 - Valores dos expoentes de trabalhos sobre geometria hidráulica.....	65
Tabela 7.2 - Dados básicos das estações fluviométricas.....	66
Tabela 7.3 - Valores dos coeficientes e expoentes para estações fluviométricas.....	69
Tabela 7.4 - R^2 dos expoentes b, f e m e sua relação com Q	71
Tabela 8.1 - Resumo das leis de Horton (1945).....	82
Tabela 8.2 - Equações empregadas para estimar a dimensão fractal, a partir das Leis de Horton.....	87
Tabela 8.3 - Resumo dos eventos utilizados.....	88
Tabela 8.4 - Precipitação média anual.....	89
Tabela 8.5 - Valores dos expoentes b e f para estações fluviométricas.....	90
Tabela 8.6 - Valores das dimensões fractais estimados por diferentes métodos.....	94
Tabela 8.7 - Valores de R^2 das dimensões df e Df testadas.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolo	Descrição	Unidade
a	coeficiente da relação da geometria hidráulica para largura	(—)
a'	área por unidade de contorno	(m ²)
a''	número de tratamentos relacionado ao HSD	(—)
A	área da seção de medição	(m ²)
\bar{A}_w	área média das bacias de cada canal da ordem ω	(km ²)
a_i	coeficiente linear relacionado ao teste de Shapiro-Wilk	(—)
b	expoente da relação da geometria hidráulica para largura	(—)
c	coeficiente da relação da geometria hidráulica para profundidade média da seção	(—)
C	coeficiente linear relacionado ao teste de Shapiro-Wilk	(—)
d	profundidade da coluna d'água no momento da medição de descarga líquida	(m)
DE	distância euclideana	(m)
f	expoente da relação da geometria hidráulica para a profundidade média	(—)
f'	número de graus de liberdade relacionado ao HSD	(—)
F	frequência de excedência	(—)
H_0	hipótese nula	(—)
h_i	altitude	(m)
$h(\tau)$	ordenada do GIUH	(—)
h_A	altitude média da área de encosta	(m)
i	ordem de um determinado canal pela classificação de Sthraler	(—)
I_c	índice de compacidade da bacia	(—)
$i(\tau)$	precipitação efetiva	(mm)
j	coeficiente da relação da geometria hidráulica para a velocidade	(—)
k	coeficiente da relação da geometria hidráulica para a velocidade	(—)
K	número de grupos na análise de agrupamento	(—)
\ln	logaritmo natural	(—)
L_w	comprimento médio do canal de ordem ω	(m)
\bar{L}_{x_i}	comprimento médio dos canais de ordem i	(m)
m	expoente da relação da geometria hidráulica para a velocidade	(—)
MSE	erro quadrado médio	(m)
n	posição que o dado ocupa dentro da série histórica	(—)
n_1	números de valores de cada série analisada relacionados ao HSD	(—)
n_2	números de valores de cada série analisada relacionados ao HSD	(—)
N	número de anos considerados para cada série histórica de dados	(—)
N_w	número de segmento da ordem ω	(—)
p	coeficiente da relação da geometria hidráulica para descarga sólida	(—)

$p_e(\tau)$	intensidade da precipitação efetiva	(mm/h)
q	vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento do trecho	(m ³ /s)
Q	descarga líquida	(m ³ /s)
Q_s	descarga sólida	(ton/dia)
Q_5	5% de tempo que uma dada vazão é igualada ou excedida	(—)
Q_{50}	50% de tempo que uma dada vazão é igualada ou excedida	(—)
Q_{95}	95% de tempo que uma dada vazão é igualada ou excedida	(—)
r	coeficiente da relação da geometria hidráulica para descarga sólida	(—)
S	declividade da superfície da linha d'água	(m/m)
S'	desvio padrão	(—)
SW	evidência de quão se adéqua a distribuição teórica a distribuição observada	(—)
t	intervalo de tempo	(dias)
v	velocidade média, determinada pela razão entre vazão líquida e área molhada da seção	(m/s)
v_{x_i}	velocidade média dos canais de ordem i	(m/s)
w	largura do canal da seção de medição (ou largura de topo)	(m)
W	soma de quadrado dos desvios relacionado ao método de Ward	(—)
x	intervalo do trecho relacionado ao cálculo de vazão na equação da continuidade	(m)
X_i	i -ésimo elemento do agrupamento relacionado ao número de Ward	(—)
x_i	desvio de cada elemento em relação à média	(—)
\bar{x}	média dos valores de uma série	(—)
X_{ij}	j -ésima característica do i -ésimo indivíduo	(—)
y_{ij}	valor observado no grupo relacionado ao MSE	(—)
\bar{y}	média dos valores das variáveis empregado no teste de Shapiro & Wilk	(—)
\bar{y}_j	média do j -ésimo grupo relacionado ao MSE	(—)
y_i	valor da variável relacionado ao teste de Shapiro-Wilk	(—)
z	expoente da relação da geometria hidráulica para declividade da linha d'água	(—)
α	parâmetro de escala de uma série histórica	(—)
α'	intervalo da estatística studentizada	(—)
β	ângulo de inclinação, para definição do índice topográfico	(—)
β'	parâmetro de forma de uma série	(—)
β_i	Inclinação da encosta	(m/m)
β_A	inclinação média da área de encosta relacionado aos parâmetros geomorfológicos da bacia	(m/m)
β_0	coeficiente de regressão linear relacionado aos parâmetros geomorfológicos da bacia	(—)
β_1	coeficiente de regressão linear relacionado aos parâmetros geomorfológicos da bacia	(—)
γ	representa a probabilidade que uma gota caia na bacia (i)	(—)

η	parâmetros de forma relacionado a função de probabilidade Gama	(—)
Θ	parâmetros de escala relacionado a função de distribuição de probabilidade Gama	(—)
σ	desvio padrão de uma variável em relação a média	(—)
λ	parâmetro utilizado no tamanho ou características de escala da bacia	(—)
λ'	parâmetro utilizado para normalização	(—)
μ	média de uma série	(—)
ω	ordem da bacia	(—)
ω_H	plano de curvatura relacionado aos parâmetros geomorfométricos primários	(—)
ω_p	curvatura do perfil, relacionado aos parâmetros geomorfométricos primários	(—)
GIUH	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico	(—)

1 – INTRODUÇÃO

Para o gerenciamento dos recursos hídricos e, conseqüentemente, a execução dos projetos de usos da água que venham ocorrer em uma bacia hidrográfica, deve-se ter conhecimento da quantidade e da qualidade da água disponível. Em bacias hidrográficas onde há poucos dados hidrológicos disponíveis, ou até mesmo onde não há dados monitorados, modelos hidrológicos que predizem a relação Precipitação (P) – Vazão (Q) são uma ferramenta útil para a determinação desses processos hidrológicos de uma bacia. No entanto, o monitoramento hidrológico segue sendo de suma importância para o conhecimento das inter-relações dos processos envolvidos na geração de vazões dentro de uma bacia hidrográfica, pois quando é determinado o comportamento espaço-temporal de uma variável, pode-se utilizar esta variável como parâmetro de calibração e validação de modelos hidrológicos.

Porém, uma rede hidrométrica dificilmente cobre todos os locais de interesse necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. Sempre existirão lacunas temporais e espaciais que deverão ser preenchidas com base em metodologias apropriadas (Baena *et al.*, 2004). Devido à vasta extensão territorial do Brasil sabe-se que o monitoramento de todas as bacias hidrográficas se configura como uma tarefa árdua e dispendiosa, sendo difícil a implementação de equipamentos de medições nas mesmas, e a manutenção de equipes de campo aptas a realizar o monitoramento hidrométrico. Para sanar estas lacunas, os hidrólogos têm respondido a este desafio desenvolvendo várias ferramentas de previsão de vazões, que são comumente referidos como métodos de regionalização (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995; TUCCI 2002; SIVAPALAN *et al.*, 2003; YADAV *et al.*, 2007).

Contudo, o processo de geração de vazão a partir de uma entrada de precipitação perpassa por muitos processos que vão desde a escala da encosta até as feições geomorfológicas constituintes da rede de drenagem. Nesse sentido, o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (GIUH), apresentado por Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979) apresentou uma significativa compreensão das propriedades escalar em sistemas naturais (Hrachowitz, *et al.*, 2014).

Mesmo sendo o GIUH um modelo já conhecido na comunidade hidrológica mundial (Robinson *et al.* 1995; Hall *et al.* 2001; Cudennec *et al.* 2004), esta pesquisa se diferencia por apresentar uma nova abordagem, que é a inserção da geometria hidráulica (GH), geometria fractal (GF) e da precipitação média anual neste hidrograma. Com a inserção da GH e GF

aborda-se outra questão fundamental e de grande interesse para comunidade científica hidrológica, que é a similaridade dos parâmetros (Hrachowitz, *et al.*, 2014). Com a inserção da GF para determinação do GIUH inclui-se a similaridade hidrológica desde a escala da encosta até a escala da bacia hidrográfica. Com a inserção da GH aborda-se o equilíbrio resultante de vazões impostas e as condições hidro-geomorfológicas ocorridas na bacia no decorrer do tempo e do espaço, resultando a forma da seção transversal. Aplicando a metodologia do GIUH esta pesquisa se propõe a determinar uma nova forma de regionalizar vazões máximas ($\geq Q_5$) em bacias embutidas.

Este trabalho é dividido em capítulos, nos quais, alguns capítulos são oriundos de artigos já publicados ou em processo de revisão em revistas da área de hidrologia. Para melhor compreensão dos respectivos capítulos, cada capítulo tem uma introdução, metodologia e conclusão, e ao final destes o mesmo possui suas referências bibliográficas.

O capítulo 1 é esta introdução, propriamente dita. No capítulo 2 é apresentado o objetivo geral, os objetivos específicos e sua respectiva hipótese.

Já no capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica dos efeitos da geomorfologia fluvial sobre os processos de geração de vazão, a fundamentação teórica da geometria hidráulica, a fundamentação teórica da geometria fractal e a fundamentação teórica da regionalização de vazões.

No capítulo 4 apresenta-se a área de estudo desta pesquisa, com a descrição física da bacia, bem como, a localização e características das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas no estudo.

O capítulo 5 é baseado no artigo publicado no XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ocorrido em Bento Gonçalves – RS, intitulado “Análise de homogeneidade da precipitação na bacia hidrográfica do rio Ijuí – RS”.

O capítulo 6 é baseado no artigo submetido ao XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, a ocorrer em Brasília – DF. Sendo que o capítulo tem o mesmo título do referido artigo “Relação da curva de permanência e geometria hidráulica: Estudo de caso das estações fluviométricas da bacia do Turcato e Taboão, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil”.

O capítulo 7 também se refere à geometria hidráulica (GH), sendo este baseado e com o mesmo título do artigo “Relação entre a geometria hidráulica e a curva de permanência em estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Ijuí – RS”, publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 15, n.3, pp.443-454, 2014.

Com a apresentação destes dois capítulos (6 e 7) são contempladas a GH da seção de todas as estações fluviométricas, localizadas na foz das bacias utilizadas no presente estudo.

Já o capítulo 8 aborda a regionalização de vazões, apresentado no artigo intitulado “Regionalização com geometria hidráulica e fractal: Estudo de caso com Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico”. Este artigo foi submetido à Revista Brasileira de Recursos Hídricos em junho de 2015.

Por fim, no capítulo 9 faz-se uma abordagem geral dos capítulos anteriores, bem como, recomendações e conclusão final da presente pesquisa.

Para melhor entendimento a Figura 1.1 apresenta na forma de um organograma a disposição dos respectivos capítulos, bem como a importância de cada item dentro do presente trabalho.

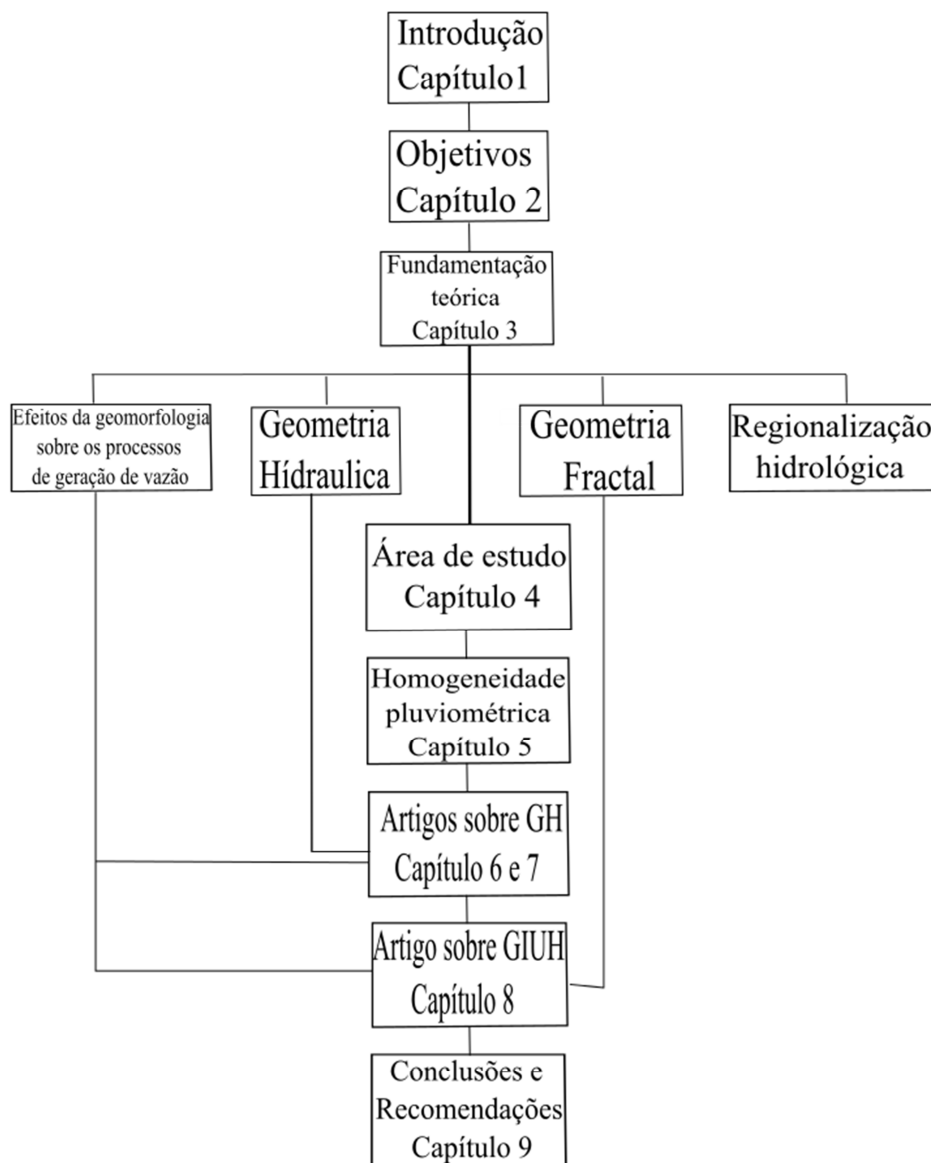


Figura 1.1 –Organograma de apresentação da Tese.

1.1 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAENA, L. G. N.; da SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.612-624, 2004.
- BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. Scale issues in hydrological modelling: A review. **Hydrological Process**, v. 9, p. 251-290, 1995.
- CUDENNEC, C.; FOUAD, Y.; SUMARJO GATOT, I.; DUCHESNE, J. A geomorphological explanation of the unit hydrograph concept. **Hydrological processes**, v.18, p. 603-621, 2004
- HALL, M. J.; ZAKI, A. F.; SHAHIN, M. M. A. Regional analysis using the Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 93-102, 2001.
- HRACHOWITZ, M.; SAVENIJE, H. H. G.; BLÖSCHL, G.; MCDONNELL, J. J.; SIVAPALAN, M.; POMEROY, J.W.; ARHEIMER, B.; BLUME, T.; CLARCK, M. P.; EHRET, U.; FENICIA, F.; FREER, J. E.; GELFAN, A.; GUPTA, H. V.; HUGHES, D. A.; HUT, R. W.; MONTANARI, A.; PANDE, S.; TETZLAFF, D.; TROCH, P. A.; UHLENBROOK, S.; WAGENER, T.; WINSEMIUS, H. C.; WOODS, R. A.; ZEHE, E.; CUDENNEC, C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n.6, 60p. 2014.
- ROBINSON, J. S.; SIVAPALAN, M.; SNELL, J. D. On the relative roles of hillslope processes, channel routing, and network geomorphology in the hydrologic response of natural catchments. **Water Resources Research**, v. 31, n. 12, p. 3089-3101, 1995
- RODRIGUEZ -ITURBE, I.; VALDÉS, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 15, n.6, 12p, 1979.
- SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S.W.; GUPTA, V.K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; McDONNELL, J.J.; MEDIONDO, E.M.; O'CONNELLI, P.E.; OKI, T.; POMEROY, J.W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS Decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003–2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48 n.6, p. 857–880, 2003.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Editora da Universidade. UFRGS. 1ªedição. Porto Alegre. 256p., 2002.
- YADAV, M.; WAGENER, T.; GUPTA, H. Regionalization of constraints on the expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. **Advances in Water Resources**, v.30, p. 1756–1774, 2007.

2 – OBJETIVO

2.1 – OBJETIVO GERAL

Regionalizar vazões máximas a partir do hidrograma unitário instantâneo geomorfológico em bacias embutidas, com inserção da geometria hidráulica e geometria fractal.

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar a função que melhor se adequa a série de dados de precipitação e determinar a homogeneidade pluviométrica da bacia em estudo;
- ✓ Determinar os expoentes e coeficientes da geometria hidráulica na seção transversal do exutório de cada bacia;
- ✓ Determinar os valores da Geometria Fractal para cada bacia;
- ✓ Inserir as informações da Geometria Hidráulica e da Geometria Fractal no Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico.

Hipótese

A geomorfologia fluvial, caracterizada pela geometria hidráulica e geometria fractal, melhora o desempenho da regionalização de vazão.

3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 – EFEITOS DA GEOMORFOLOGIA FLUVIAL SOBRE OS PROCESSOS DE GERAÇÃO DE VAZÃO.

A geomorfologia de bacias hidrográficas e seus processos hidrológicos estão associados ao desenvolvimento geomorfológico, como inclinação das encostas, forma da bacia, declividade e forma dos canais, tipo e desenvolvimento do solo, processos de erosão e sedimentação, entre outros. Newson & Sear (1998) definiram a geomorfologia fluvial como a ciência que procura investigar a complexidade do comportamento dos canais de rios, desde a escala da seção transversal até a bacia hidrográfica; e a gama de processos e respostas durante uma longa escala temporal.

A relação temporal de desenvolvimento da encosta é frequentemente longa em relação à escala temporal de mudança climática, sendo que a forma da encosta pode ser um reflexo mais dos regimes hidrológicos de um passado distante do que os processos atuais (BEVEN *et al.*, 1988). Avaliando a relação entre a geomorfologia e sua correlação com os processos hidrológicos, Small (1978) comenta que os sistemas de drenagem sempre foram destacados por sua importância, tanto para o homem, como também para os mecanismos de transformação da paisagem. O sistema de drenagem também está vinculado aos processos de dissecação e (re) modelagem do relevo. Beven *et al.* (1988) e Small (1978) afirmam que as formas atuais do relevo são resultantes do somatório dos processos relacionados aos rios e às encostas, e da variação de magnitude e frequência de tais processos ao longo do tempo geológico.

Schumm & Lichty (1965) alegam haver uma inter-relação e dependência entre os processos, (Tabela 3.1), no qual as variáveis são arranjadas em uma hierarquia. Por exemplo, tempo, relevo inicial e geologia são as variáveis independentes que influenciam o ciclo da erosão, densidade e tipo de vegetação dependem da litologia e do clima. À medida que o tempo passa, o sistema de drenagem do relevo é determinado por fatores descritos na Tabela 3.1, e estes, por sua vez, influenciam fortemente o escoamento superficial e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Dentro do sistema, o escoamento superficial e a produção de sedimentos são estabelecidos pelas características morfológicas da rede de drenagem (densidade de drenagem, inclinação do canal, gradiente, padrões de drenagem, entre outros) e da morfologia da encosta, também são influenciados pelo regime pluviométrico

Schumm & Lichty (1965) demonstraram que a distinção entre causa e efeito no sistema fluvial é uma função de tempo e escala espacial. Os fatores determinantes na forma e processo do canal podem ser visualizados em fatores dependentes ou independentes (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Estado de variáveis de controle do rio considerando diferentes escalas temporais.

Variáveis dos rios	Estado das variáveis durante o intervalo de tempo		
	Geológico	Geomorfológico	Ecológico
	> 10 ³ anos	10 - 10 ² anos	1 - 10 anos
Tempo	Independente	Não relevante	Não relevante
Geologia (litologia e estrutura)	Independente	Independente	Independente
Climatologia	Independente	Independente	Independente
Vegetação (tipo e densidade)	Depende	Independente	Independente
Relevo	Depende	Não relevante	Não relevante
Hidrologia (escoamento superficial e produção de sedimentos por unidade de área dentro do sistema)	Depende	Independente	Independente
Morfologia da rede de drenagem	Depende	Depende	Independente
Inclinação da encosta	Depende	Depende	Independente
Hidrologia (vazão líquida e sólida da bacia)	Depende	Depende	Depende

Adaptado de Schumm & Lichty (1965)

Schmidt *et al.* (1998) comentaram que a geomorfologia pode melhorar o entendimento da modelagem dos processos hidrológicos em diferentes caminhos, havendo grande variedade de parâmetros geomorfométricos para quantificar as superfícies do relevo, variando de um simples ângulo de inclinação até a disposição dos componentes do relevo. Parâmetros geomorfométricos, como o ângulo de inclinação e o comprimento da inclinação são os principais controladores de vários processos hidrológicos. Schmidt *et al.* (2000) analisaram os efeitos geomorfológicos no processo de precipitação-escoamento superficial em duas bacias hidrográficas (6,3 km² e 991 km²), localizadas no sudoeste e na parte central da Alemanha, respectivamente. Esses autores pesquisaram os seguintes parâmetros: ângulo de inclinação médio da encosta; espessura do relevo, inclinação do canal principal e $\ln(a'/\tan\beta)$ onde a' é área por unidade de contorno e β é ângulo de inclinação, sendo definido a partir destes parâmetros, o índice topográfico. Estes autores e Schimidt *et al.* (1998) avaliando as vazões em relação à escala local, concluíram que escoamento superficial em pequenas bacias pode

ser definida a partir de áreas que tenham significativa variação da resposta hidrológica na bacia hidrográfica. Nestas pequenas áreas, áreas de encosta das bacias hidrográficas mostram forte relação com as propriedades geomorfológicas. Na escala da bacia hidrográfica, os autores concluíram que os parâmetros, como ângulo de inclinação, comprimento do fluxo e fluxo de acumulação (parâmetros geomorfométricos) mostraram forte influência para a determinação do escoamento superficial. Também, medidas estatísticas dos parâmetros geomorfométricos ($\ln(a'/\tan\beta)$) mostraram boa correlação com índices de escoamento superficial, bem como dimensões temporais de hidrogramas. Schmidt *et al.* (1998) comentaram que a parametrização morfométrica na escala local pode ser realizada através da definição de atributos morfométricos primários, que podem ser simples (ex. inclinação, altitude), complexos (ex. duração da vazão), ou compostos (ex. $\ln(A_i/\tan\beta_i)$), Tabela 3.2

Tabela 3.2 - Significância hidrológica de parâmetros morfométricos.

Parâmetros geomorfométricos primários	Significância hidrológica
Altitude h_i	Energia potencial, efeitos secundários: vegetação, clima.
Inclinação da encosta β_i	Velocidade e proporção de escoamento superficial, escoamento sub-superficial e conteúdo de água no solo.
Curvatura do perfil ω_p	Aceleração da vazão
Plano de curvatura ω_H	Vazão Convergente/ vazão divergente, conteúdo de água do solo.
Área de contribuição	Volume e proporção de vazão superficial e sub-superficial, tempo de concentração.
Altitude média da área de encosta h_A	Energia potencial
Inclinação média da área de encosta β_A	Velocidade do escoamento
Comprimento do fluxo até a foz	Perda por infiltração, impedância da drenagem do solo.
Altitude média dos caminhos de fluxo até a seção	Volume e proporção do escoamento superficial e sub-superficial.
Altitude mínima dos caminhos de fluxo até a seção	Velocidade e volume do escoamento superficial (Horton, 1945)

Tabela 3.2 Continuação	
Parâmetros geomorfométricos primários	Significância hidrológica
Comprimento da encosta/Posição da encosta	Velocidade e volume do escoamento superficial, conteúdo de água no solo (O'Loughlin, 1981)
$\ln (A_i/\tan\beta_i)$	Conteúdo de água no solo (e.g. Moore <i>et al.</i> 1991)
$(A_i/\tan\beta_i) \cdot \omega_H$	Conteúdo de água no solo e.g. Moore <i>et al.</i> 1991) Velocidade e volume do escoamento superficial (Horton, 1945)
Área em declive/comprimento da encosta	Conteúdo de água no solo O'Loughlin, 1981)
Inclinação/comprimento de encosta	Capacidade de transporte (Montgomery <i>et al.</i> 1993)
$A_i \cdot (\tan\beta_i)^2$	

Adaptado de Schmidt *et al.* (1998).

Wooding (1965) e Beven & Wood (1993) avaliando o efeito do tamanho da bacia hidrográfica sobre as respostas hidrológicas, concluíram que para pequenas bacias as respostas das encostas são mais importantes que as respostas da rede de drenagem, e com o incremento do tamanho da bacia, as respostas hidrológicas passam a ser dominadas pela resposta da rede de drenagem. No entanto, Robison *et al.* (1995) salientam que Wooding (1965) não analisou os complexos efeitos da geometria da rede de drenagem sobre as respostas hidrológicas. Porém, Robison *et al.* (1995) chegaram a resultados semelhantes aos de Wooding (1965), os quais, concluíram que para pequenas bacias as respostas hidrológicas são governadas primariamente pelas encostas, e que com o aumento da área da bacia estas respostas são dependentes da geomorfologia da rede de drenagem.

Robison *et al.* (1995) ainda corroboram para o conceito de não linearidade hidrológica, onde as respostas hidrológicas, tanto na escala da encosta, quanto na escala da rede de drenagem não são lineares, ou seja, o pico de vazão e o tempo de pico não necessariamente são proporcionais ao pico de precipitação. Valdés *et al.* (1979) e Robison & Sivapalan (1995) definiram que as respostas não lineares da bacia hidrográfica podem ser expressas pela função de resposta instantânea, expressa por:

$$q(t) = \int_0^t p_e(\tau) f(t - \tau; p_e(\tau)) d\tau \quad (3.1)$$

onde $p_e(\tau)$ é a intensidade da precipitação efetiva; e $f(t - \tau; p_e(\tau))$ é a função resposta instantânea correspondente a $p_e(\tau)$.

O conceito de não linearidade, ou seja, função de resposta instantânea é abordada por Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979) que apresentam a função densidade de probabilidade (PDF), que é expressa pela ordenada $h(t)$ do GIUH, ou seja:

$$h(t) = \sum [f_{x_{oi}}(t) * f_{x_j}(t) * f_{x_j}(t) * \dots * f_{x_k}(t)]_w \cdot \Pr(\gamma) \quad (3.2)$$

onde f_{x_j} é a função do tempo de permanência da gota no canal de ordem (Ω); * é a operação de convolução; e $\Pr(\gamma)$ é a probabilidade de a gota seguir o caminho γ .

Nesse sentido, o princípio da teoria do GIUH é derivar esta PDF com base em parâmetros geomorfológicos e tendo como dado de entrada a precipitação efetiva. Esta é considerada por um número infinito de pequenas gotas, de tamanho uniforme e sem interação, que caem instantaneamente e homoganeamente ao longo de toda a bacia. Assim se percebe que o GIUH proposto inicialmente por Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979) responde a questão de não linearidade existente no processo Precipitação (P) – Vazão (Q) em uma bacia hidrográfica.

O presente trabalho vislumbra que a inserção de novos parâmetros geomorfológicos, Geometria Hidráulica e Geometria Fractal, para determinação do GIUH, pode explicar melhor os efeitos dos processos hidrológicos na escala da enconsta e na escala da rede drenagem, pois a GF com a aplicação das leis de Horton contempla tanto a escala dos canais (df) quanto a escala da bacia hidrográfica (Df). A forma das seções transversais dos canais pode ser explicada pela Geometria Hidráulica, no qual os canais são produtos da interação entre uma gama de vazões impostas no decorrer do tempo e do espaço e o processos geomorfológicos ocorridos.

3.2 – GEOMETRIA HIDRÁULICA (GH)

Durante um tempo relativo, a morfologia dos canais de rios é dependente dos ambientes climáticos e geológicos, mas durante um curto intervalo de tempo, a morfologia do canal é uma variável independente influenciada pela hidráulica do canal (Schumm & Lichty, 1965). Sendo que o canal busca um equilíbrio, em virtude das forças atuantes, Leopold (1994) comenta que as mudanças das descargas ocasionam as seguintes mudanças:

- ✓ Tanto a profundidade, quanto a velocidade aumentam substancialmente com o aumento da descarga, e aproximadamente na mesma taxa.

- ✓ A largura do canal aumenta sensivelmente com o aumento da descarga.
- ✓ A rugosidade hidráulica do canal decresce sensivelmente com o aumento da descarga.
- ✓ A inclinação da superfície da água não se altera apreciavelmente com a descarga quando medida ao longo de uma distância equivalente a várias larguras do canal.
- ✓ A carga de sedimentos suspensos no canal aumenta rapidamente com o aumento da descarga, e a uma taxa muito maior que os outros parâmetros.

Leopold & Maddock (1953) também abordam que a vazão sólida e líquida é resultado da interação entre os mecanismos da hidrologia, geologia e fisionomia da bacia, os quais podem promover o equilíbrio dos processos naturais na bacia hidrográfica. A forma de uma seção transversal de qualquer rio, basicamente descrita por sua largura e profundidade, pode ser vista como indicador desse equilíbrio, pois também é função da quantidade de água drenada superficialmente e da quantidade e característica do material sedimentar de suas margens e leito (Leopold, 1964).

Com o intuito de estabelecer funções que correlacionam os fatores hidráulicos atuantes em uma bacia hidrográfica e a relação que estes determinam sobre as formas do canal, tanto em uma seção definida, quanto ao longo do canal, Leopold & Maddock (1953) propuseram a teoria da Geometria Hidráulica (GH). Para isso, os autores avaliaram o comportamento da largura (w), profundidade (d), velocidade (v) e carga sedimentar (Q_s) de um curso d'água natural sobre uma variedade de fluxos impostos no decorrer do tempo e do espaço (Figura 3.1). Os autores dividiram sua teoria em duas partes, uma avalia as mudanças de w , d e v na seção transversal e outra avalia as adaptações do tamanho e forma do canal ao longo da bacia, sendo estas relações expressas como funções potenciais, diferenciadas somente pelos valores de seus expoentes e coeficientes, criando o termo Geometria Hidráulica, conforme as seguintes equações:

$$w = a.Q^b \quad (3.3)$$

$$d = c.Q^f \quad (3.4)$$

$$v = k.Q^m \quad (3.5)$$

$$Q_s = p.Q^j \quad (3.6)$$

$$S = r.Q^z \quad (3.7)$$

onde Q é a vazão líquida [m^3/s]; w é a largura (ou largura de topo) [m]; d é a profundidade média (ou profundidade hidráulica) [m]; v é a velocidade média, determinada pela razão entre

vazão líquida e área molhada da seção [m/s]; Q_s é a vazão sólida [ton/dia]; S é a declividade da superfície da água [m/m]; a , c , k , p e r são coeficientes; e b , f , m , j e z são expoentes. A Figura 3.1 demonstra graficamente as variáveis da GH.

Devido a largura, profundidade e velocidade serem função da descarga, como descrito pelas equações 3.3 a 3.5, estas equações podem ser relacionadas com a equação da continuidade, no qual,

$$Q = \text{área}[m^2] \cdot \text{velocidade}[m/s] \text{ ou } Q = w[m] \cdot d[m] \cdot v[m/s] \quad (3.8)$$

Substituindo

$$Q = aQ^b \cdot cQ^f \cdot kQ^m \text{ ou } Q = a \cdot c \cdot k \cdot Q^{b+f+m} \quad (3.9)$$

então,

$$b + f + m = 1 \quad (3.10)$$

$$a \cdot c \cdot k = 1 \quad (3.11)$$

De acordo com Ferguson (1986) quando os expoentes b , f e m são avaliados ao longo do canal a configuração normalmente encontrada é $b > f > m$, com valores típicos em torno de 0,5; 0,4 e 0,1. Quando estes expoentes são avaliados na seção de medição a configuração tipicamente encontrada é $f > m > b$, com valores médios de 0,4; 0,34 e 0,26.

Parker (1979) afirmou que os fatores de escala, a , c , e k , variam de localidade para localidade, mas os expoentes, b , f , e m , apresentam um notável grau de consistência, e parecem independente da localização e apenas fracamente dependente do tipo de canal. A afirmação de Parker (1979) evidencia o porquê dos coeficientes a , c e k não apresentam relevância na sustentação da teoria da GH. Além deste, Ferguson (1986) relata que em mais de 30 anos de trabalhos empíricos, os coeficientes de interceptação a , c e k não tem tido nenhuma atenção.

De acordo com Grison & Kobiyama (2011b) se a largura, a profundidade e a velocidade forem plotadas contra a vazão em escala logarítmica as relações resultantes serão expressas por linhas retas, o que matematicamente facilita a interpretação. Por isso, os expoentes das equações 3.3, 3.4 e 3.5 representam a inclinação de suas respectivas retas de ajuste. Os coeficientes representam interseção das retas quando a vazão é a unidade e por isso não são muito estudados na geometria hidráulica.

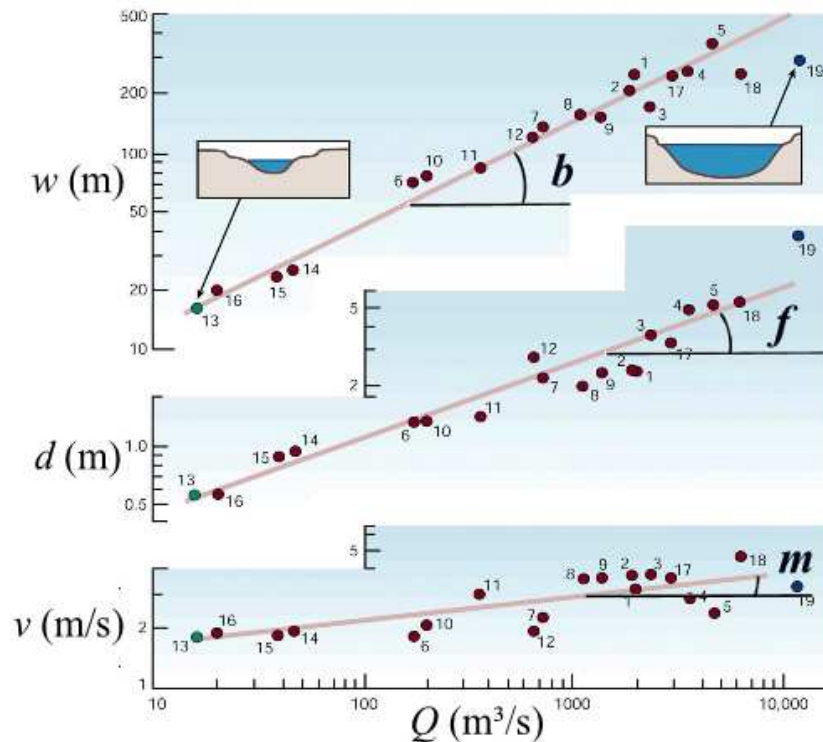


Figura 3.1 - Comportamento das variáveis da geometria hidráulica em função da variação da vazão (adaptada de Leopold & Maddock, (1953) por Grison (2013)).

Vale ressaltar que estas relações da geometria hidráulica, da forma que foram apresentadas, são válidas somente para variações dentro da calha principal do canal do rio, no momento que há o extravasamento da calha estas equações, neste formato, não se aplicam.

Analisando a referida teoria fica evidente que forma da seção transversal de um determinado local e ao longo do canal é o produto das interações dos mecanismos hidrológicos, geológicos, geomorfológicos e pedológicos ocorrentes na bacia, então se pode afirmar que sabendo a forma do canal, pode-se inferir a vazão passante neste canal.

Em relação ao entendimento entre as condições hidráulicas e geomorfológicas na GH, Grison *et al.* (2014) afirmam que sua análise e interpretação podem ser realizadas pelo diagrama proposto por Rhodes (1977). O diagrama interpreta os expoentes b , f e m e suas implicações nas relações da geometria hidráulica. Para sua interpretação, divide-se o diagrama em 10 campos, sendo que cada campo representa um tipo de canal. As divisões foram feitas por linhas retas que representam relações específicas entre os expoentes. Como $b + f + m = 1$, os três expoentes podem ser representados em um único ponto no diagrama (o que facilita a comparação com outros pontos). Por exemplo, o ponto P na Figura 3.2 representa os valores $b = 0,1$, $f = 0,5$ e $m = 0,4$. Cada ponto é interpretado em termos de comportamento hidráulico e de estabilidade do canal, conforme o campo em que ele se situa no diagrama. Segundo

Rhodes (1977), essa teoria é um recurso útil para sumarizar as complicadas interações da morfologia com suas dinâmicas variáveis dos rios naturais.

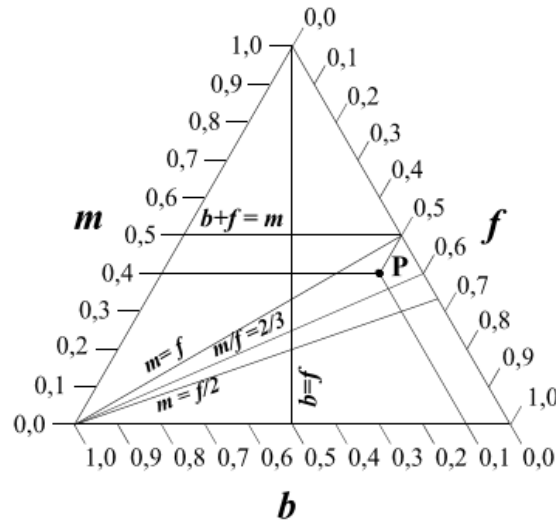


Figura 3.2 - Diagrama triaxial com suas subdivisões ($b=f$; $m=f$; $m=f/2$; $b+f=m$; $m/f=2/3$ e expoente r), tipos de canais (1 a 10) (adaptada de Leopold & Maddock, (1953) por Grison (2013)).

Analisando a Figura 3.2 observa-se que as subdivisões do diagrama são: $b = f$, $m = f$, $m = f/2$, $b + f = m$ e $m/f = 2/3$. A subdivisão $b = f$ (Figura 3.3) está relacionada à taxa de mudança da relação w/d (largura por profundidade média). Podem-se interpretar as Equações 3.3 e 3.4, respectivamente, com o acréscimo da vazão da seguinte maneira:

Se $b = f$, w/d não muda com o acréscimo da vazão; Se $b > f$, lado esquerdo dessa subdivisão, w/d aumenta com o acréscimo da vazão; Se $b < f$, lado direito dessa subdivisão, w/d diminui com o acréscimo da vazão.

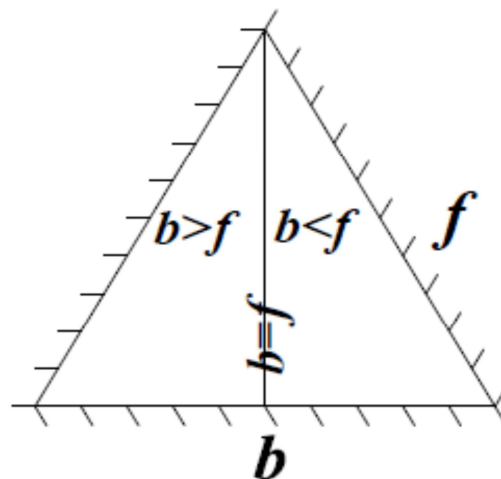


Figura 3.3 - Subdivisão $b = f$
(adaptada de Leopold & Maddock, (1953) por Grison (2013)).

Segundo Schumm (1977), a relação w/d é importante para relacionar a morfologia do canal com a vazão líquida e sólida. Segundo Rhodes (1977), canais com seção transversal em forma de triângulo possuem a taxa w/d constante e canais com forma retangular e parabólica diminuem essa taxa com o acréscimo de vazão. Em canais retangulares, a diminuição dessa taxa é maior do que nas outras formas (Leopold & Maddock, 1953). Uma explicação para o decréscimo da taxa w/d com o acréscimo da vazão é que as margens do canal são mais estáveis do que o leito. A taxa w/d representa uma medida inversa da influência das margens do canal na resistência ao fluxo e por isso é um dos mais importantes parâmetros de forma de seções transversais. Por exemplo, um valor grande de w/d significa um efeito pequeno do atrito das margens no fluxo e efeito maior do atrito devido ao leito do canal.

Grison & Kobiyama (2011a) relatam que existem diversos tipos de trabalhos que abordaram direta ou indiretamente a teoria da geometria hidráulica. Dentre eles pode-se dizer que, em geral, os principais focos de estudo são: (1) análise da geometria hidráulica de seção e/ou em direção à jusante (Ran *et al.*, 2011; De Rose *et al.*, 2008; Zhang *et al.* 2015); (2) análise da vazão dominante na geometria hidráulica (Pietsch & Nanson, 2011; Harman *et al.*, 2008; (3) geometria hidráulica relacionada ao transporte de sedimentos (Turowski *et al.*, 2008; Donghwi *et al.*, 2013; Vachtman & Larone, 2013); (4) comportamento dos expoentes b - f - m ; (Aquino *et al.*, 2005, Grison & Kobiyama, 2011b); e (5) modelagem matemática na geometria hidráulica (Buhman, *et al.*, 2002), entre outros.

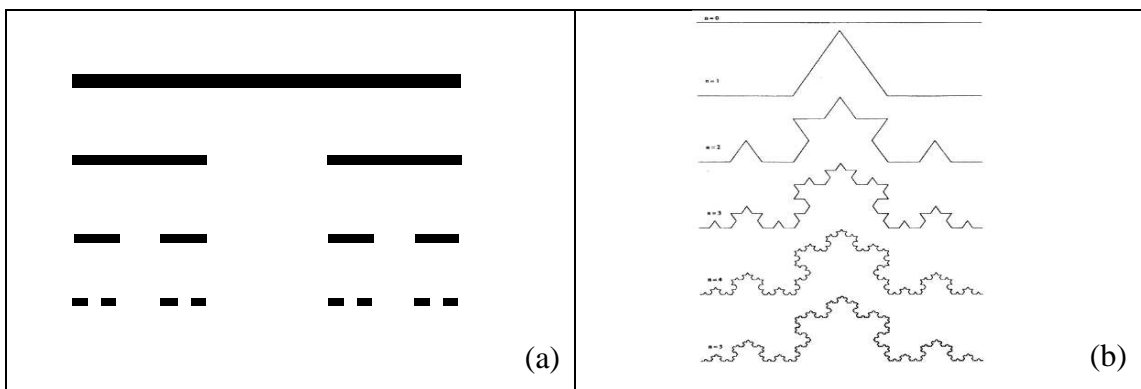
Entre os estudos apresentados observa-se que o objetivo de se estudar a GH, além do seu conhecimento, propriamente dito, são os mais variados, entre eles: suporte para a restauração e renaturalização de rios; processos de erosão e sedimentação nos canais, principalmente a jusante de reservatórios; evolução da paisagem hidrogeomorfológica, estudo de habitat para peixes, consistência de dados fluviométricos, estudo de vazões e estudo de regionalização hidrológica, entre outros. No entanto, constata-se que a GH ainda não foi abordada com o intuito de utilizar os parâmetros b , f e m para predizer vazões unitárias, especialmente para geração do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico - GIUH.

3.3 – GEOMETRIA FRACTAL (GF)

A palavra fractal, cuja etimologia vem do latim fractus, que significa “fração”, “fragmento”, “irregular ou fragmentado”, foi definida e incorporada dentro da geometria. O termo Geometria Fractal (GF) foi introduzido por Mandelbrot (1982) para descrever padrões

de distribuição, estruturas significativamente complexas da natureza, ou seja, formas irregulares, fragmentadas, especialmente aquelas que possuem auto-similaridade e/ou auto afinidade. Com a inserção dessa nova forma de estudar as formas geométricas da natureza, Mandelbrot passou a ser considerado o "Pai" da geometria fractal.

Essa teoria analisa o comportamento caótico dos sistemas estando intimamente ligada a teoria do Caos, ambas buscam padrões dentro de um sistema por vezes aparentemente aleatório (Barbosa, 2002). Nesse sentido, a teoria do caos examina o desenvolvimento de um processo ao longo de um período de tempo, mas quando o interesse se encontra dirigido para as formas estruturais então se usa a terminologia da geometria fractal. A teoria da GF está embasada no processo de similaridade e repetitividade de padrões em diferentes níveis de escala, Mandelbrot (1967) definiu que os métodos de auto-similaridade são uma ferramenta potente no estudo destes fenômenos, onde quer que apareça, da geoestatística para a economia até a física. Porém, bem antes dos questionamentos levantados por Mandelbrot (1967) já era conhecido no meio científico alguns conjuntos, que precederam a teoria de Mandelbrot. Entre estes se podem citar o conjunto de Cantor (Figura 3.4a), a curva de Koch (Figura 3.4b), o triângulo de Sierpinski (Figura 3.4c) e o conjunto de Julia (Figura 3.4d), entre outros. Pode-se observar o princípio da GF, onde, o atributo de auto-similaridade dos objetos é evidenciado. Ao olhar mais detalhadamente as imagens, verificar-se-á que as formas observadas em uma escala são similares às formas vistas em detalhe em outra escala.



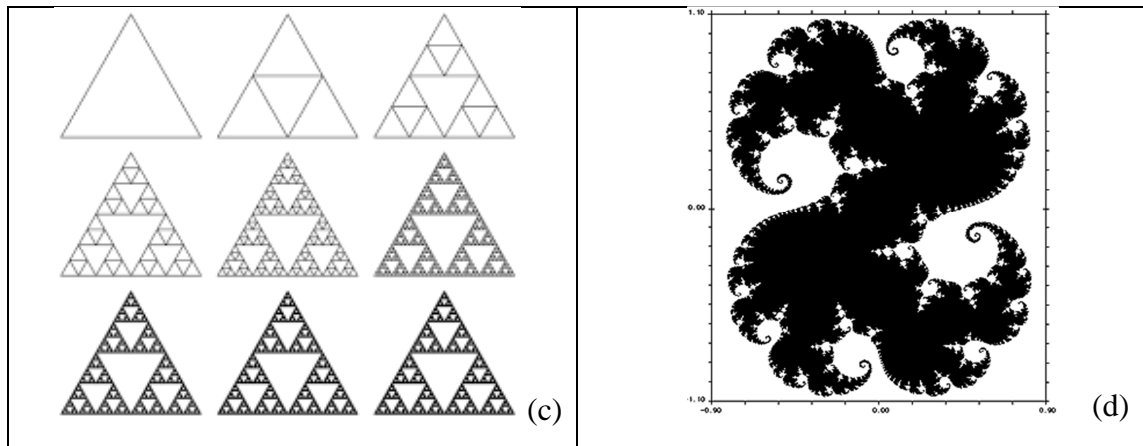


Figura 3.4 - Precedentes clássicos a geometria fractal: (a) conjunto de Cantor; (b) curva de Koch; (c) triângulo de Sierpinski; e (d) conjunto de Julia.

Rodríguez-Iturbe *et al.* (1992) comentaram que as medidas fractais desde os estudos clássicos de Mandelbrot (1982) têm sido amplamente utilizadas para a caracterização dos conjuntos geométricos existentes na natureza, tanto na escala temporal quanto na escala espacial. Os autores citaram diversos trabalhos no âmbito da hidrologia que abordaram tal teoria: Séries temporais de precipitação (Tessier *et al.*, 1993; Olsson *et al.*, 1995), resposta de vazões por chuvas de radar (Gupta & Waymire, 1993; Lovejoy *et al.*, 1996), entre outros. Recentemente pode-se exemplificar os trabalhos de Jianhua *et al.* (2008) que avaliaram a tendência de longo termo e fractal nos processos de escoamento superficial anual do fluxo dominante no rio Tarim, localizado na China. Abedini & Shaghaghian (2009) estudaram a geometria fractal na superfície topográfica e sua relação com as leis de armazenamento de água no solo e escoamento superficial. Zhihui *et al.* (2013) avaliaram a relação entre a largura da seção e a vazão através da geometria fractal.

Puente & Castillo (1996) em seu trabalho sobre a estrutura fractal da rede de drenagem e divisores topográficos dentro de bacias hidrográficas, localizadas na Colômbia e Estados Unidos da América, comentam que a geometria fractal de redes de drenagem tem recebido considerável atenção por diversos autores, citando, como exemplo Tarboton *et al.* (1988), La Barbera & Rosso (1989), Marani *et al.* (1991), Rodríguez-Iturbe *et al.* (1992), Rinaldo *et al.* (1992), Beer & Borgas (1993) e Nikora & Sapozhnikov (1993), entre outros. Sendo, no entanto, as clássicas leis geomorfológicas propostas por Horton (1945) e Schumm (1956) os maiores desenvolvimentos, na elucidação de uma variedade de expressões que relatam as dimensões fractais de uma bacia hidrográfica. Analisando os trabalhos sobre geometria fractal no âmbito da hidrologia observa-se que esta teoria é pouca explorada no Brasil, podendo-se citar os trabalhos de Gomes & Chaudhry (1999) que analisaram as características físicas da

rede de drenagem pela abordagem fractal em três bacias hidrográficas, localizadas no Estado de São Paulo; Kobiyama *et al.*, (2001) que analisaram hidrogramas na bacia dos rios Nhundiaquara e Marumbi - PR; nesta mesma bacia Kobiyama & Bueno Jr. (2002) analisaram a dimensão fractal (D_f) da respectiva bacia; Vestena & Kobiyama (2010) pesquisaram a dimensão fractal da rede de drenagem e dos segmentos dos cursos fluviais da bacia hidrográfica do rio Caeté - SC; e Schuch & Loch (2011) determinaram a variação do padrão fractal da rede de drenagem utilizando dados SRTM, *laser scanning* e base cartográfica na bacia do rio Cachoeira - SC.

Com os trabalhos citados observa-se a GF é bastante utilizada em diversas áreas da Hidrologia, entre elas a determinação da rede de drenagem, que é obtida a partir das leis de Horton (1945). A partir desta constatação conclui-se que esta metodologia não foi abordada para predizer vazões, principalmente, quando se quer determinar vazões através do GIUH. No entanto, este trabalho traz a inovação científica de abordar a GF como parâmetro de auxílio para determinação de vazões através do GIUH.

3.4 – REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

O termo regionalização tem sido utilizado em hidrologia para denominar a transferência ou extrapolação de informações de um local com dados monitorados para outro local com poucos dados (tanto qualitativos quanto quantitativos), ou até mesmo sem dados (SMAKTHIN, 2001; JEVILLE *et al.*, 2002; ISIK & SINGH, 2008).

O princípio da regionalização se baseia na similaridade espacial de algumas funções, variáveis e parâmetros que permitem essa transferência (Tabela 3.3). No entanto, Malekinezhad *et al.* (2011) observaram que bacias que pertencem à mesma zona hidrométrica, podem não ter necessariamente semelhantes respostas hidrológicas, e que a proximidade geográfica não é uma condição suficiente para a homogeneidade hidrológica.

Isik & Singh (2008) abordam que a regionalização compreende as seguintes etapas:

- I. Definição dos limites da área a ser estudada;
- II. Definição das variáveis dependentes e explicativas da regionalização,
- III. Seleção dos dados das variáveis e
- IV. Ajuste de funções regionais: relações regionais e definição das regiões homogêneas.

A regionalização de uma função ou variável é estabelecida através de um dos seguintes critérios:

I. Estabelecimento da relação empírica entre valores da função e características conhecidas, espacialmente, do sistema hidrológico;

II. Estabelecimento da função com base nos valores do item anterior ou de relações adimensionais.

Tabela 3.3 - Exemplos de variáveis na regionalização.

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

Fonte: Tucci, 2002

Os processos que caracterizam a variabilidade da vazão ou de suas estatísticas no espaço dependem de vários fatores, como: as condições climáticas que caracterizam o balanço do escoamento médio; as condições de relevo, solo e cobertura que definem o escoamento superficial e os volumes infiltrados; a geologia que define as condições do escoamento subterrâneo, e as vazões de estiagem (SILVA JUNIOR *et al.*, 2003).

Masih *et al.* (2010) comentam que os métodos de regionalização podem ser globalmente classificados em dois grupos, baseado na sua dimensão temporal.

O primeiro grupo aborda a estimativa de vazões em séries temporais contínuas (MERZ & BIÖSCHL, 2004). O segundo grupo estima os índices hidrológicos selecionados, tais como a vazão média anual e o índice do fluxo de base, ou várias percentagens de vazões instantâneas de séries temporais contínuas, como, por exemplo, a regionalização da curva de permanência (CASTELLARIN *et al.*, 2004). O mesmo autor cita que a curva de permanência pode ser definida por abordagens estatísticas, paramétricas e gráficas.

Os métodos usados para a estimativa de séries temporais de vazões podem ainda ser classificados em três sub-grupos: (i) estimativa dos parâmetros do modelo, desenvolvido pelas relações de regressão entre parâmetros do modelo e características da bacia (ii) transferência dos parâmetros do modelo, pelo qual uma análise de similaridade de uma bacia hidrográfica é realizada e os parâmetros da bacia são usados em simulações em bacias sem dados ou com

poucos dados (KOKKONEN *et al.*, 2003; WAGENER *et al.*, 2007); e (iii) outras técnicas de regionalização, tais como a interpolação espacial de parâmetros (MERZ & BLÖSCHL, 2004), ou agrupamento regional de dados para estimativa de parâmetros para bacias com pouco/sem dados (GOSWAMI *et al.*, 2007).

Silveira & Silveira (2003) advertem que os estudos de regionalização hidrológica para a realidade brasileira, por serem definidos a partir de uma base de dados proveniente de bacias maiores (área > 500 km²) não devem, por consequência, serem aplicados fora dos limites estabelecidos pelas equações regionais e, principalmente, para as bacias consideradas pequenas (áreas < 100 km²). Sendo os principais limitantes para a regionalização os seguintes fatores: (i) diferenças nas escalas espaço-temporais dos mecanismos de transformação chuva-vazão nas pequenas e grandes bacias; (ii) dificuldade de caracterização de regiões hidrologicamente homogêneas em pequenas áreas; (iii) dificuldades de obtenção de dados confiáveis convencionais para as vazões mínimas.

3.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDINI, M. J.; SHAGHAGHIAN, M. R. Exploring scaling laws in surface topography. **Chaos, Solitons and Fractals**, v.42, p. 2373- 2383, 2009.
- AQUINO, S.; STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Regime hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do Rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, p. 29-41, 2005.
- BARBOSA, R. M. **Descobrimo a geometria fractal para a sala de aula**. Ed. Autêntica, Belo Horizonte, 142 p., 2002.
- BEER, T.; BORGAS, M. Horton's laws and the fractal nature of streams. **Water Resources Research**, v. 29 n.5, p. 1475- 1487, 1993.
- BEVEN, K. J.; WOOD, E. F.; SIVAPALAN, M. On hydrological heterogeneity - catchment morphology and catchment response. **Journal of Hydrology**, v. 100, p. 353-375, 1988.
- BEVEN, K. J.; WOOD, E. F. Flow routing and the hydrological response of channel networks, Channel Network Hydrology, **Journal of Hydrology**, v. 128, p. 99-128, 1993.
- BUENO JUNIOR, J.; KOBAYAMA, M. Multifractal characteristics of drainage network of Marumbi river watershed, Paraná State. In. **XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Salvador-BH, 2002.
- BUHMAN, D.; GATES, T.; WATSON, C. Stochastic variability of fluvial hydraulic geometry: Mississippi and Red Rivers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.128, p. 426-437, 2002.
- CASTELLARIN, A.; GALEATI, G.; BRANDIMARTE, L.; MONTANARI, A.; BRATH, A. Regional flow-duration curves: Reliability for ungauged basins. **Water Resources**, v.27, p. 953–965, 2004.

- DE ROSE, R. C.; STEWARDSON, M. J.; HARMAN, C. Downstream hydraulic geometry of rivers in Victoria, Australia. **Geomorphology**, v. 99, p. 302-316, 2008.
- DONGHWI, J.; PAIK, K.; KIM, J. H. Relationship between downstream hydraulic geometry and suspended sediment concentration characteristics. **Hydro-environment Research**, v. 7, p.243-252, 2013.
- FERGUSON, R. I. Hydraulics and hydraulic geometry. **Progress in Physical Geography**, v. 10, p. 1-31, 1986.
- GOMES, M. H. R.; CHAUDHRY, F. H. Análise fractal de redes de drenagem de bacias hidrográficas. In. **XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 1999.
- GOSWAMI, M.; O'CONOOR, K.M.; BHATTARAI, K.P. Development of regionalization procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. **Journal of Hydrology**, v. 333, pp. 517–531, 2007.
- GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Teoria e aplicação da geometria hidráulica: Revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, 14p, 2011a.
- GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Geometria hidráulica em bacias hidrográficas Paranaenses. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.16, n.2, p.111-131, 2011b.
- GRISON, F. **Estudo da geometria hidráulica do rio dos Bugres, no município de Rio Negrinho – SC**. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, 209p, 2013.
- GRISON, F.; MOTA, A. de A. KOBIYAMA, M. Geometria hidráulica de seções transversais do rio dos Bugres. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.14, n.4, p. 205-213, 2014.
- GUPTA, V.K., WAYMIRE, E. A statistical analysis of mesoscale rainfall as a random cascade, **Journal Applied Meteorology**, v.32, p. 251-267, 1993.
- HARMAN, C.; STEWARSON, M.; DE ROSE, R. Variability and uncertainty in reach bankfull hydraulic geometry. **Journal of Hydrology**, v. 351, p. 13-25, 2008.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol Soc. Am. Bull.**, v.56, n.3, p.275-370, 1945.
- ISIK, S.; SINGH, V. P. Hydrologic Regionalization of Watersheds in Turkey. **Journal of Hydrologic Engineering**. v.13, p. 824-834, 2008.
- ITURBE, I. R.; RINALDO, A.; RIGON, R.; BRAS, R. L.; VASQUEZ, E., I.; MARANI, A. Fractal structures as least energy patterns: the case of river networks. **Geophysical Research Letters**, v. 19. n.9, p. 889-892, 1992.
- JIANHUA, X.; YANING, C.; WEIHONG, L.; SHAN, D. Long-term trend and fractal of annual runoff process in mainstream of Tarim river. In. **Chin. Geogra. Sci.**, p.77-84, 2008.
- JEVELLE, P.; OUARDA, T.B.M.J.; LANG, M.; BOBEE, B.; GALEA, G.; GRESILLON, J.M. Development of regional flood-duration-frequency curves based on the index-flood method. **Journal of Hydrology**. v. 258, p. 249–259, 2002.

- KOBIYAMA, M. BUENO Jr, J.; FRUET D.; SANTOS, I. dos Análise do hidrograma das bacias dos rios Nhundiaquara e Marimbi-PR: Estudo preliminar com geometria fractal. In. **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju-SE, 2001.
- KOKKONEN, T. S.; JAKEMAN, A. J.; YOUNG, P. C.; KOIVUSALO, H. J. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. **Hydrological Processes**. v. 17, p. 2219–2238, 2003.
- LA BARBERA, P. & ROSSO, R. On the fractal dimensions of stream networks. **Water Resources Research**, v. 25, n. 4, p. 735-741, 1989.
- LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. **The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications**. United States Geological Survey, Prof. Paper, n.252, 56p, 1953.
- LEOPOLD, L. B. **Fluvial Processes in Geomorphology**. Dover publications, Inc. New York, 522p. 1964.
- LOVEJOY, S., DUNCAN, M., SCHERTZER, D. The scalar multifractal radar observer's problem and rain, **Journal of Geophysical Research**., v.101 (D21), p. 479-492, 1996.
- MALEKINEZHAD, H.; NACHTNEBEL, H. P.; KLIK, A. Comparing the index-flood and multiple-regression methods using L-moments. **Physics and Chemistry of the Earth** v. 36, p. 54-60, 2011.
- MANDELBROT, B. B. How long is the coast of Britain? Stastical self-similarity and fractional dimension, **Science**, v. 156, n. 3775, p. 636-638, 1967.
- MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 468p, 1982.
- MARANI, A.; RIGON, R.; RINALDO, A. A note on fractal channel networks. **Water Resources Research**, v. 27, n.12, p. 3041-3049, 1991.
- MASIH, I.; UHLENBROOK, S.; MASKEV, S.; AHMAD, M. D. Regionalization of a conceptual rainfall-runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid karkheh basin, Iran. **Journal of hydrology** v. 391, p. 188-201, 2010.
- MERZ, B., BLÖSCHL, G. Regionalization of catchment model parameters. **Journal Hydrology** v. 287, p. 95–123, 2004.
- MONTGOMERY, D. R.; FOUFOULA, G. E. Channel Network Source representation using digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 29, p. 3925-3934, 1993.
- NIKORA, V.I.; SAPOZHNIKOV, V.B. River network fractal geometry and its computer simulation. **Water Resources Research**, v. 29, n.10, p. 3569-3575, 1993.
- NEWSON, M. D.; SEAR, D. The role of geomorphology in monitoring and managing river sediment systems. **Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management**, v.12, p.18–24, 1998.
- O'LOUGHLIN, E. M. Saturation regions in catchments and their relation to soil and topographic properties. **Journal of Hydrology**, v. 53, p. 229-246, 1981.
- OLSSON, J., NIEMCZYNOWICZ, J., BRENDTSSON, R. Fractal analysis of high resolution rainfall time series, **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n.12, p. 2326-2327, 1995.

- PARKER, G. Hydraulic geometry of active gravel rivers. **Journal of Hydraulic Division**, Proc. ASCE, v. 105, No. HY9, p. 1185-1201, 1979.
- PIETSCH, T. J.; NANSON, G. C. Bankfull hydraulic geometry; the role of in-channel vegetation and downstream declining discharges in the anabranching and distributary channels of the Gwydir distributibe fluvial system, southeastern Australia. **Geomorphology**, v.129, p. 152-165, 2011.
- PUENTE, C. E.; CASTILHO, P. A. On the fractal of networks and dividers within a watershed. **Journal of Hydrology**, v.187, p. 173-181, 1996.
- RAN, L.; WANG, S.; LU, X. X. Hydraulic geometry change of a large river: a case study of the upper Yellow River. **Environmental Earth Science**, v. 66, p.1247–1257, 2012.
- RHODES, D. D. The b-f-m diagram graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry. **American Journal of Science**, v.277, p.73–42, 1977.
- RINALDO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; RIGON, R.; BRAS, R.L.; LJASZ-VASQUEZ, E.; MARANI, A. Minimum energy and fractal structures of drainage networks. **Water Resources Research**, v. 28, n. 9, p. 2183-2195, 1992.
- ROBISON, J. S.; SIVAPALAN, M.; SNELL, J. D. On the relative roles of hillslope processes, channel routing, and network geomorphology in the hydrologic response of natural catchments. **Water Resources Research**, v. 31, n.12, p. 3089-3101, 1995.
- RODRÍGUEZ -ITURBE, I.; VALDÉS, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 15 n.6, 12p., 1979.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I., IJJASZ-VASQUEZ, E., BRAS, R.L. TARBOTON, D.G. Power law distributions of discharge mass and energy in river basins. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1089-1093, 1992.
- SCHMIDT, B. J.; MERZ, P. B.; DIKAU, B. R. Morphological structure and hydrological processes modelling. **Geomorphology**, v. 112, p.55-66, 1998.
- SCHMIDT, J.; HENNRICH, K.; DIKAU, R. Scales and similarities in runoff processes with respect to geomorphometry. **Hydrological Processes**, v. 14, p.1963-1979, 2000.
- SCHUCH, F. S.; LOCH, C. Determinando a variação do padrão fractal de rede de drenagem utilizando dados SRTM, laser scanning e base cartográfica. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63 n.03, p. 377-386, 2011.
- SCHUMM, S.A. **The fluvial system**. John Wiley & Sons, New York - EUA, 338p., 1977.
- SILVA JUNIOR, O. B. ; BUENO, E. de O.; TUCCI, C. E. M.; CASTRO, N. M. R. Extrapolação Espacial na Regionalização da Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** V.8 n°1 Jan/Mar, p. 21-37, 2003.
- SILVEIRA, A. L. L. da; SILVEIRA, G. L. da; Vazões mínimas (capítulo 5) In. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p. 125-163, 2003.
- SMALL, R. J.; **The study of landforms**. Cambridge University Press, Cambridge, 2ª edictal, 502p, 1978.
- SMAKHTIN, V.U., Low Flow Hydrology: A Review. **Journal of Hydrology** v. 240, p. 147-186, 2001.
- TARBOTON, D.G.; BRAS, R. L.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; The fractal nature of river networks. **Water Resources Research**. v. 24, n. 8, p. 1317-1322, 1988.

- TESSIER, Y., LOVEJOY, S., SCHERTZER, D. Universal multifractals: theory and observations for rain and clouds, **Journal of Applied Meteorology**, v.32, n.2, p. 223-250, 1993.
- TUROWSKI, J. M.; HOVIUS, N.; WILSON, A.; HORNG, M. Hydraulic geometry, river sediment and definition of bedrock channels. **Geomorphology**, v. 99, p. 26-38, 2008.
- VACHTMAN, D.; LARONNE, J. B. Hydraulic geometry of cohesive channels undergoing base level drop. **Geomorphology**, v. 197, p. 76-84, 2013.
- VALDÉS, J. B.; FIALHO, Y.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I. Rainfall-runoff analysis of the geomorphic IUH. **Water Resources Research**, v. 15, n.6, p. 1421-1434, 1979.
- VESTENA, L. R.; KOBIYAMA, M.; A Geometria fractal da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner - SC. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.4, pp.661-668, 2010.
- WAGENER, T.; SIVAPALAN, M.; TROCH, P.; WOODS, R. Catchment classification and hydrologic similarity. *Geography Compass* 1, p. 901-931, 2007.
- WOODING, R. A. A hydraulic model for the catchment-stream problem, II, Numerical solutions, **Journal of Hydrology**, v.3, p. 268-282, 1965.
- ZHANG, W.; WANG, W.; ZHENG, J.; WANG, H.; WANG, G.; ZHANG, J. Reconstruction of stage-discharge relationships and analysis of hydraulic geometry variations: The case study of the Pearl Delta, China. **Global and Planetary Change**, v.125, p. 60-70, 2015.
- ZHIHUI, N.; LICHUN, W.; MING-HUI, W.; JING, Y.; QIANG, Z. The fractal dimension of river length based on the observed data. **Journal of Applied Mathematics**, v. 2013, 9p. 2013.

4 - ÁREA DE ESTUDO

4.1 – DESCRIÇÃO FÍSICA DA BACIA

A bacia do rio Ijuí (10.650 km²) se localiza na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas 27°45' e 26°15' de latitude Sul e 53°15' e 56°45' de longitude Oeste, abrangendo 20 municípios, localizada em uma posição central do derrame basáltico sul-americano, sobre o planalto médio gaúcho com altitudes entre 420 e 700 m (SEMA, 2000). Sua bacia é formada principalmente pelos rios Potiribu, Conceição e Ijuizinho, todos afluentes da margem esquerda do rio Ijuí. O rio Ijuí por sua vez é afluente do rio Uruguai sendo sua foz localizada no município de Pirapó - RS. A Figura 4.1 apresenta a espacialização das estações fluviométricas na bacia, bem como sua rede de drenagem com os rios principais.

Para realização deste estudo a bacia do rio Ijuí, foi subdividida em nove sub-bacias embutidas: Ponte Mística (9.487 km²), Santo Ângelo (5.454 km²), Colônia Mousquer (2.266 km²), Passo Faxinal (2008 km²), Ponte Nova Conceição (968 km²), Conceição (806 km²), Ponte Nova Potiribu Jusante (614 km²), Taboão (77 km²) e Turcato (20 km²). Estas sub-bacias foram definidas a partir da existência de estações fluviométricas instaladas na região, sendo estas estações geridas pela ANA - Agência Nacional de Águas e operadas pela CPRM- Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais e duas estações fluviométricas monitorados pelo IPH-UFRGS. (Tabela 4.1). Pela classificação de Strahler as respectivas bacias apresentam na sua foz as seguintes ordens: Ponte Mística (7^a ordem), Santo Ângelo (6^a ordem), Colônia Mousquer (6^a ordem), Passo Faxinal (6^a ordem), Ponte Nova Conceição (5^a ordem), Conceição (5^a ordem), Ponte Nova Potiribu Jusante (5^a ordem), Taboão (4^a ordem) e Turcato (3^a ordem).

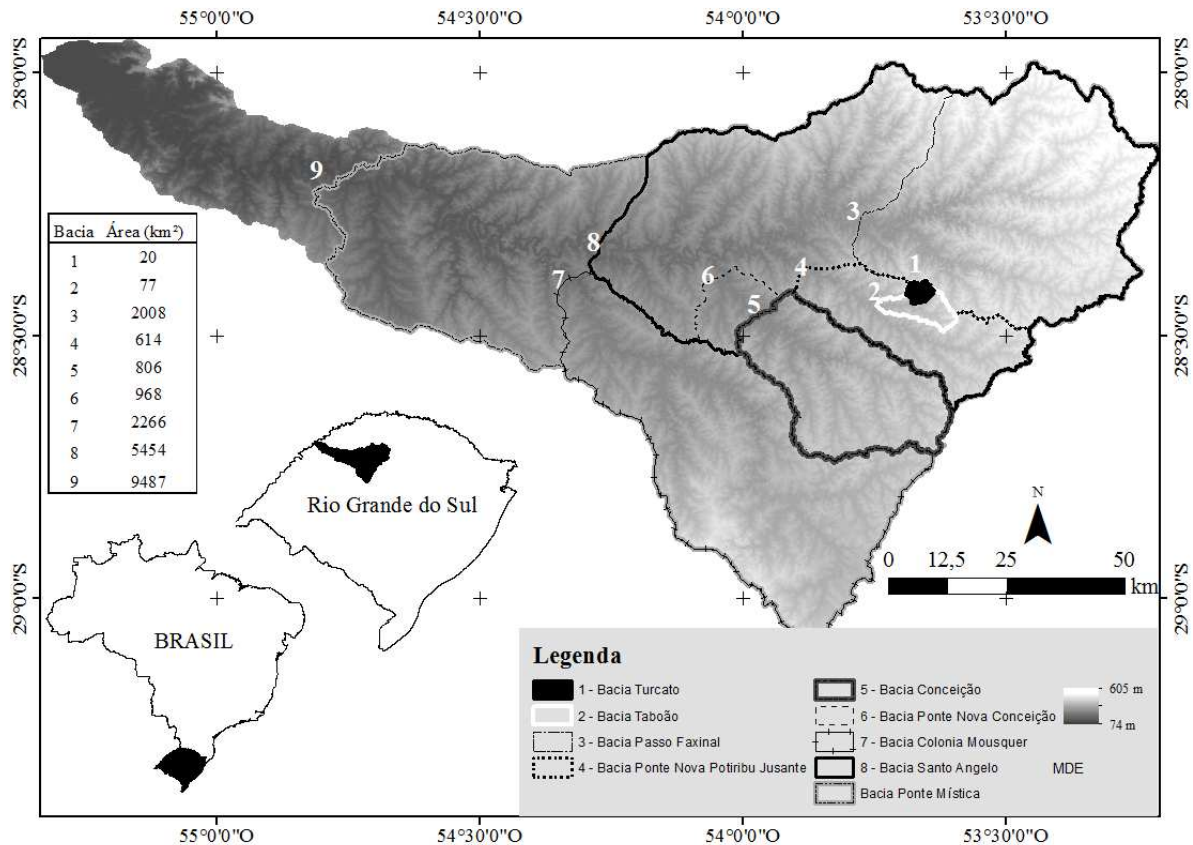


Figura 4.1 - Localização das bacias hidrográficas embutidas a bacia do rio Ijuí.

Tabela 4.1 - Descrição das estações fluviométricas da bacia do rio Ijuí.

Código	Nome	Rio	Município	Latitude	Longitude	Área (km ²)	Altitude (m)	Responsável	Número de medições de vazões	Série Histórica
75155000	Passo Faxinal	Rio Ijuí	Ijuí	28°17'21"	53°46'48"	1940	200	ANA	292	25/11/1941 - 07/09/2013
75186000	Ponte Nova Potiribu - Jusante	Rio Potiribu	Ijuí	28° 22' 15"	53°52'45"	613	320	ANA	32	03/06/2002 - 05/09/2013
75200000	Conceição	Rio Conceição	Ijuí	28° 45' 50"	53° 58' 23"	811	160	ANA	288	12/06/1942 - 04/09/2013
75205000	Ponte Nova Conceição	Rio Conceição	Coronel Barros	28° 23' 01"	54° 01' 54"	970	160	ANA	114	09/11/1974 - 25/04/2013
75230000	Santo Angelo	Rio Ijuí	Entre Ijuis	28° 21' 19"	54° 16' 06"	5440	200	ANA	285	23/11/1941 - 28/09/2013
75295000	Colônia Mousquer	Rio Ijuizinho	Santo Ângelo	28° 23' 33"	54° 19' 51"	2160	200	ANA	118	13/11/1974 - 29/08/2013
75320000	Ponte Mística	Rio Ijuí	São Luiz Gonzaga	28°10'53"	54° 44' 18"	9450	160	ANA	195	22/10/1957 - 14/08/2008
XXXXXXX	Taboão	Rio Potiribu	Pejuçara	28° 26' 21"	53°44'42"	77	346	IPH-UFRGS	156	09/03/1998 a 01/10/2013
XXXXXXX	Turcato	Rio Potiribu	Pejuçara	28° 26' 16"	53°40'57"	20	379	IPH-UFRGS	84	01/11/2001 a 22/10/2013

4.1.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

O relevo da bacia é composto de coxilhas com declividades suaves entre 3 e 15%, no qual, propicia o cultivo de grandes áreas e a mecanização agrícola. Esse planalto é situado sobre a rocha basáltica, formado por camadas oriundas da ocorrência de sucessivos derrames vulcânicos, datados de 120 milhões de anos. Entre essas camadas, depositaram-se camadas de arenito Botucatu que variam de alguns metros de profundidade até uma centena de metros (Leinz, 1949; IBGE, 1986).

Os solos da região são bastante úmidos, graças ao regime abundante de precipitações e devido aos solos bem desenvolvidos e profundos, podendo atingir até 15 m de profundidade. A maioria do solo da região é classificada como latossolos roxos, latossolos vermelho-escuros e terras roxas estruturadas. Apesar de ser um solo argiloso (mais de 60% de argila), ele apresenta uma forte drenagem devido aos microagregados formados em todo o perfil resultando em maior macro-porosidade (Castro, 1996).

Os Nitossolos assim como o Latossolo, são solos profundos diferindo deste por apresentar um horizonte B com uma estrutura mais desenvolvida com revestimento brilhante (cerosidade). Já o Neossolo é um solo pouco desenvolvido e normalmente raso. Nas áreas de depressões com baixa declividade encontra-se o Gleissolo, caracterizado como solo pouco profundo e mal drenado, geralmente apresentando cor acinzentada ou escura (CASTRO, 1996).

Atualmente a área de estudo apresenta fragmentos remanescentes de Mata Atlântica e Mata de Araucária e áreas de matas ciliares também fragmentadas. A floresta de Mata Atlântica e a Mata de Araucárias eram a vegetação predominante até os meados da década de 70. Marcuzzo *et al.* (1998) citam que o período mais intenso de exploração de madeira e abertura de áreas para a agricultura foi de 1945 a 1970. Especialmente na década de 50, o Rio Grande do Sul foi polo exportador de madeira nativa, principalmente de araucária. A partir da década de 60, a ampliação das fronteiras agrícolas foi a responsável pela drástica redução das florestas nativas, especialmente as Florestas Estacionais da região do Alto Uruguai. Na região do Planalto, as madeireiras ainda exploram as últimas reservas da Floresta Ombrófila Mista, onde podem ser encontradas araucárias e outras árvores nativas de grande porte, como canelas, cedros e angicos. Atualmente a região é caracterizada por uma agricultura intensiva com dois ciclos de cultura por ano: soja e milho no verão e aveia e trigo no inverno.

De acordo com o uso do solo das bacias de maior escala a bacia do Ijuí e suas respectivas bacias embutidas caracterizam-se por serem áreas com grande atividade agrícola, tendo as

mesmas culturas predominantes na região e os mesmos tratos culturais, como o pousio de áreas cultiváveis e a rotação de culturas com o cultivo de soja e milho no verão e aveia e trigo no inverno. Também salienta-se que o plantio direto é prática utilizada na bacia desde o ano de 1993.

O clima da região da bacia do rio Ijuí, segundo Beltrame (2000), está dentro da classificação mesotérmica brando superúmido sem seca (Cfa), assim descrita por Köppen: Cfa – temperatura média das máximas superior a 22 °C e a média das mínimas entre 3 e 18°C e verão quente. O regime de precipitações é homogêneo durante todo o ano, apresentando chuvas mensais entre 120 e 150 mm com um total anual médio de 1750 mm (CHEVALLIERE & CASTRO, 1991). A Figura 4.2 apresenta a espacialização das 15 estações pluviométricas localizadas na bacia e no seu entorno, bem como os rios principais constituintes da rede de drenagem.

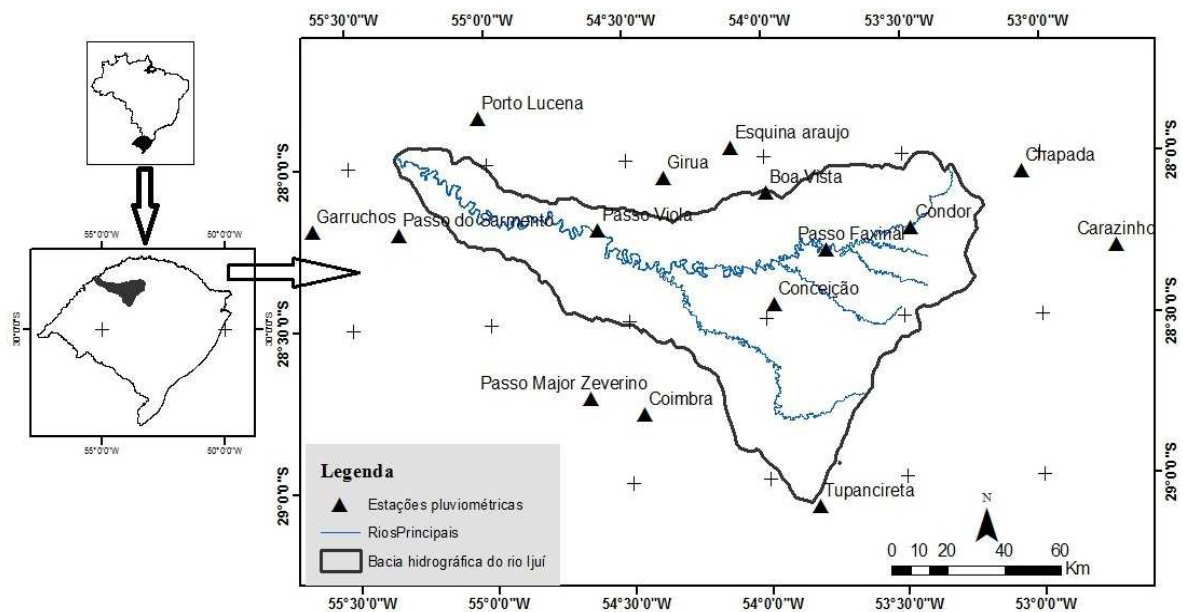


Figura 4.2 - Localização da bacia do rio Ijuí com a espacialização das estações pluviométricas.

4.2 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELTRAME, L. F. de S. (coord.). **Consistência de Dados Hidrológicos da Bacia Hidrográfica do Alto Uruguai, Sub-Bacia 75**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 2000.
- CASTRO, N. M. R. Ruissellement et érosion sur des bassins versants de grande culture du plateau basaltique du sud du Brésil (Rio Grande do Sul). Tese (doutorado) - Université Louis Pasteur, Strasbourg, 224p, 1996.
- CHEVALLIER, P. CASTRO, N. M. R. As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS-Brasil). **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 10, Rio de Janeiro, Anais3, p.183-192, 1991.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) **Levantamento de recursos naturais**, 33. Folhas SH 22, Porto Alegre e parte das folhas: SH 21 Uruguaiana e SI 22 Lagoa Mirim. Projeto Radam Brasil, 792p, 1986.
- LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. Fac. Fil. Ciências e Letras da USP, **Bol. CIII**, Geologia 5, p. 1-61, 1949.
- MARCUZZO, S.; PAGEL, S. M.; CHIAPPET, M. I. S. A reserva da biosfera da Mata Atlântica no Rio Grande do Sul - Situação atual, ações e perspectivas. **Caderno nº. 11**, Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, 1998.
- SEMA - Secretaria Estadual de Meio Ambiente, **Relatório Anual sobre a situação dos recursos hídricos do Estado do Rio Grande do e inventário hidrelétrico da sub-bacia 75** (2000).

5 - ANÁLISE DE HOMOGENEIDADE DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IJUÍ-RS.

5.1 – INTRODUÇÃO

O monitoramento hidrológico é dispendioso tanto economicamente quanto tecnicamente. Em áreas hidrológicamente homogêneas, pode-se reduzir o número dos pontos de monitoramento por meio de técnicas de regionalização. Portanto, o estudo de homogeneidade hidrológica pode diminuir o custo na investigação hidrológica e consequentemente melhorar o planejamento dos recursos hídricos. Yadav *et al.* (2007) comentam que hidrólogos têm respondido a este desafio, desenvolvendo várias ferramentas de previsão, os quais são comumente referidos como métodos de regionalização. Alguns métodos são comumente usados para a regionalização de variáveis hidro-climáticas como a precipitação, vazões mínimas, médias e máximas, evapotranspiração e outros componentes do ciclo hidrológico.

Romero *et al.* (1999) e Ramos (2001) afirmam que técnicas multivariadas como as técnicas de agrupamento são muito comuns para classificação destas variáveis. Dentro da análise de agrupamento encontram-se na literatura vários métodos que podem ser utilizados em diversos conjuntos de dados, bem como para a regionalização hidrológica. Por exemplo, Stahl & Demuth (1999), Lecce (2000), Corduas (2011), e Ramachandra & Srinivas (2006) utilizaram, respectivamente, o método de Ward, o método K-means, o modelo ARMA, e a inferência Fuzzy na elaboração de seus trabalhos sobre agrupamentos em regionalização hidrológica.

Em virtude da escassez de séries históricas consideráveis nos diversos campos da ciência, incluindo a hidrologia, o uso de distribuições teóricas de probabilidades é frequentemente empregado para prever o comportamento destas variáveis. Em diversas regiões do Brasil foram realizados alguns trabalhos que identificaram distribuições teóricas que melhor se adequaram a determinadas séries históricas pluviométricas. Por exemplo, Assis (1993) avaliou o ajuste da função Gama em Pelotas-RS; Botelho & Morais (1999) e Morais *et al.* (2001) avaliaram a distribuição Gama em Lavras - MG; Catalunha *et al.* (2002) avaliaram cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação em Minas Gerais. Ribeiro *et al.* (2007) compararam distribuições de probabilidade (log-Normal 2 parâmetros, log-Normal 3 parâmetros e Gama) para estimar precipitações decendiais e mensais na região de Barbacena-MG, concluindo que a distribuição Gama foi a que melhor se ajustou aos dados observados.

Sampaio *et al.* (2007) obtiveram ajuste adequado desta distribuição para modelar a quantidade de chuva no estado do Paraná. Oliveira *et al.* (2010) avaliaram a precipitação provável para Alegre-ES entre o período de 1940 a 2007 através da distribuição Gama, comprovando que a mesma se adéqua para representar os dados de precipitação.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi determinar o ajustamento da distribuição Gama à série histórica de precipitação diária e verificar a homogeneidade pluviométrica das estações pluviométricas localizadas dentro e no entorno da bacia hidrográfica do rio Ijuí, região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

5.2 - MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 - DADOS UTILIZADOS

Os dados de precipitação diária utilizados neste trabalho foram obtidos do site da ANA (Agência Nacional de Águas) no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb). Foi utilizado o *software* Hidro 1.2 como ferramenta de suporte para visualização e seleção dos dados, sendo selecionadas 15 estações pluviométricas com série histórica de 27 anos distribuídos nos intervalos de 12/01/77 a 20/12/04. A Tabela 5.1 apresenta o código de cada estação, o nome, município, coordenadas geográficas e altitude, respectivamente.

Tabela 5.1 - Dados básicos das estações pluviométricas.

Código	Nome	Município	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)
2854001	Boa Vista	Catuípe	28 ⁰ 06' 40"	53 ⁰ 59' 35"	447
2853026	Chapada	Chapada	28 ⁰ 03' 31"	53 ⁰ 03' 58"	450
2854012	Coimbra	Santo Ângelo	28 ⁰ 47' 16"	54 ⁰ 27' 09"	300
2853003	Conceição	Ijuí	28 ⁰ 27' 22"	53 ⁰ 58' 18"	160
2853023	Condor	Condor	28 ⁰ 13' 32"	53 ⁰ 28' 13"	440
2754010	Esquina Araújo	Independência	27 ⁰ 58' 05"	54 ⁰ 06' 59"	400
2855001	Garruchos	São Borja	28 ⁰ 11' 16"	55 ⁰ 38' 13"	60
2854003	Girua	Girua	28 ⁰ 03' 15"	54 ⁰ 21' 41"	400
2853010	Passo Faxinal	Ijuí	28 ⁰ 17' 22"	53 ⁰ 46' 46"	200
2854005	Passo Major Zeverino	Santo Ângelo	28 ⁰ 44' 01"	54 ⁰ 38' 52"	160

Tabela 5.1 - Continuação

Código	Nome	Município	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)
2855002	Passo do Sarmento	São Borja	28° 12' 32"	55° 19' 24"	80
2854006	Passo Viola	Caibaté	28° 12' 40"	54° 36' 11"	160
2755001	Porto Lucena	Porto Lucena	27° 51' 16"	55° 01' 25"	100
2953030	Tupanciretã	Tupanciretã	29° 05' 08"	53° 49' 09"	469
2852006	Carazinho	Carazinho	28° 17' 36"	52° 43' 27"	570

5.2.2 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

A função de distribuição de probabilidade Gama é expressa como:

$$f_p(p) = \frac{(p/\theta)^{\eta-1} \exp(-p/\theta)}{\theta \Gamma(\eta)} \text{ para } p, \theta, \eta > 0 \quad (5.1)$$

$$E[p] = \eta\theta ; \quad (5.2)$$

$$Var[p] = \eta\theta^2 \quad (5.3)$$

onde θ e η são os parâmetros de escala e forma, respectivamente; $\Gamma(\eta)$ denota o fator de normalização que obriga a área total da densidade ser igual a 1; $E[p] = \eta\theta$ a média; e $Var[p] = \eta\theta^2$ a variância e p é a variável aleatória (precipitação).

Para averiguar o grau de ajuste dos dados observados com a função teórica de probabilidade, foi empregado o teste proposto por Shapiro & Wilk (1965), (equação 5.4).

$$SW = \left(\sum_{i=1}^n a_i \cdot p_i \right)^2 / \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \quad (5.4)$$

onde SW é a evidencia de quão se adéqua a distribuição teórica a distribuição observada; a_i são constantes geradas pelas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra de tamanho n de uma distribuição Normal; p_i é o valor da variável; e \bar{p} é a média dos valores das variáveis e p é a variável aleatória (precipitação).

A hipótese nula do teste é rejeitada se os valores encontrados de SW da distribuição teórica forem maiores que os valores de SW da distribuição observada. Se os valores de SW da distribuição teórica forem menores que os valores de SW da distribuição observada a hipótese nula é aceita.

Após o teste de Shapiro & Wilk realizou-se o agrupamento das variáveis através do método proposto por Scott & Symons (1971) (*Cluster analyses*) que consiste no agrupamento

de um conjunto de observações multivariadas, divididas em um número pequeno de grupos relativamente homogêneos. Para determinação dos grupos, utilizou-se a metodologia da distância Euclideana (equação 5.5) pelo método de Ward.

$$DE = \sum_{j=1}^p (p_{ij} - p_{ij})^2 \quad (5.5)$$

onde DE é a distância euclideana; p_{ij} é a j -ésima característica do i -ésimo elemento da série; p_{ij} é a i -ésima característica do j -ésimo indivíduo; p é a variável aleatória (precipitação). Quanto mais próximo de zero for DE , mais similares são os objetos comparados.

O método de Ward Júnior (1963), equação 5.6, emprega a análise de variância para determinar as distâncias entre grupos, através da soma dos quadrados entre os dois agrupamentos feita sobre todas as variáveis (Naghetini & Pinto, 2007). Nesse método a formação dos grupos se dá pela maximização da homogeneidade dentro dos grupos.

$$W = \sum_{i=1}^n p_i^2 - \frac{1}{n} (\sum p_i)^2 \quad (5.6)$$

onde W é a soma do quadrado dos desvios; n é o número de valores analisados; e p_i é o i -ésimo elemento do agrupamento da série histórica de precipitação.

Para se determinar a sustentabilidade dos grupos propostos, determinou-se a ANOVA (análise de variância). Este procedimento tem por objetivo determinar se todos os grupos têm valores médios idênticos, comparando duas estimativas de variância total. Se a hipótese nula (H_0) é verdadeira a média dos grupos será muito similar à variância dentro de um grupo em torno da média desse grupo. Se a média dos grupos é diferente, alguns deles serão suficientemente diferentes da média geral, sendo a variância dentro dos grupos não mais igual à variância total. A variância dentro dos grupos é calculada pela estimativa do erro quadrado médio Hirsch *et al.* (1992).

$$MSE = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \left(p_{ij} - \bar{p}_j \right)^2 / (N - K) \quad (5.7)$$

onde MSE é o erro quadrado médio; p_{ij} é o valor observado no grupo; \bar{p}_j é a média do j -ésimo grupo; N é o número de observações em cada grupo; e K é o número de grupos.

Outro teste utilizado para definir a sustentabilidade dos grupos propostos foi o teste de Tukey, também conhecido como teste da diferença honestamente significativa (*honestly significant difference* – HSD) que consiste em definir a menor diferença significativa entre a média de dois grupos. Para o teste HSD, quanto mais próximo de 1 for o resultado da análise

maior será a semelhança entre os grupos. Montgomery & Runger (2003) explicam que, quando n for igual para as duas séries de dados utiliza-se a Equação 5.8, quando n for diferente usa-se a expressão (5.9):

$$HSD = g_{\alpha'}(a', f') \sqrt{\frac{MSE}{n}} \quad (5.8)$$

onde HSD é o valor crítico para a diferença entre as médias dos grupos; $g_{\alpha}(a, f')$ é o ponto da percentagem superior de α do intervalo da estatística studentizada; a' é o número de tratamentos; e f' é o número de graus de liberdade. Nota-se que $g_{\alpha}(a, f')$ são valores tabelados.

$$HSD = \frac{g_{\alpha'}(a', f)}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \cdot MSE} \quad (5.9)$$

onde n_1 e n_2 são os números de valores de cada série analisada.

As análises estatísticas multivariadas deste trabalho foram realizadas pelo aplicativo Statistica® 7.0, desenvolvido pela “StatSoft”. O programa auxilia o usuário na identificação e determinação de parâmetros estatísticos.

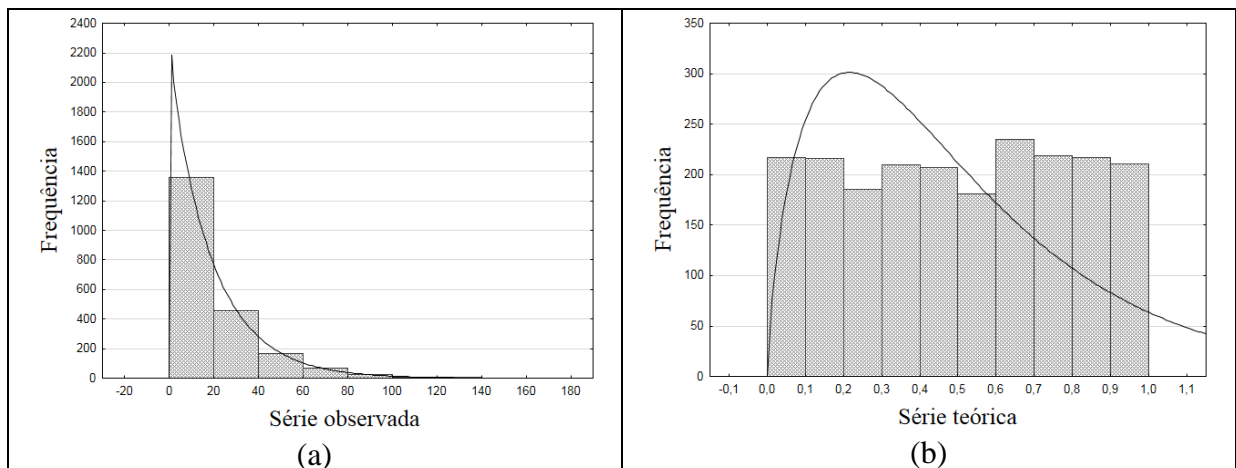
5.3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 - Teste de normalidade α à 5% de significância

Para determinar a distribuição que melhor se adéqua aos dados da série histórica em análise foi realizado o teste de Shapiro-Wilk. A Tabela 5.2 apresenta os resultados referente ao teste de ajustamento para os dados teóricos e observados. No referido teste a distribuição Gama demonstra bom desempenho na inferência de ajuste entre a série teórica e a observada, sendo, a hipótese nula aceita para a referida distribuição. Já na Figura 5.1 são apresentados de forma exemplificativa os valores resultantes das transformações adotadas para a estação de Passo Faxinal, sendo exibida a distribuição do histograma dos valores observados e teóricos.

Tabela 5.2 - Teste de normalidade pelo método Shapiro-Wilk.

Estação	Observada	Teórica
Boa Vista	0,185	0,053
Chapada	0,208	0,051
Carazinho	0,240	0,058
Coimbra	0,199	0,048
Conceição	0,224	0,049
Condor	0,228	0,052
Esquina Araújo	0,187	0,063
Garruchos	0,204	0,052
Giruá	0,188	0,052
Passo Sarmento	0,247	0,063
Passo Faxinal	0,197	0,049
Passo Major Zeverino	0,235	0,053
Passo Viola	0,184	0,050
Porto Lucena	0,237	0,061
Tupanciretã	0,187	0,055

**Figura 5.1** - Histograma da série antes da transformação; (b) Histograma da série depois da transformação. Figura referente à série histórica da estação pluviométrica de Passo Faxinal.

5.3.2 - Agrupamento

Para representar o agrupamento proposto pelo método *cluster analysis* das variáveis, agora representada pela distribuição Gama, utilizou-se o dendograma (Figura 5.2), com dois e três grupos. Observa-se que quando o dendograma é dividido em 3 grupos a estação de Carazinho compõe um grupo único.

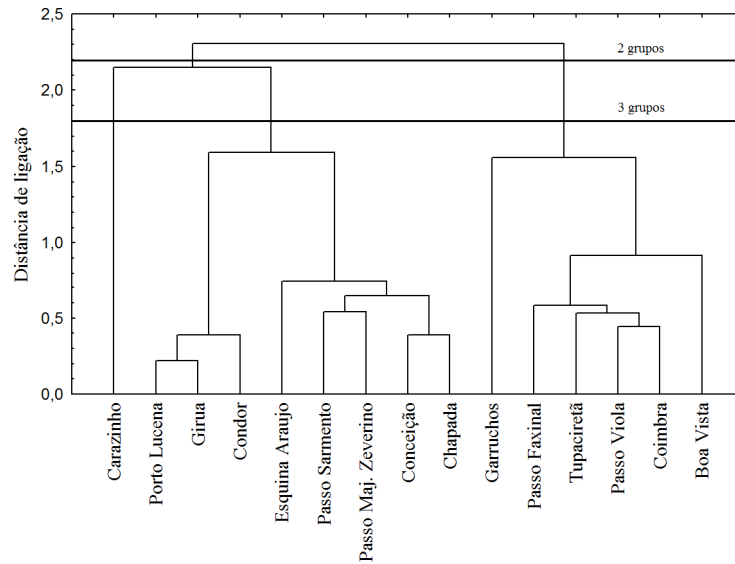


Figura 5.2 - Dendograma para o agrupamento das estações analisadas.

Para verificar a consistência do agrupamento proposto pelo método *cluster analysis* foi realizada o teste da ANOVA. Esta análise tem como objetivo comprovar as diferenças entre os grupos através da homogeneidade das variâncias das médias dentro de cada grupo (Figura 5.3). Já na Tabela 5.3 são apresentados os valores de independência dos grupos através da verificação de diferenças significativas entre as médias de cada grupo pelo teste HSD.

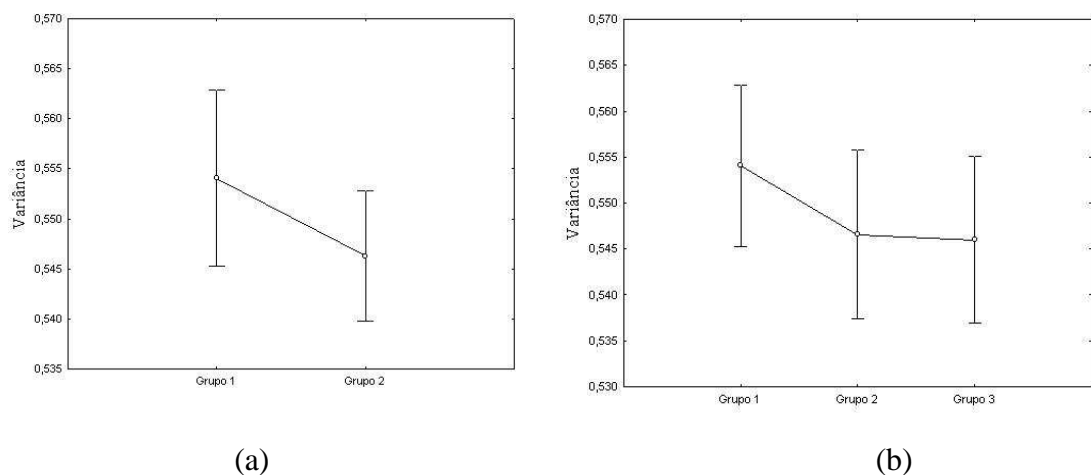


Figura 5.3- Teste de homogeneidade pelos gráficos da variância da média para distribuição Gama. (a) dois grupos (b) três grupos

Tabela 5.3 - Teste de independência de HSD de dois grupos para distribuição Gama

Distribuição Gama									
Homogeneidade do grupo teste de significância (α)= 5%									
Erros entre MSE= 0,086					Erros entre MSE= 0,086				
Grupo	Média	1	2		Grupo	Média	1	2	3
1	0,505		0,743		1	0,505		0,962	0,917
					2	0,507	0,962		0,967
2	0,507	0,743			3	0,507	0,917	0,967	

Aplicando-se o teste HSD, Equação 5.8, com $\alpha = 5\%$ verifica-se o valor de HSD = 0,011 para dois grupos e HSD = 0,015 para três grupos, constata-se que os valores de HSD foram menores que os valores encontrados nos agrupamentos propostos (Tabela 5.3). Para que a hipótese nula (grupos iguais) seja aceita, os valores de HSD devem ser menores que os valores encontrados nos agrupamentos propostos. Portanto, pode-se dizer que há homogeneidade pluviométrica dos dados analisados para a bacia hidrográfica do rio Ijuí.

5.4 – CONCLUSÕES

As análises estatísticas utilizadas no presente trabalho foram úteis para compreensão da variabilidade espacial da precipitação diária de 15 estações pluviométricas, localizadas dentro e no entorno da bacia do rio Ijuí, no período de 12/01/1977 a 20/12/2004. Os resultados demonstram que ocorre homogeneidade espacial na distribuição pluviométrica da série histórica analisada. Em relação aos testes propostos para verificar o ajustamento da distribuição Gama, constata-se que a mesma se ajusta adequadamente para representar dados diários de precipitação.

Quando se realizou o agrupamento da variância pela distância Euclidiana pelo método (W) foi definido que as variáveis se enquadravam em dois e três grupos. Porém, com a aplicação da ANOVA e do teste HSD, verificou-se que os possíveis agrupamentos das variáveis não se aplicavam, demonstrando, portanto, a importância da aplicação da ANOVA e do teste HSD para verificação dos agrupamentos sugeridos. Avaliando o desempenho da

função Gama se conclui que esta distribuição pode ser utilizada para definir a regionalização hidrológica da bacia hidrográfica do rio Ijuí.

5.5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, F.N. Ajuste da função gama aos totais semanais de chuva de Pelotas-RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, p. 131-136, 1993.
- BOTELHO, V. A.; MORAIS, A. R. Estimativas dos parâmetros da distribuição gama de dados pluviométricos do Município de Lavras, Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 23, p. 697-706, 1999.
- CATALUNHA, M. J.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; SOARES, C. P.; RIBEIRO, A. B. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162, 2002.
- CORDUAS, C. Clustering streamflow time series for regional classification. **Journal of Hydrology**, v. 407, p.73–80, 2011.
- DA SILVA, É. D. B.; MACHADO, M. A. de M.; KAN, A. Variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial na bacia do rio Capivari, Estado do Paraná. In. Anais do **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió – AL., 2011.
- HIRSCH, T. A.; HESEL, D. R.; COHN, T. A.; GILROY, E. J. Statistical treatment of data of hydrologic data. (cap. 17) In. **Handbook of hydrology**. U.S. Geological Survey. Ed. Donnelley & Sons Company. New York, p. 645-696, 1992.
- ISIK, S. SINGH, V. P. Hydrologic Regionalization of Watersheds in Turkey. **Journal of Hydrologic Engineering**. v.13, p. 824-834, 2008.
- LECCE, S. A. Spatial variations in the timing of annual floods in the southeastern United States. **Journal of Hydrology**, v. 235, p. 151–169, 2000.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistic and probability for engineers**. 3 rd ed. United States of America. 822 p., 2003.
- MORAIS, A. R. DE; BOTELHO, V. A. V. AMARANTE; CARVALHO, L. G. DE; MUNIZ, J.AUGUSTO; LAGE, GILBERTO. Estimativa da precipitação provável em Lavras (MG) através da distribuição gama. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 305-310, 2001.
- NAGHETTINI, M. PINTO, É. J. de A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte, CPRM, 552p., 2007.
- OLIVEIRA, J. P. B. de; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; JASPER, A. P. dos S.; OLIVEIRA, L. B. Precipitação provável para Alegre – ES através da distribuição de probabilidade Gama. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 7, n. 2, p. 204-211, 2010.
- RAMACHANDRA RAO, A.; SRINIVAS, V. V. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. **Journal of Hydrology**, v. 318, p. 57–79, 2006.

- RAMOS, M.C. Divisive and hierarchical clustering techniques to analyze variability of rainfall distribution patterns in a Mediterranean region. **Journal of Hydrology**, v. 57, p.123–138, 2001.
- RIBEIRO, B. T.; AVANZI, J. C.; MELLO, C. R. de ; LIMA, J. M. de; SILVA, M. L. N. Comparação de distribuições de probabilidade e estimativa da precipitação provável para região de Barbacena, MG. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v.31, n.5, p.1297-1302, 2007.
- ROMERO, R., SUMMER, G., RAMIS, C., GENOVES, A. A classification of the atmospheric circulation patterns producing significant daily rainfall in the Spanish Mediterranean area. *Int. Journal of Climatology*, v. 19, p. 765–785, 1999.
- SAMPAIO, S. C.; QUEIROZ, M. M. F. de; FRIGO, E. P.; LONGO, A. J.; SUSZEK, M. Estimativa e distribuição de precipitações decendiais para o Estado do Paraná. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 38-53, 2007.
- SCOTT, A. J.; SYMONS, M. J. On the Edwards and Cavalli - Sforza Method of Cluster Analysis. **Biometrics**, v. 27. n. 1, University of North Carolina, Chapel Hill, U.S.A., p. 217-219, 1971.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.
- STHAL, K.; DEMUTH, S. Methods of regional classification of stream flow drought series: Cluster analysis. ARIDE, Technical Rep. No. 1, **Institute of Hydrology**, Univ. of Freiburg, Germany, 1999.
- TUKEY, J. W. Comparing Individual Means in the Analysis of Variance, **Biometrics**, v.5, 99 p., 1949.
- WARD JÚNIOR, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236-244; 1963.

6. RELAÇÃO ENTRE VAZÕES MEDIDAS EM CAMPO E GEOMETRIA HIDRÁULICA: ESTUDO DE CASO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA DO TURCATO E TABOÃO, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.

6.1 - INTRODUÇÃO

Suguio & Bigarella (1990) abordam que as características fluviais são importantes não somente na gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas, mas também do ponto de vista científico, especialmente da geomorfologia e hidrologia. O fluxo da água é o principal agente modificador de um canal e este canal é integrante de uma rede de drenagem, que por sua vez conforme Kobiyama *et al.* (1998), é resultante das interações espaço-temporais dos processos geo-bio-hidrológicos e antropogênicos ocorridos na bacia.

Sendo a forma do canal resultante das forças atuantes de entrada de energia e de saída de matéria e energia, Nanson & Huang (2008) afirmam que esta energia nem sempre está em equilíbrio podendo ocorrer três possibilidades distintas: (1) um rio pode ter mais energia do que a necessária para deslocar a sua carga de águas e sedimentos, no caso em que tem excesso de energia o rio pode ser instável; (2) pode ter exatamente a energia necessária para os deslocamentos das partículas líquidas e sólidas, no caso em que ele é estável, e (3) ele pode ter um déficit de energia, o que também vai resultar em instabilidade, mas diferente da causada pelo excesso de energia.

Esta estabilidade ou instabilidade irá refletir diretamente na forma do canal, assim sendo, uma forma bastante conhecida no meio científico para determinar as feições geomorfológicas da seção ou ao longo do canal de uma bacia é a Geometria Hidráulica (GH), proposta Leopold & Maddock (1953). Mesmo sendo a GH uma técnica, bastante estudada em nível mundial, estudos sobre esta no Brasil ainda são poucos (Grison e Kobiyama, 2011).

A descarga líquida e sólida medida na foz de uma bacia hidrográfica é uma forma de se mensurar a energia e matéria gerada pela bacia. No entanto, essas descargas variam no tempo e no espaço, em decorrência das condições geomorfológicas, pluviométricas, antrópicas, pedológicas, entre outras, que ocorrem nesta bacia. Nesse sentido, o monitoramento hidrométrico se apresenta como uma forma de se mensurar estas variações espaço-temporais dos fluxos. O monitoramento tem por objetivo medir e coletar dados diretamente em campo, podendo estes dados ser medidos em diferentes escalas espaço-temporais. Entre as diversas variáveis medidas este trabalho utiliza dados de descarga líquida, medidas diretamente em campo, bem como o perfil transversal de cada seção de medição em estudo. A partir destes

dados se correlacionou as descargas líquidas em diferentes cotas com os parâmetros de geometria hidráulica.

Portanto, o objetivo do presente trabalho foi analisar a relação entre a curva de frequência de vazões medidas em campo e o comportamento dos expoentes b , f e m abordados pela teoria da geometria hidráulica. Como estudo de caso, o presente trabalho aplicou esta análise para os dados obtidos nas estações implantadas na bacia do rio Turcato e Taboão, localizadas no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

6.2 - MATERIAIS E MÉTODOS

6.2.1 - DADOS UTILIZADOS

No presente estudo foram analisadas medições de descarga líquida e morfologia da seção de medição em estações fluviométricas localizadas na foz das bacias do Turcato e Taboão, implantadas e operadas pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (Castro *et al.*, 2000). A Tabela 6.1 apresenta as informações básicas das estações fluviométricas em estudo. Salienta-se que na referida tabela são apresentados o número total de medições de descarga líquida realizadas em cada bacia e o período de medições. Concomitantemente as medições de descarga líquida, anualmente foi realizado o levantamento do perfil transversal da seção de medição.

Tabela 6.1 - Resumo dos dados das estações fluviométricas.

Nome	Rio	Município	Latitude S	Longitude O	Área (km ²)	Altitud e (m)	Responsável	Número de medições de vazões	Série Histórica
Taboão	Rio Potiribu	Pejuçara	28° 26' 21"	53°44'42"	77	346	IPH- UFRGS	154	09/03/1998 a 01/10/2013
Turcato	Rio Potiribu	Pejuçara	28° 26' 16"	53°40'57"	20	379	IPH- UFRGS	71	01/11/2001 a 22/05/2014

6.2.2 - CONSTRUÇÃO DA CURVA DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES MEDIDAS EM CAMPO

Para definir a curva de frequência das vazões medidas em campo, este trabalho baseou-se no princípio da curva de permanência, no qual, os dados são ordenados em forma decrescente. A frequência de excedência (F) é definida pela equação $F = n/N$, onde n é a posição que o dado ocupa dentro da série histórica; e N é o tamanho da série histórica. Usando a metodologia da curva de permanência, agora com os dados de vazões (diárias) observadas, se definiu os valores de vazões Q_5 , Q_{50} e Q_{95} para as respectivas estações de Turcato e Taboão. Q_5 , Q_{50} e Q_{95} , se referem a 5%, 50% e 95% de tempo que a respectiva vazão é igualada ou excedida.

Sabendo as respectivas Q_5 , Q_{50} e Q_{95} de cada estação se definiram a partir destes os valores do ponto de corte das vazões medidas em campo, sendo estas agrupadas em $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$.

6.2.3 - ANÁLISE DA GEOMETRIA HIDRÁULICA

A teoria da Geometria Hidráulica foi proposta por Leopold & Maddock (1953) que a definiram como a medida da largura, profundidade, velocidade e carga sedimentar de um curso d'água natural, que descreve a maneira pela qual as propriedades do canal fluvial mudam no decorrer do tempo e do espaço para suportar uma variedade de fluxos. Os autores estabeleceram as relações das variáveis da seção como funções potenciais, diferenciadas somente pelos valores de seus expoentes e coeficientes, conforme as seguintes expressões:

$$w = a \cdot Q^b \quad (6.1)$$

$$d = c \cdot Q^f \quad (6.2)$$

$$v = k \cdot Q^m \quad (6.3)$$

onde Q é a vazão líquida [m^3/s]; w é a largura (nesse caso adotou-se a largura da linha d'água no momento da medição de vazão) [m]; d é a profundidade média da medição de vazão [m]; v é a velocidade, determinada pela razão entre vazão líquida e área molhada da seção [m/s]; a , c , e k , são coeficientes; e b , f , e m são expoentes.

Em qualquer tempo e lugar estas variáveis estão inter-relacionadas pela equação de continuidade de massa, ou seja:

$$Q = wdv = (ack) \cdot Q^{b+f+m} \quad (6.4)$$

Assim sendo, teoricamente obtém-se que $a \cdot c \cdot k = 1$ e $b+f+m = 1$.

Uma vez obtidos os valores de Q_5 , Q_{50} e Q_{95} , foram determinados os expoentes b, f e m para as diferentes Q das estações por meio de uso da teoria de geometria hidráulica (equações 6.1, 6.2 e 6.3). A Figura 6.1 ilustra a determinação de Q_5 , Q_{50} e Q_{95} na estação de Turcato.

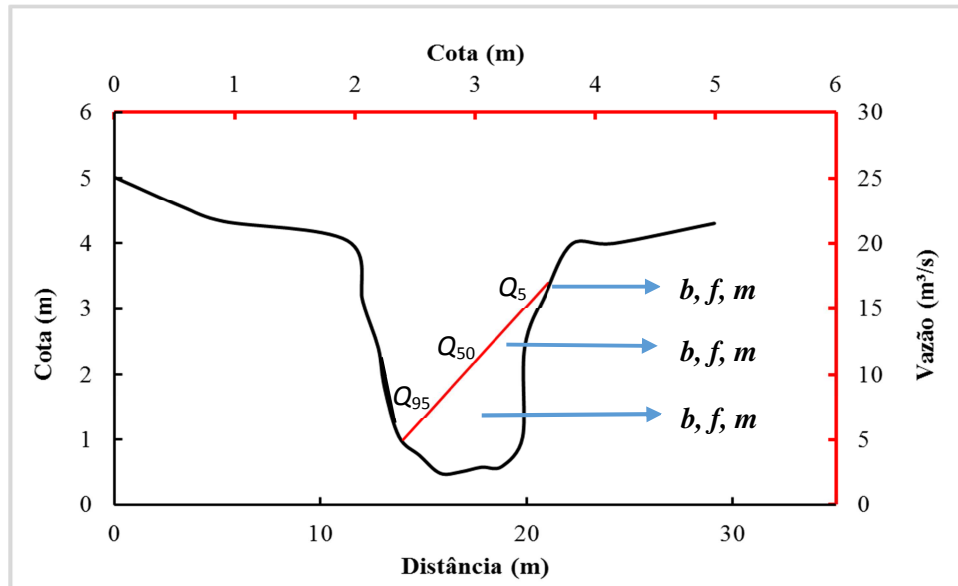


Figura 6.1 - Esquema ilustrativo do Q_5 , Q_{50} e Q_{95} de cada bacia e seus respectivos expoentes b, f e m , na bacia do Turcato.

6.3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Definida as curvas de permanência de cada bacia foram determinados a partir desta os valores do ponto de corte para o agrupamento da frequência de excedência das vazões medidas em campo. Sabendo-se os valores $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$ avaliou-se o comportamento dos expoentes da geometria hidráulica de acordo com a frequência de excedência. A Figura 6.2 (a) apresenta a curva de permanência da bacia do Turcato, bem como o comportamento dos expoentes b, f e m para medições realizadas em vazões $\geq Q_{50}$.

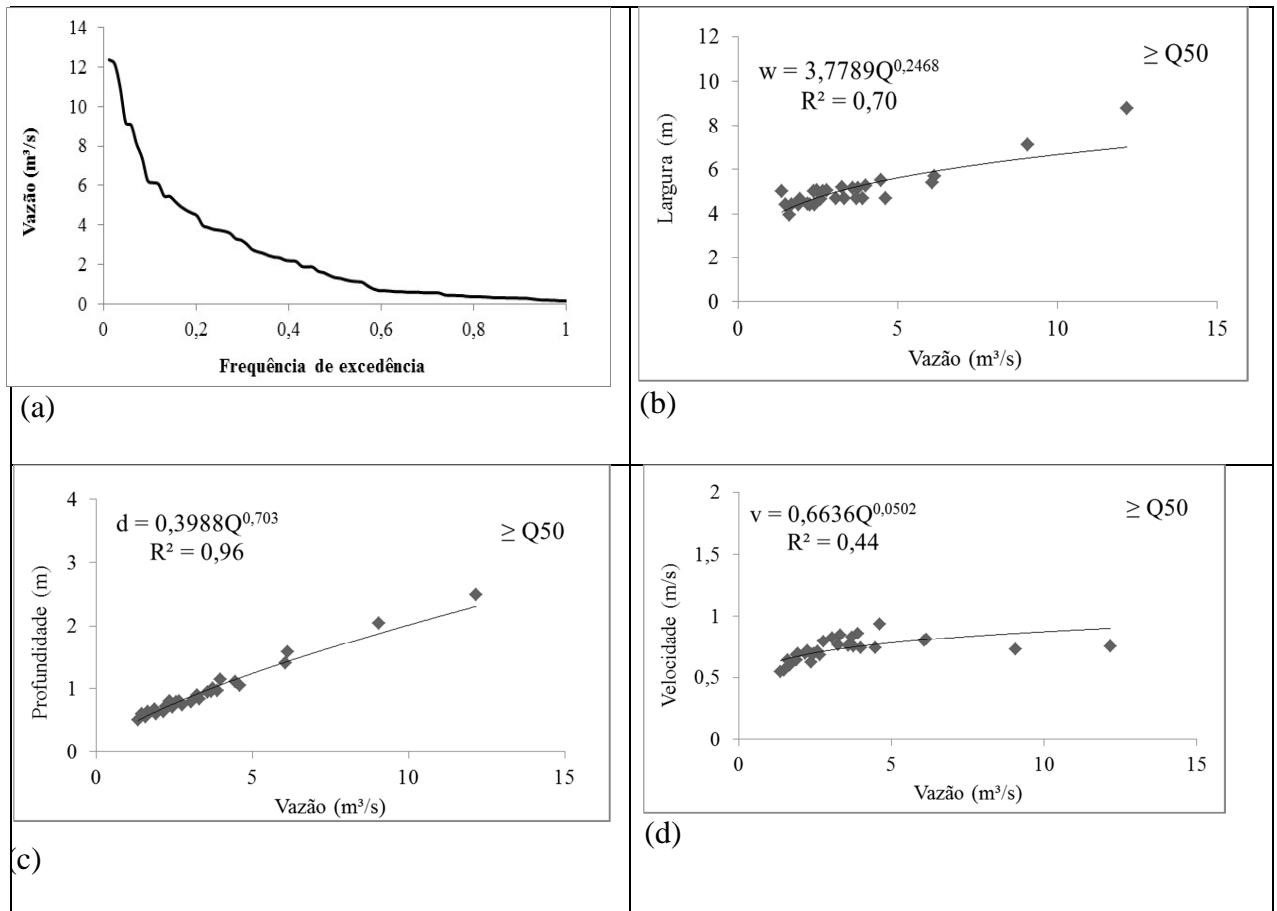


Figura 6.2 - Exemplificação da determinação dos expoentes b , f e m na bacia Turcato com vazões $\geq Q_{50}$.

Para melhor entendimento do comportamento dos expoentes da geometria hidráulica em relação à curva de frequência de vazões medidas em campo, são apresentados na Tabela 6.2 os respectivos expoentes em relação à frequência de excedência da vazão para cada bacia. Observa-se que o expoente f , apresentou maiores valores em relação aos outros dois expoentes (b e m), indicando que a variável d é mais sensível às oscilações de Q , seguidos por w e por último v , para vazões $\geq Q_5$. Ainda analisando as vazões $\geq Q_5$ constata-se que o expoente m apresentou valores negativos, fato que pode ser explicado em virtude das velocidades apresentarem uma estabilização ou até mesmo uma diminuição nos picos das cheias. Ainda analisando a Tabela 6.2, observa-se que na estação de Turcato ocorre o aumento de w com o aumento da vazão, isto pode ser explicado em virtude do formato do canal (trapezoidal) nesta seção (Figura 6.1).

Tabela 6.2 - Valores dos expoentes b, f e m , dos coeficientes a, c e k , seus respectivos R^2 e o número de vazões utilizadas em cada parte da curva de frequência.

Estação	Expoentes e coeficientes	$\geq Q_5$			$\geq Q_{50}$			$\geq Q_{95}$		
		R^2	N		R^2	N		R^2	N	
Taboão	a	5,98	0,15	15	7,78	0,28	55	7,90	0,35	147
	c	0,19	0,83		0,37	0,98		0,43	0,97	
	k	0,89	0,12		0,35	0,93		0,29	0,96	
	b	0,13	0,15		0,03	0,28		0,03	0,35	
	f	0,88	0,83		0,61	0,98		0,53	0,97	
	m	-0,02	0,12		0,35	0,93		0,45	0,96	
Turcato	a	1,67	0,99	3	3,78	0,70	29	4,47	0,61	67
	c	0,39	0,99		0,40	0,96		0,46	0,93	
	k	1,54	0,35		0,66	0,44		0,49	0,83	
	b	0,63	0,99		0,25	0,70		0,10	0,61	
	f	0,66	0,99		0,70	0,96		0,57	0,93	
	m	-0,29	0,35		0,05	0,44		0,33	0,83	
Taboão	a.c.k	1,00			1,00			1,00		
	b+f+m	1,00			1,00			1,00		
Turcato	a.c.k	1,00			1,00			1,00		
	b+f+m	1,00			1,00			1,00		

Analisando a Tabela 6.2, sem levar em consideração as vazões $\geq Q_5$ da bacia do Turcato, pode-se dizer que a variável w é pouca significativa nas diferentes vazões ocorridas no canal. Com estas constatações, fica evidenciado que d é a variável que sofre maior alteração em virtude das oscilações de Q . Isso pode ser explicado em virtude das condições hidrogeomorfológicas constituintes do canal. Conforme IBGE (1986) as rochas predominantes na região são rochas basálticas, que são caracterizadas por sua dureza, formando canais encaixados e com margens bem definidas e estáveis. As rochas basálticas por sua vez formaram na região solos do tipo latossolos que se caracterizam por serem profundos, argilosos, e coesivos, facilitando, conseqüentemente o afundamento do canal. Latrubesse & Franzinelli (2002) estudando a geometria hidráulica do Rio Solimões observaram a baixa importância da variável w naquelas estações, concluindo que este comportamento é típico de rios confinados ou de rios com margens estáveis e com material coesivo.

Analisando a Figura 6.1 juntamente com a Tabela 6.2, nota-se que, a partir da curva da curva de frequência de vazões medidas em campo, juntamente com os expoentes relativos à

geometria hidráulica do canal pode-se prever o tipo de canal que ocorre neste cenário. Por exemplo, se em vazões altas o expoente b é pouco significativo e f significativo, isso demonstra que não ocorre o aumento considerável de w e sim o aumento de d , concluindo que o canal é encaixado, característico de locais com predominância de materiais coesivos.

A análise de m demonstra que a significância do expoente está diretamente ligada à declividade do canal, pois canais declivosos apresentam maior velocidade; e também pela rugosidade do canal, pois a rugosidade é inversamente proporcional à velocidade do canal. Isso pode ser provado pela equação de Manning. No caso de canais sinuosos, há uma tendência de diminuir a velocidade, o contrário ocorre em canais retilíneos. Então, conhecendo-se as feições de um canal que é produto das inter-relações endógenas e antrópicas, pode-se prever as condições futuras desse canal, estipulando condições de fluxo. Assim sendo, a análise dos expoentes de geometria hidráulica do canal em diferentes condições de vazões atuantes podem ser utilizados como ferramenta útil na modelagem de evolução da paisagem, principalmente em relação à rede de drenagem. Portanto, a abordagem tratada pelo presente trabalho, ou seja, a relação entre a curva de frequência de vazões medidas em campo e a geometria hidráulica, poderá contribuir ao avanço da ciência que investiga interações entre os processos hidrológicos e geomorfológicos, isto é, hidrogeomorfologia.

6.4 - CONCLUSÕES

A construção da curva de frequência de vazões medidas em campo das bacias do Turcato e Taboão foi efetuada para determinar os expoentes b , f e m das variáveis w , d e v em diferentes grupos de vazões. Avaliando os respectivos expoentes nas diferentes vazões ($\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$) pode-se concluir que a variável profundidade (d) tem maior correlação com a vazão, quando comparadas com a largura (w) e com a velocidade (v). Esta ocorrência pode ser em virtude das estações estarem em trechos com canais encaixados e margens estáveis.

Conclui-se também que em virtude da baixa declividade dos canais, v não apresenta significativos aumentos com as oscilações de Q , principalmente em cotas altas, ocorrendo inclusive uma estabilização da velocidade em torno de 0,7 m/s. Em relação à w conclui-se que em vazões $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$ o expoente b apresenta valores próximos à zero, principalmente na bacia do Taboão, evidenciando a estabilidade do canal (encaixado), o que provavelmente resulta do controle geológico que as rochas basálticas exercem. Em vazões $\geq Q_5$ na bacia do Turcato há um aumento no expoente b , isso se dá pelo aumento da largura, mostrando que o

canal é em formato “trapezoidal”. Na bacia do Taboão este expoente não apresenta valores elevados, próximos a 1, evidenciando, conseqüentemente, que a largura do canal é a mesma independente da vazão imposta.

6.5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO, N. M. R.; CHEVALLIER, P.; GOLDENFUM, J.A. Projeto Potiribu-Atualização 1989-1998. Dados básicos de Fluviometria e Pluviometria. **Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 35, 61p., 2000.
- GRISON, F.; KOBAYAMA, M. Teoria e aplicação da geometria hidráulica: Revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia** - v. 12, n. 2, p. 25-38, 2011.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) Levantamento de recursos naturais, 33. Folhas SH 22, Porto Alegre e parte das folhas: SH 21 Uruguaiana e SI 22 Lagoa Mirim. **Projeto Radam Brasil**, 792p, 1986.
- KOBAYAMA, M.; GENZ, F.; MENDIONDO, E. M. Geo-Bio-Hidrologia. In: **I Fórum Geo-Bio-Hidrologia: estudo em vertentes e microbacias hidrográficas** (1: 1998: Curitiba) Curitiba: FUPEF, Anais, p.1-25, 1998.
- LATRUBESSE, E. M; FRANZINELLI, E. The Holocene alluvial plain of the middle Amazon River, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, p. 241-257, 2002.
- LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. **The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications**. United States Geological Survey, (Prof.Paper, n.252) 56p. 1953.
- NANSON, G. C.; HUANG, H. Q. Least action principle, equilibrium states, iterative adjustment and the stability of alluvial channels. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, p. 923-942, 2008.
- SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes fluviais**. 2ª ed. Florianópolis: Ed. UFSC., 183p., 1990.
- VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. N. Flow-duration curves. I. New interpretation and confidence intervals. **Journal of water Resources Planning and Management**, v. 120 n.4, p. 485-504, 1994.
- WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. **Journal of Geology**, v. 68, p. 54-74, 1960.

7 - RELAÇÃO ENTRE A GEOMETRIA HIDRÁULICA E A CURVA DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES MEDIDAS EM CAMPO EM ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IJUÍ – RS

7.1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento dos recursos hídricos é primordial para o desenvolvimento e manutenção da sociedade, pois se tendo conhecimento sobre a água se pode quantificar, analisar, determinar, priorizar e outorgar os seus diversos usos. Entretanto, para se ter uma visão holística deste bem que é de domínio público, limitado, e dotado de valor econômico deve-se ter também o conhecimento sobre sua distribuição espaço-temporal, sua qualidade, sua forma de circulação na bacia e seu armazenamento.

Christofoletti (1981) comenta que o fluxo d'água é o principal agente modificador de um canal de um rio. Desde o momento que uma gota d'água passa do movimento laminar para o movimento concentrado em canais, esta gota passa a ser integrante e agente modificador de uma rede de drenagem e das características fluviais de uma bacia hidrográfica. Suguio & Bigarella (1990) abordam que as características fluviais são importantes não somente no que diz respeito aos recursos hídricos, tanto do ponto de vista da hidráulica e do controle da erosão, como também do ponto de vista geomorfológico, sedimentológico, e do planejamento regional. Salienta-se, portanto, que o canal fluvial é integrante de uma rede de drenagem que por sua vez é produto das interações espaço-temporais dos regimes climáticos, hidrológicos, geológicos, morfológicas, pedológicos e antropogênicos.

Buscando analisar quantitativamente a geomorfologia fluvial de canais Leopold & Maddock (1953) propuseram a teoria da Geometria Hidráulica - GH. Após os primeiros postulados da GH houve outros trabalhos que acrescentaram no desenvolvimento desta teoria, como o trabalho de Ferguson (1986), no qual observou que o entendimento da GH de um rio depende principalmente da compreensão das características relacionadas à forma das seções transversais do rio. Dingman (2007) analisando analiticamente a conclusão de Ferguson (1986) concluiu que a geometria hidráulica é função de uma determinada forma de seção transversal e de equações hidráulicas. Desde o anúncio desta teoria, foram realizados diversos trabalhos, sobre a geometria hidráulica na seção de medição e ao longo do canal. Estudos sobre esta teoria na forma de revisão bibliográfica se encontram em Singh (2003), Ferguson (1986), Grison & Kobiyama (2011a).

No Brasil existem poucos trabalhos que abordam esta teoria, podendo-se citar os seguintes trabalhos: Christofolletti (1976) fez uma abordagem conceitual sobre este tema; Latrubesse & Aquino (1998) analisaram a geometria hidráulica em rios da Amazônia Sul-Occidental; Latrubesse & Franzinelli (2002) analisaram as feições geomorfológicas constituintes do meio da planície Amazônica, com avaliação da geometria hidráulica na seção de Manacapuru no rio Solimões; Aquino *et al.* (2005) analisaram o comportamento hidrogeomorfológico do rio Araguaia, focalizando o regime hidrológico e as mudanças morfo-hidráulicas ocorridas no canal; Latrubesse (2008) avaliou padrões de ajuste de canal de grandes sistemas fluviais, empregando geometria hidráulica, vazão, largura, profundidade, inclinação, entre outros parâmetros em 10 rios da bacia Amazônica; Fernandez & Bortoluzzi (2008) apresentaram resultados preliminares das relações da geometria hidráulica regional para rios das regiões Oeste e Sudoeste do Estado do Paraná; e Grison & Kobiyama (2011b) analisaram a geometria hidráulica (da seção e a jusante) nas principais bacias hidrográficas paranaenses.

Analisando-se estes trabalhos observa-se que não houve estudos que abordaram a relação entre a geometria hidráulica e vazões medidas em diferentes cotas. Portanto, o objetivo do presente estudo é determinar os expoentes b , f e m da geometria hidráulica conforme a curva de frequência de vazões medidas em campo. Como estudo de caso, o presente trabalho utilizou os dados das estações implantadas na bacia do rio Ijuí, Estado do Rio Grande do Sul.

7.2 - CONCEITOS

Geometria hidráulica

A teoria da geometria hidráulica foi proposta por Leopold & Maddock (1953) que a definiram como um modelo empírico com o intuito de analisar a largura, a profundidade, a velocidade e a carga sedimentar de um curso d'água natural, descrevendo a maneira pela qual as propriedades do canal fluvial mudam no decorrer do tempo e do espaço para suportar uma variedade de fluxos. Como a geometria hidráulica varia de um rio para outro e de uma seção para outra, então sua determinação é realizada na seção transversal e ao longo do canal fluvial (Figura 7.1).

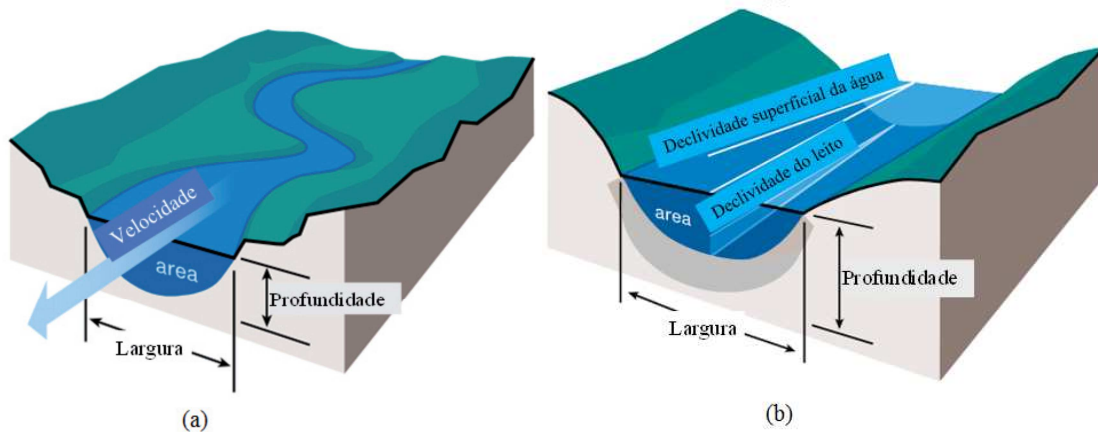


Figura 7.1 - Variáveis da geometria hidráulica. (a) em um perfil transversal; (b) em um perfil transversal e longitudinal. Fonte: adaptada de FISRWG, 1998).

Em determinada seção transversal a geometria hidráulica prevê as mudanças na largura, profundidade média e velocidade em relação às mudanças da vazão no decorrer do tempo, enquanto a geometria hidráulica em direção à jusante prevê a adaptação do tamanho e da forma do canal para uma vazão imposta, no decorrer do tempo e do espaço. Sendo que o canal busca um equilíbrio na sua forma, em virtude das forças atuantes, Lane (1937) comenta que uma série de fatores pode estabelecer e determinar a estabilidade e a forma do canal: (a) fatores hidráulicos (inclinação, rugosidade, profundidade, velocidade média, distribuição da velocidade, e temperatura); (b) forma do canal (largura, profundidade, e inclinações laterais); (c) natureza do material transportado (tamanho, forma, densidade, dispersão, quantidade, e material do leito e subleito); e (d) diversos (alinhamento, distribuição uniforme da vazão e envelhecimento do canal).

Analisando a geometria hidráulica no âmbito da seção transversal, Leopold & Maddock (1953) estabeleceram as relações das variáveis da seção como funções potenciais diferenciadas somente pelos valores de seus expoentes e coeficientes, criando o termo geometria hidráulica, conforme as seguintes equações:

$$w = a \cdot Q^b \quad (7.1)$$

$$d = c \cdot Q^f \quad (7.2)$$

$$v = k \cdot Q^m \quad (7.3)$$

onde Q é a vazão líquida [m^3/s]; w é a largura (nesse caso adotou-se a largura da linha d'água no momento da medição de vazão) [m]; d é a profundidade média (profundidade em relação a cota de medição da vazão) [m]; v é a velocidade, determinada pela razão entre vazão líquida e área molhada da seção [m/s]; a , c , e k , são coeficientes; e b , f , e m são expoentes.

Em qualquer tempo e lugar estas variáveis estão inter-relacionadas pela equação de continuidade de massa.

$$Q = wdv = (ack) \cdot Q^{b+f+m} \quad (7.4)$$

Portanto, obtêm-se que $b+f+m=1$ e $ack=1$.

As modificações de w , d e v acontecem de acordo com as variações de Q , pois sob grande variedade de condições, essas variáveis hidráulicas aumentam como simples funções de potências positivas da vazão (LEOPOLD, 1994).

Salienta-se, novamente, que estas relações da geometria hidráulica, da forma que foram apresentadas, são válidas somente para variações dentro da calha principal do canal do rio, no momento que há o extravasamento da calha estas equações, neste formato, não se aplicam.

Summerfield (1991) aborda que com o aumento da vazão as variáveis dependentes alteram-se em diferentes categorias, de acordo com diferentes canais dos rios, dependendo de um certo número de fatores controladores. Quando o canal está sobre materiais finos e coesivos, a profundidade aumenta proporcionalmente mais rápida do que a largura. Quando os materiais do canal são grosseiros e não coesivos, a largura aumenta rapidamente, em resposta ao aumento da vazão. As influências dos materiais dos canais explicam que canais em regiões semi-áridas, com o aumento da vazão, a largura aumenta mais rapidamente do que a profundidade, enquanto que, em ambientes úmidos essa relação é inversa, a profundidade aumenta mais do que a largura.

Na Tabela 7.1 são apresentados os valores dos expoentes de alguns trabalhos realizados no mundo.

Tabela 7.1 - Valores dos expoentes de trabalhos sobre geometria hidráulica.

Fonte	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>m</i>	Fonte	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>m</i>
Leopold & Maddock (1953)	0,26	0,40	0,34	Richards (1973)	0,16	0,43	0,42
Wolman (1955)	0,04	0,41	0,55		0,42	0,41	0,16
Leopold & Miller (1956)	0,26	0,33	0,32	Riley (1978)	0,35	0,48	0,17
Leopold & Langbein (1962)	0,23	0,42	0,36		0,35	0,52	0,13
Langbein (1964)	0,23	0,42	0,35		0,38	0,46	0,16
	0,35	0,42	0,55	Lane & Foster (1980)	0,37	0,37	0,25
Scott (1966)	0,24	0,56	0,20		0,32	0,32	0,36
	0,16	0,30	0,52	Latrubesse & Aquino (1998)	0,12	0,53	0,35
	0,06	0,43	0,53	Jowett (1998)	0,18	0,31	0,43
Leopold & Skibitzke (1967)	0,04	0,36	0,61	Kale & Hire (2004)	0,21	0,45	0,33
	0,08	0,41	0,52	Stewardson (2005)	0,11	0,28	0,52
	0,27	0,20	0,53	Aquino et al. (2005)	0,03	0,50	0,46
	0,10	0,40	0,49	Grison & Kobiyama (2011a)	0,08	0,36	0,54
Stall & Yang (1970)	0,23	0,41	0,36		0,15	0,42	0,43
	0,29	0,40	0,31	Ran et al. (2012)	0,18	0,29	0,53
Knighton (1972)	0,11	0,56	0,33				
	0,23	0,27	0,50				
				Minímo	0,03	0,20	0,13
				Média	0,21	0,45	0,34
				Máximo	0,42	0,56	0,55

7.3 - MATERIAIS E MÉTODOS

7.3.1 - DADOS UTILIZADOS

No presente estudo foram analisadas informações hidrométricas e morfológicas do canal fluvial nas estações fluviométricas, implantadas na bacia do rio Ijuí, operadas pela (CPRM) Serviço Geológico do Brasil e sob responsabilidade da (ANA) Agência Nacional de Águas. Os dados foram obtidos do site da ANA no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb). Foi utilizado o *software* Hidro 1.2 como ferramenta de suporte para visualização e seleção dos dados, sendo selecionadas oito estações fluviométricas (Tabela 7.2).

As variáveis (Q , w , d , v) foram obtidas no momento de cada medição da vazão, realizadas pela CPRM no decorrer do tempo de operação em cada estação, com a série histórica variando de 11 à 72 anos. Também faz parte monitoramento realizado pela CPRM, o levantamento do perfil transversal da seção de medição (levantamento altimétrico) que é realizado geralmente uma vez ao ano.

Tabela 7.2 - Dados básicos das estações fluviométricas.

Código	Nome	Rio	Município	Latitude	Longitude	Área (km ²)	Altitude (m)	Responsável	Número de medições de vazões	Série Histórica
75320000	Ponte Mística	Rio Ijuí	São Luiz Gonzaga	28°10'53"	54° 44'18"	9450	160	ANA	195	22/10/1957 14/08/2008
75295000	Colônia Mousquer	Rio Ijuizinho	Santo Ângelo	28° 23' 33"	54° 19'51"	2160	200	ANA	118	13/11/1974 29/08/2013
75230000	Santo Angelo	Rio Ijuí	Entre Ijuis	28° 21' 19"	54° 16'06"	5440	200	ANA	285	23/11/1941 28/09/2013
75200000	Conceição	Rio Conceição	Ijuí	28° 45' 50"	53° 58'23"	811	160	ANA	288	12/06/1942 04/09/2013
75205000	Ponte Nova Conceição	Rio Conceição	Coronel Barros	28° 23' 01"	54° 01'54"	970	160	ANA	114	09/11/1974 25/04/2013
75186000	Ponte Nova Potiribu - Jusante	Rio Potiribu	Ijuí	28° 22' 15"	53°52'45"	613	320	ANA	32	03/06/2002 05/09/2013
75155000	Passo Faxinal	Rio Ijuí	Ijuí	28°17'21"	53°46'48"	1940	200	ANA	292	25/11/1941 – 07/09/2013

7.3.2 – ESTABELECIMENTO DA CURVA DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES MEDIDAS EM CAMPO

Para definir as curvas de frequência de vazões medidas em campo, foram utilizados dados de Q de cada estação. Estes dados foram ordenados em forma decrescente e determinado a sua frequência de excedência, calculada pela expressão $F = n/N$, sendo F a frequência de excedência; n a posição que o dado ocupa dentro da série histórica; e N o tamanho da série histórica. A definição do ponto de corte dos respectivos grupos de vazões foi embasada no conceito da curva de permanência, (Smakhtin, 2001) define que curva de permanência pode ser expressa pela relação entre a magnitude e a frequência de vazões. Com os valores de vazões (diária) observados em campo definiu-se a curva de permanência de cada estação, sendo determinadas as vazões Q_5 , Q_{50} e Q_{95} . Estes valores foram utilizados para determinar o ponto de corte para determinação do agrupamento das vazões em $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, vazões medidas em campo.

A escolha da definição da curva de permanência como auxílio para definição do ponto de corte da curva de frequência das vazões medidas em campo se deu em virtude desta primeira metodologia ser bastante utilizada para definir quantitativamente a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica. Inclusive, a curva de permanência é utilizada como critério de outorga em muitos estados brasileiros, por exemplo, Rondônia, Goiás, Alagoas e Paraná outorgam até 30% da Q_{95} , 50% da Q_{95} , 90% da Q_{90} , 50% da Q_{95} de seus rios, respectivamente, onde Q_{50} , Q_{90} e Q_{95} se referem a 50%, 90% e 95% de tempo que a respectiva vazão (Q) é igualada ou excedida.

7.3.3 - ANÁLISE DA GEOMETRIA HIDRÁULICA

Os dados de cada medição (Q , w , d e v) foram dispostos em ordem decrescente, sendo Q a variável determinante. Com estes dados agrupados fez-se o ponto de corte de cada conjunto de vazões ($\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$) de cada série histórica, sendo determinados os expoentes b , f e m para as diferentes Q de cada estação, conforme exemplifica a Figura 7.2.

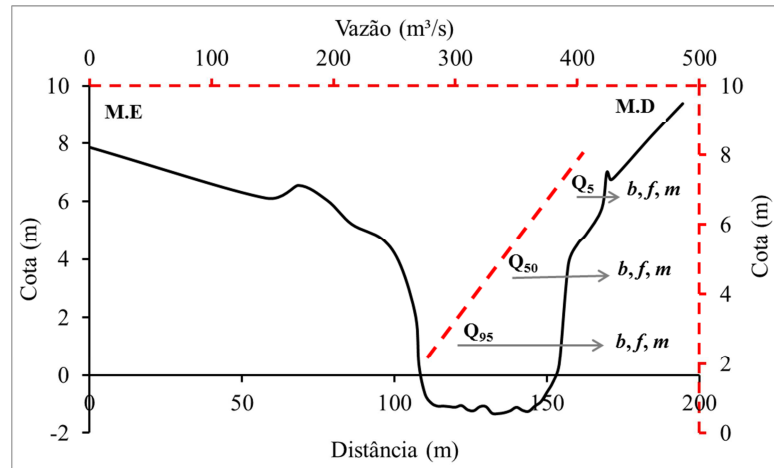


Figura 7.2 - Esquema ilustrativo do $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$ de cada estação e seus respectivos expoentes b , f e m .

7.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Sendo o objetivo deste trabalho determinar o comportamento dos expoentes b , f e m em relação a curvas de frequência de vazões medidas em campo, apresenta-se na Tabela 7.3 os diferentes valores dos respectivos expoentes em relação aos valores $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$ de cada estação fluviométrica. Nota-se o somatório $b+f+m=1$ em todas as Q_s analisadas.

Comparando os valores apresentados na Tabela 7.3 com os valores apresentados na Tabela 7.1 observa-se que os valores encontrados pelo presente estudo apresentam certa discrepância dos dados apresentados pela literatura. Nos dados encontrados no presente trabalho o expoente m apresentou valores significativamente superior, seguido por f e b , principalmente em vazões $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, demonstrando que v tem maior sensibilidade sobre as oscilações de Q . Quando as vazões estão em $\geq Q_5$ observou-se certa igualdade entre os parâmetros. A predominância do expoente m sobre os outros expoentes pode ser explicada em virtude das feições geomorfológicas predominantes na bacia, conforme a descrição exposta por Leinz (1949) e IBGE (1986). Ou seja, em virtude da dureza das rochas predominante, basalto, os canais são encaixados com suas margens bem definidas e estáveis.

Leopold & Maddock (1953) analisando a geometria hidráulica de 20 rios localizados na parte central e sudoeste dos Estados Unidos chegaram a esta mesma constatação. Com o acréscimo da vazão, em média, a velocidade e a profundidade aumentam mais rapidamente do que a largura nas seções transversais.

Tabela 7.3 - Valores dos coeficientes e expoentes para estações fluviométricas.

Estações fluviométricas	≥ Q5							≥ Q50							≥ Q95							≥ Q5	≥ Q50	≥ Q95	≥ Q5	≥ Q50	≥ Q95
	N	a	c	k	b	f	m	N	a	c	k	b	f	m	N	a	c	k	b	f	m	b+f+m	b+f+m	b+f+m	a.c.k	a.c.k	a.c.k
Ponte Mística	5	48,42	0,10	0,21	0,15	0,38	0,47	88	71,65	0,63	0,02	0,07	0,30	0,62	159	79,90	0,79	0,02	0,06	0,27	0,68	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Colônia Mousquer	6	11,53	0,37	0,24	0,30	0,25	0,45	58	30,14	0,40	0,08	0,13	0,39	0,48	111	37,57	0,46	0,06	0,08	0,36	0,56	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Santo Ângelo	9	20,46	0,75	0,07	0,22	0,33	0,45	156	70,10	0,43	0,03	0,10	0,31	0,59	259	90,66	0,39	0,03	0,06	0,32	0,62	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Conceição	10	12,52	0,18	0,44	0,12	0,31	0,57	176	20,66	0,39	0,12	0,10	0,44	0,47	283	23,17	0,58	0,07	0,06	0,32	0,62	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ponte Nova Conceição	4	28,54	0,72	0,05	0,20	0,72	0,08	51	34,96	0,72	0,04	0,02	0,28	0,71	104	34,15	0,91	0,03	0,02	0,21	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ponte Nova Potiribu	2	17,95	0,44	0,13	0,40	0,30	0,30	18	22,71	0,44	0,10	0,05	0,29	0,66	30	24,10	0,47	0,09	0,03	0,26	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Jusante	2	17,95	0,44	0,13	0,40	0,30	0,30	18	22,71	0,44	0,10	0,05	0,29	0,66	30	24,10	0,47	0,09	0,03	0,26	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Passo Faxinal	13	6,70	0,61	0,25	0,15	0,38	0,47	175	25,03	0,38	0,11	0,17	0,39	0,44	260	35,84	0,42	0,07	0,09	0,36	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mínimo	2	6,70	0,10	0,05	0,12	0,25	0,08	18	20,66	0,38	0,02	0,02	0,28	0,44	30	23,17	0,39	0,02	0,02	0,21	0,55						
Média	7	20,87	0,45	0,20	0,22	0,37	0,39	103	39,32	0,48	0,07	0,09	0,34	0,57	172	46,48	0,57	0,05	0,06	0,30	0,64						
Máximo	13	48,42	0,75	0,44	0,63	0,72	0,57	176	71,65	0,72	0,12	0,17	0,44	0,71	283	90,66	0,91	0,09	0,09	0,36	0,77						

Sendo N o número de valores analisados em cada parte da curva de frequência.

A fim de entender pormenores a significância de cada expoente e sua relação com as Q_s analisadas, a Tabela 7.4 apresenta o R^2 de cada expoente. Pode-se constatar o alto valor dos R^2 , nos valores encontrados no expoente m nas vazões $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, seguido por f e por último b . Novamente observa-se que quando as vazões estão em $\geq Q_5$ ocorre certa semelhança entre o R^2 dos expoentes, com f tendo o maior valor de R^2 .

O expoente m apresentou R^2 médio de 0,56; 0,78 e 0,88 para $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, respectivamente. Já o expoente f teve um R^2 médio de 0,62; 0,66 e 0,78 para $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, respectivamente, e por último o expoente b exibiu valores médios de R^2 em 0,52; 0,32 e 0,27 para $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, respectivamente.

Tabela 7.4 - R^2 dos expoentes b, f e m e sua relação com Q .

Estações fluviométricas	$\geq Q_5$			$\geq Q_{50}$			$\geq Q_{95}$		
	b	f	m	b	f	m	b	f	m
Ponte Mística	0.09	0.26	0.11	0.38	0.33	0.73	0.42	0.39	0.83
Colônia Mousquer	0.77	0.62	0.78	0.53	0.51	0.62	0.41	0.55	0.72
Santo Ângelo	0.58	0.35	0.56	0.55	0.57	0.80	0.41	0.68	0.88
Conceição	0.28	0.83	0.11	0.18	0.62	0.65	0.18	0.60	0.85
Ponte Nova Conceição	0.30	0.89	0.94	0.02	0.80	0.96	0.02	0.78	0.98
Ponte Nova Potribu Jusante	0,83	0,70	0,75	0.40	0.43	0.88	0.36	0.40	0.92
Passo Faxinal	0.78	0.71	0.72	0.52	0.89	0.83	0.38	0.95	0.93
Mínimo	0.09	0.26	0.11	0.02	0.33	0.62	0.02	0.39	0.72
Média	0.52	0.62	0.56	0.32	0.66	0.78	0.27	0.62	0.88
Máximo	0.83	0.89	0.94	0.55	0.90	0.96	0.42	0.95	0.98

7.4.1 - RELAÇÃO Q - w

Os valores encontrados para o expoente b foram os menores observados nas séries em análise. Nota-se que os referidos expoentes apresentam valores médios de 0,18 para $\geq Q_5$; 0,09 para $\geq Q_{50}$ e 0,06 para $\geq Q_{95}$. Diante destas constatações, pode-se dizer que quando o fluxo d'água está com cotas altas, ou seja, em $\geq Q_5$ ocorre um pequeno aumento em w , provavelmente em virtude do formato do canal, como se exemplifica na Figura 7.2. Quando Q está decrescendo ocorre uma diminuição na importância de w sobre Q , provavelmente pelo mesmo motivo, a forma do canal (encaixado) não sofre alterações de w em $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$.

Quando as vazões estão baixas a variável w apresenta baixíssima sensibilidade, Latrubesse & Franzinelli (2002) observaram as mesmas constatações, e concluíram que no Rio Solimões ocorre grande estabilidade da largura e maior variação da profundidade e velocidade do rio com o aumento da vazão. Este comportamento da geometria hidráulica do Rio Solimões é típico de rios confinados ou de rios com margens estáveis e com material coesivo.

A Figura 7.3 apresenta os gráficos de dispersão w vs. Q para a estação de Passo Faxinal. Analisando a Figura 7.3 e conforme apresentado pela Tabela 7.3 fica evidenciado os baixos valores de R^2 encontrados, esta constatação vai ao encontro dos baixos valores encontrados para o expoente b , que corrobora para a explicação que w tem pouca importância sobre as oscilações de Q .

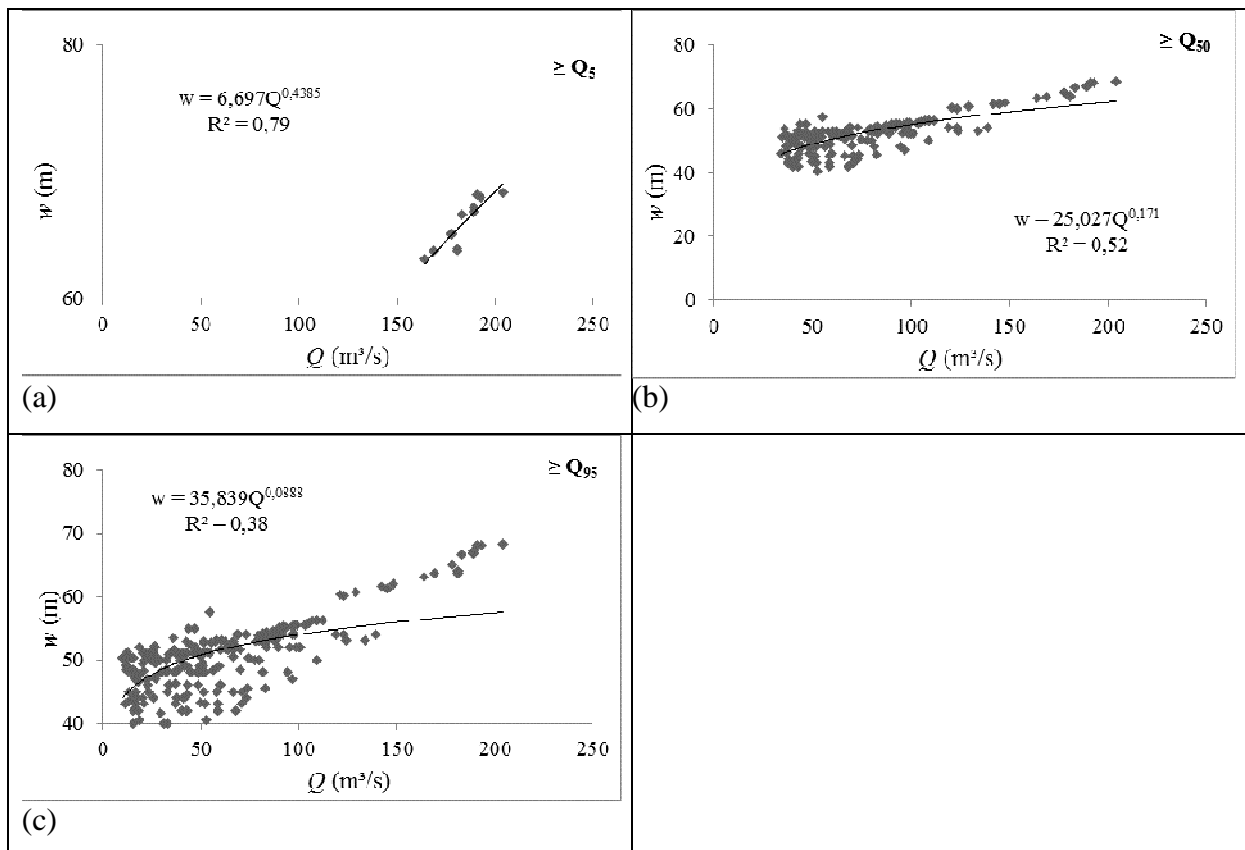


Figura 7.3 - Relação de w vs. Q da estação Passo Faxinal: (a) $\geq Q_5$, (b) $\geq Q_{50}$ e (c) $\geq Q_{95}$.

7.4.2 - RELAÇÃO $Q - D$

Os valores encontrados para o expoente f foram intermediários, com valores médios de 0,38 para $\geq Q_5$; 0,34 para $\geq Q_{50}$ e 0,30 para $\geq Q_{95}$, apresentando certa semelhança entre eles. Analisando os valores encontrados observa-se que tanto em vazões altas quanto em vazões

baixas o expoente fica na faixa de 0,3; evidenciando a mesma importância deste expoente em diferentes vazões, isso pode ser explicado pelo mesmo motivo citado anteriormente, a forma encaixada dos canais. Os valores de cada expoente podem ser encontrados na Tabela 7.3.

A Figura 7.4 apresenta os gráficos de dispersão d vs. Q para a estação de Conceição, analisando o R^2 da estação Conceição observa-se R^2 de 0,83; 0,62; 0,60 para $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, respectivamente. Quando se analisa o R^2 de todas as estações se observa valores de R^2 de 0,61; 0,66 e 0,62 $\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, respectivamente, isto evidencia a importância de d nas diferentes vazões. No entanto, evidentemente, quando ocorre o aumento da vazão há o aumento da profundidade.

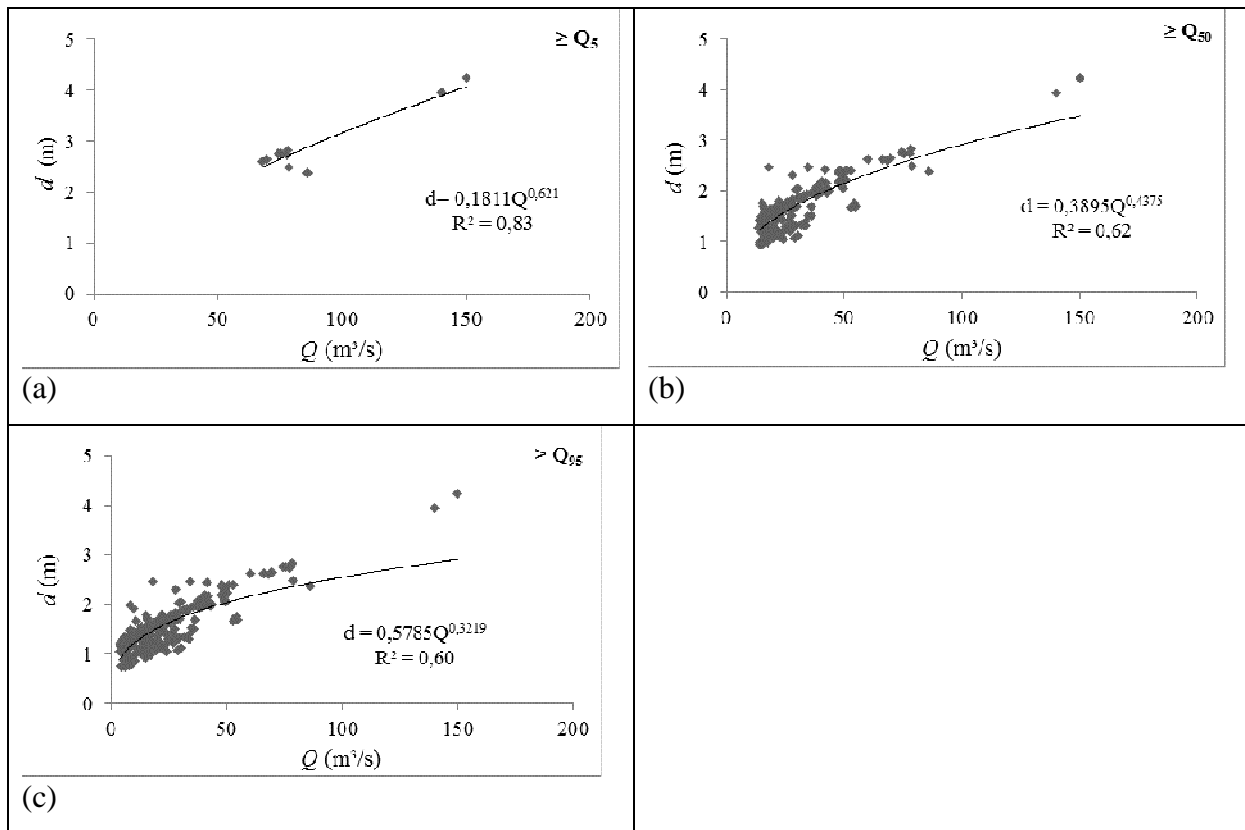


Figura 7.4 - Relação de d vs. Q da estação Conceição: (a) $\geq Q_5$, (b) $\geq Q_{50}$ e (c) $\geq Q_{95}$.

7.4.3 - RELAÇÃO $Q - v$

Os valores para o expoente m apresentaram as maiores médias, 0,43 para $\geq Q_5$; 0,57 para $\geq Q_{50}$ e 0,64 para $\geq Q_{95}$. Percebe-se que com a diminuição da cota ocorre aumento nos valores do expoente, evidenciando a importância da variável v sob os diferentes fluxos passando no canal, quanto mais baixa a cota maior a importância de v . Isso pode ser

respondido pela forma do canal pois os mesmos apresentam em sua maioria forma encaixada com margens fixas, constituída por materiais finos e coesivos, com maior poder de agregação e conseqüentemente menor probabilidade de alargamento de suas margens, e em muitos casos o leito do canal está sob rocha sã (lajeado) o que proporciona maior velocidade do fluxo em virtude da menor rugosidade do canal.

A Figura 7.5 apresenta os gráficos de dispersão v vs. Q para a estação de Santo Ângelo. Os valores do expoente m apresentados na Tabela 7.3 e exemplificados na Figura 7.5 vão ao encontro dos valores de R^2 apresentados na Tabela 7.4 comprovando a forte correlação entre v e Q . Como dito anteriormente, os canais das respectivas estações fluviométricas apresentam w bem definida, então com o aumento de Q a variável v aumenta significativamente (Figura 7.5), sendo que v varia de 0,03a 2,07 m/s.

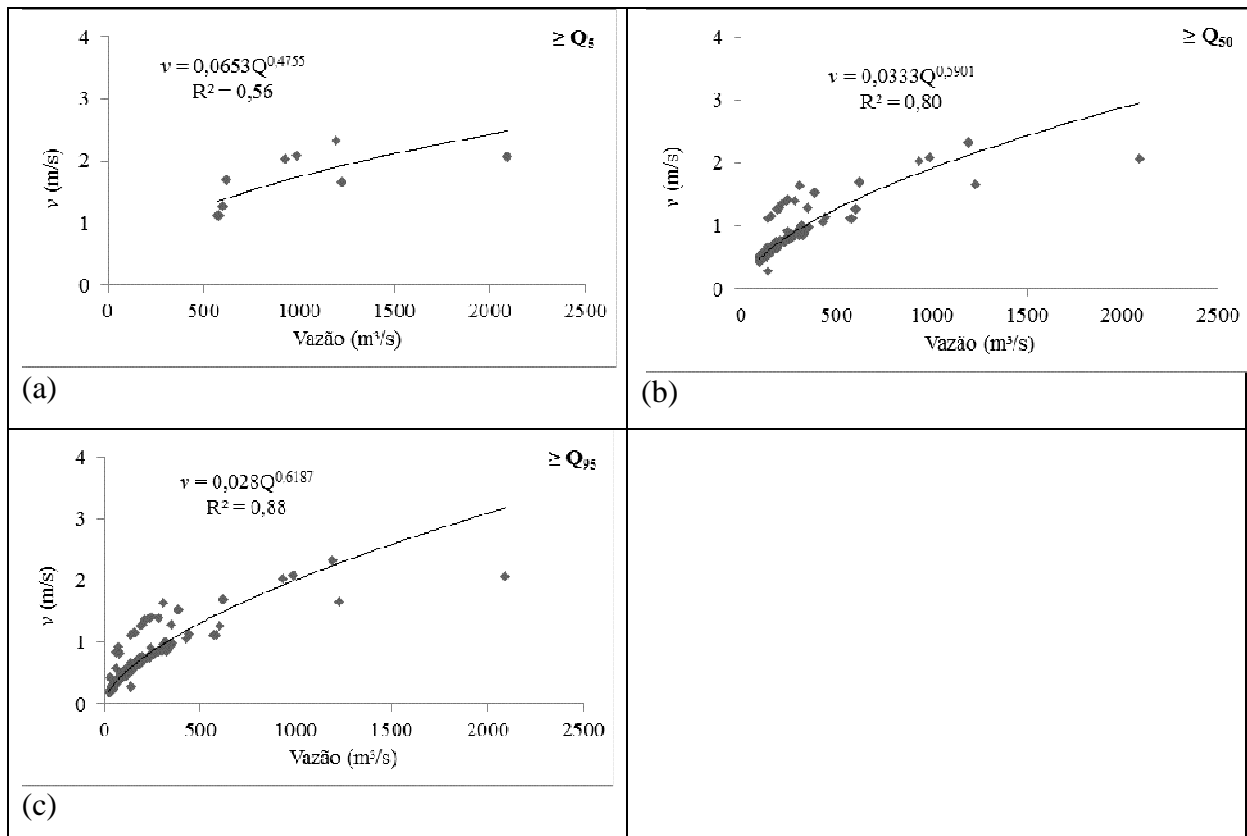


FIGURA 7.5 - GRÁFICO DE DISPERSÃO v VS. Q DA ESTAÇÃO SANTO ÂNGELO: (A) $\geq Q_5$, (B) $\geq Q_{50}$ E (C) $\geq Q_{95}$.

7.5 - CONCLUSÕES

O estudo da geometria hidráulica da seção transversal realizada em sete estações fluviométricas, localizadas na bacia do rio Ijuí, Estado do Rio Grande do Sul teve o objetivo de determinar os expoentes b , m e f da geometria hidráulica e correlacioná-los com a curva de frequência de vazões medidas em campo de cada estação fluviométrica.

Avaliando os respectivos expoentes nas diferentes vazões ($\geq Q_5$, $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$) pode-se concluir que a variável v tem maior correlação com Q . Isto pode ser explicado em virtude das estações fluviométricas estarem localizadas sob rochas basálticas, intercaladas com rochas sedimentares do arenito Botucatu. Conseqüentemente seus canais fluviais são encaixados e suas margens bem definidas e estáveis, deste modo, w pouco se modifica em resposta ao aumento de Q , e à medida que Q aumenta na seção transversal, v aumenta rapidamente, seguido por d . O expoente b apresenta valores próximos a zero em $\geq Q_{50}$ e $\geq Q_{95}$, isto se justifica pela homogeneidade litológica em toda a bacia do rio Ijuí. A variável w aumenta de acordo com a área de influência de cada estação o que vai ao encontro da literatura existente que esclarece o aumento da seção do canal de acordo com o aumento da área a montante da seção de medição.

Para as diferentes Q_s analisadas, os valores de b , f e m variaram de 0,02 a 0,44; de 0,21 a 0,62 e de 0,15 a 0,77; respectivamente. As correlações de Q - w , Q - d e Q - v tiveram R^2 médios de 0,47; 0,61 e 0,54, respectivamente, para $\geq Q_5$. Para $\geq Q_{50}$ os valores de R^2 médios para Q - w , Q - d e Q - v foram de 0,32; 0,66 e 0,78, respectivamente, e para $\geq Q_{95}$ os valores foram de 0,27; 0,69 e 0,88, respectivamente.

A geometria hidráulica através da determinação da forma do canal, por meio do conhecimento do comportamento de suas variáveis se apresenta com uma metodologia para se determinar a vazão ali passante, e por consequência a determinação da disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica. Nesse sentido, pode-se prever, se a forma da seção transversal de um determinado local e a forma do canal no decorrer do canal é o produto das interações dos mecanismos hidrológicos, geológicos, geomorfológicos e pedológicos ocorrentes na bacia, então se pode prever que, sabendo-se a forma do canal, podemos inferir a vazão passante neste canal.

7.6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AQUINO, S.; STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Regime hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do Rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2, p. 29-41, 2005.
- CHRISTOFOLETTI, A. Geometria hidráulica. **Notícias Geomorfológicas**, v. 16, n. 32, p. 3-37, 1976.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1981. 313p.
- DINGMAN, S. L. Analytical derivation of at-a-station hydraulic–geometry relations. **Journal of Hydrology**, v. 334, p.17-27, 2007.
- FERNANDEZ, O.V.Q.; BORTOLUZZI, L.N. Magnitude e frequência das descargas dominantes em rios das regiões Oeste e Sudoeste do Paraná. Anais. **VII Simpósio Nacional de Geomorfologia**, Belo Horizonte (MG), UFMG, 11 p., CD-Rom., 2008.
- FERGUSON, R. I. Hydraulics and hydraulic geometry. **Progress in Physical Geography**, v. 10, p. 1-31, 1986.
- FISRWG. Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. Federal Interagency Stream Restoration Working Group. Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN 3/PT.653. ISBN-0- 934213-59-3. 1998.
- GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Teoria e aplicação da geometria hidráulica: Revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, p. 25-38, 2011a.
- GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Geometria hidráulica em bacias hidrográficas Paranaenses. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 2, p. 111-131, 2011 b.
- JOWETT, I.G. Hydraulic geometry of New Zealand rivers and its use as a preliminary methods of habitat assessment. **River Research Applied** 14, p. 451–466, 1998.
- KALE, V.S.; HIRE, P.S. Effectiveness of monsoon floods on the Tapi River, India: role of channel geometry and hydrologic regime. **Geomorphology**, v. 57, p. 275–291, 2004.
- KNIGHTON, A. D. Changes in braided reach. **Geological Society of America Bulletin**, v. 83, p. 3813-3922, 1972.
- LANE, E. W. Stable channels in erodible material. Am soc. Civil Eng.,trans n.63 pp. 123-142 (1937)(Cap.III) In. **River Morphology**. SCHUMM, S. A. (organizer) Colorado State University, 1972, 429p.
- LANE, L. J.; FOSTER, G. R. Modeling channel processes with changing land use. Proceedings, ASCE **Symposium on Watershed Management**, v. 1, p. 200-214, 1980.
- LANGBEIN, W.B. Geometry of river channels. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, Vol. 90, No. HY2, p. 301-311, 1964.
- LATRUBESSE, E. M.; AQUINO, S. Geometria hidráulica em rios da Amazônia Sul-Occidental. **Revista Geosul**, Florianópolis, v. 14, n. 27, p. 610-613, 1998.
- LATRUBESSE, E. M; FRANZINELLI, E. The Holocene alluvial plain of the middle Amazon River, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, p. 241-257, 2002.
- LATRUBESSE, E. M. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. **Geomorphology**, v. 101, p. 130-145, 2008.

- LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. **United States Geological Survey**, Professional Paper, n.252, 56p, 1953.
- LEOPOLD, L. B; MILLER J. P. Ephemeral streams-hydraulic factors and their relation to the drainage net. **United States Geological Survey**, Professional Paper, n.282A, 42p, 1956.
- LEOPOLD, L. H.; LANGBEIN, W. B. The concept of entropy in landscape evolution. **United States Geological Survey**, Professional Paper 500-A, 20 p, 1962.
- LEOPOLD, L. B.; SKIBITZKE, H. E. Observations on measured rivers. **Geographical Annales**, v. 49A, No. 2-4, p. 247-255, 1967.
- LEOPOLD, L. B. A. **View of the River**. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 290p, 1994.
- RAN, L.; WANG, S.; LU, X. X. Hydraulic geometry change of a large river: a case study of the upper Yellow River. **Environmental Earth Science**, v. 66. p. 1247–1257, 2012.
- RHOADS, B.L. Statistical models of fluvial systems. **Geomorphology**, v. 5, p. 433-455, 1992.
- RICHARDS, K. S. Hydraulic geometry and channel roughness-a nonlinear system. **American Journal of Science**, n. 273, p. 877-896, 1973.
- RILEY, S. J. The role of minimum variance theory in defining the regime characteristics of the lower Namoi-Gwydir basin. **Water Resources Bulletin**, v. 14, p. 1-11, 1978.
- SCOTT, C. H. Suspended sediment and the hydraulic geometry of channels. Erosion and Deposition in the Loess-Mantled Great Plains, Madison Creek Drainage Basin, Nebraska, **United States Geological Survey**, Professional paper 352-H, Washington, D. C., 1966.
- SINGH, V.P. On the theories of hydraulic geometry. **International Journal of Sediment Research**, v. 18, p. 196-218, 2003.
- STALL, J. B.; YANG, C. T. Hydraulic geometry of 12 selected stream systems of the United States. University of Illinois **Water Resources Research Center**, Research Report. n. 32, 1970.
- STEWARTSON, M. Hydraulic geometry of stream reaches. **Journal of Hydrology** v. 306, p. 97–111, 2005.
- SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes fluviais**. 2^a ed. Florianópolis: Ed. UFSC. 183p., 1990.
- SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology: An Introduction to the study of landforms**. London: LONGMAN, 537p., 1991.
- WOLMAN, M. G. The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania. **United States Geological Survey** Professional Paper 271, Washington, D. C, 1955.

8 - REGIONALIZAÇÃO COM GEOMETRIA HIDRÁULICA E FRACTAL: ESTUDO DE CASO COM HIDROGRAMA UNITÁRIO INSTANTÂNEO GEOMORFOLÓGICO (GIUH)

8.1 – INTRODUÇÃO

O conhecimento das características hidrológicas de uma bacia hidrográfica é a premissa para a conservação dos recursos naturais e para aplicação de técnicas adequadas para o desenvolvimento sustentável. O monitoramento de variáveis físicas (precipitação, evaporação, infiltração, escoamento superficial, cotas e vazões) é uma das formas de se determinar tal conhecimento.

Além do monitoramento, propriamente dito, outra forma de conhecer as particularidades de uma bacia é saber o comportamento de uma variável no decorrer do tempo e do espaço e suas transformações e agregações de fenômenos, no qual, pode-se citar a transformação de Precipitação (P) em Vazão (Q). Esta transformação é um dos mais complexos fenômenos envolvidos em uma bacia hidrográfica, em virtude de diversas variáveis determinantes, como por exemplo, tipo de solo, uso e ocupação do solo, umidade do solo, declividade dos canais, forma da bacia, entre outros. Outro fator limitante no conhecimento de tais processos é a magnitude espacial das bacias hidrográficas, conseqüentemente, dificultando e até mesmo impossibilitando o monitoramento contínuo em todos os locais de interesse.

Com o objetivo de sanar tais lacunas Sherman (1932) propôs uma metodologia para estimar a vazão em um canal no exutório de uma bacia hidrográfica, inserindo o princípio da teoria do Hidrograma Unitário (HU). O HU se baseia no princípio da precipitação efetiva ser distribuída uniformemente na bacia e dentro de um período de tempo especificado; o HU é reflexo de um determinado período de precipitações e as características físicas da bacia (Chow, 1964). Este mesmo autor propôs uma nova forma para definir a resposta de P - Q em uma bacia, determinando que Q de resposta da bacia seria independente da duração da precipitação, mas referente a uma precipitação unitária instantânea, criando assim o conceito de Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI). Desde o HUI proposto por Chow (1964) foram determinados diversos modelos: modelos lineares em que uma entrada $Y_1(t)$ produz uma saída $X_1(t)$ e a entrada $Y_2(t)$ produz uma saída $X_2(t)$, seguindo a condição $Y_1(t) + Y_2(t)$ produz a saída $X_1(t) + X_2(t)$; modelos não lineares, os quais indicam que o escoamento tem um comportamento não linear, podendo ser representados pela equação da continuidade

$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$, indicando que Q é variável independente do escoamento, dependente de A (área), sendo A área da seção; q vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento do trecho; x intervalo do trecho e t intervalo de tempo.

Entre os diversos modelos existentes o presente trabalho aborda o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (*Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph - GIUH*), proposto por Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979). Esta metodologia leva em consideração as clássicas leis geomorfológicas propostas por Horton (1945), vide Tabela 8.1.

O processo $P-Q$ é resultado de diversos e complexos processos existentes nas inter-relações dos componentes dos sistemas hidrológicos de uma bacia hidrográfica, o que dificulta equacionar respostas fidedignas do fluxo resultante. Esse desafio se torna ainda mais complicado quando os dados disponíveis são limitados ou até mesmo quando não há dados monitorados. Cudennec *et al.* (2004) investigaram os aspectos geomorfológicos no conceito do HU e concluíram que os parâmetros geomorfológicos explicam o HU pela teoria do GIUH. Assim, estimar a vazão no exutório de uma bacia hidrográfica, o GIUH se demonstra uma ferramenta útil, pois leva em consideração as feições hidrogeomorfológicas da rede de drenagem da bacia.

Apesar da teoria do GIUH ser consolidada no meio científico o presente trabalho se diferencia por abordar uma nova forma de se determinar o parâmetro λ , que é produto da velocidade média (i) pelo comprimento médio dos canais de ordem (i); e regionalizar a variável velocidade (v) com a inserção de parâmetros da geometria hidráulica (GH), geometria fractal (GF) e precipitação média anual (Pma). Conforme relatado por Hrachowitz *et al.* (2014) a IAHS - *International Association of Hydrological Sciences*, determinou o PUB - *Predictions in Ungauged Basins*, que foi uma iniciativa lançada com o objetivo de formular e implementar programas científicos voltados para o avanço na capacidade de fazer previsões em bacias não monitoradas. Nesse sentido, o presente trabalho almeja contribuir com o avanço da ciência hidrológica implementando um novo método de inferir vazões em locais com poucos dados ou até mesmo sem dados. Para tal, utilizar-se-á a GH, GF e Pma como parâmetros de entrada e utilizando como estudo de caso a bacia hidrográfica do rio Ijuí, Estado do Rio Grande do Sul.

8.2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

8.2.1 – HIDROGRAMA UNITÁRIO INSTANTÂNEO GEOMORFOLÓGICO

O GIUH foi proposto por Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979) e subsequentemente generalizado por Gupta *et al.* (1980). Nesta teoria a resposta hidrológica de uma bacia é estudada pela decomposição do processo de formação do escoamento superficial dentro de distintas contribuições: (i) nos mecanismos de geração do escoamento superficial e tempo de transporte dentro das encostas; (ii) no processo que envolve a propagação da vazão, principalmente dentro dos canais individuais; (iii) na representação da estrutura geomorfológica da rede de drenagem. Portanto, a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica é baseada na relação entre a sua geomorfologia (área de captação, forma da bacia, topografia, declividade do canal, densidade de fluxo e armazenamento do canal) e sua hidrologia (Agirre *et al.*, 2005; Nourani *et al.*, 2009; Khalegui *et al.*, 2014).

Rodríguez-Iturbe & Rinaldo (1997) comentaram que bacias hidrográficas geralmente seguem as leis geomorfológicas propostas por Horton (1945); sendo que o HUI da bacia pode ser interpretado como função densidade de probabilidade (PDF), a qual, segundo Gupta *et al.* (1980) é definida como função do tempo de viagem de uma gota, quando inserida no movimento newtoniano da rede de drenagem da bacia (ω). Assim, o princípio da teoria GIUH é derivar esta PDF com base em parâmetros geomorfológicos. A fim de determinar a GIUH; o dado de entrada (precipitação) é considerado como gotas de chuva uniformes que são assumidas para serem distribuídas aleatoriamente ao longo da bacia hidrográfica e ao longo do tempo.

Hall *et al.* (2001) relataram que a escala e a forma do GIUH dependem de suposições sobre: (a) probabilidade de que uma gota de chuva caia sobre uma área de drenagem pertencente a um fluxo da ordem (i); (b) probabilidade de transição da gota a partir do fluxo de ordem (i) para outro de ordem (j), $i < j$; e (c) PDF selecionada para descrever os tempos de retenção da gota para qualquer ordem de canal. Os itens (a) e (b) são independentes de escala e determinados apenas pela topologia da rede de drenagem, o que pode ser descrito em termos de Leis de Horton. Em contraste, os tempos de permanência, item c, são dependentes dos canais de drenagem e suas propriedades hidráulicas.

Para melhor entendimento e interpretação do processo de determinação e análise do GIUH a Figura 8.1 demonstra de forma hipotética uma bacia de 3ª ordem, dividida em sub-bacias de acordo com a ordem de seus canais; também é apresentado o esquema de

reservatórios lineares e paralelos. Aqui o HU de cada ordem é representado por convolução a partir dos fluxos de ordem (i) até ordem (j) definindo-se o GIUH, (Franchini & O'Connell, 1996). Cada reservatório λ representa a bacia de ordem (i) que recebe o aporte de todos os canais de ordem $< (i)$; γ representa a probabilidade que uma gota caia na bacia (i) e drene para uma canal de ordem (i) e Pr representa a probabilidade de transição.

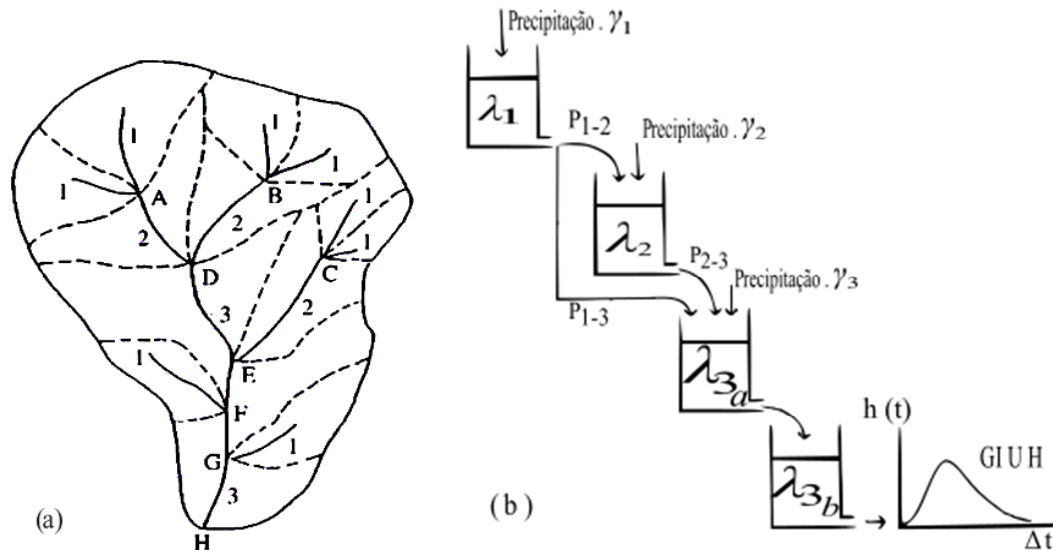


Figura 8.1 - Teoria do GIUH: (a) uma bacia hipotética de 3ª ordem com a representação das sub-bacias divididas de acordo com a ordem (i) dos canais e (b) representação de reservatórios lineares em cascata. (Modificado de Franchini & O'Connell, 1996).

Khaleghi *et al.* (2014) em estudo realizado em uma bacia (37,1 km²) localizada no noroeste do Irã, mostraram o bom desempenho do modelo GIUH na determinação de geração de hidrogramas. Os autores ainda concluíram que em virtude do método proposto ser de simples obtenção, este se apresenta com a melhor proposta para determinar vazões em bacias hidrográficas sem monitoramento. Kumar (2014) em estudo sobre GIUH na bacia hidrográfica de Ramganga (452 km²), parte central do Himalaia (Índia) concluiu que este modelo não necessita de dados históricos de P e Q , podendo ser efetivamente utilizados para prever o escoamento superficial em bacias montanhosas sem monitoramento, sendo útil para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. A mesma conclusão foi afirmada também por Bhaskar *et al.* (1997) que aplicou o modelo na bacia do rio Jira (615 km²), localizada no leste da Índia.

8.2.2 - MÉTODOS QUE UTILIZAM LEIS DE HORTON (1945)

Rodríguez-Iturbe & Rinaldo (1997) afirmaram que bacias hidrográficas geralmente seguem as leis geomorfológicas propostas por Horton (1945). Seguindo este preceito os autores utilizaram as leis propostas por Horton (1945) como parâmetros de entrada do GIUH.

De acordo com Rosso *et al.* (1991), as leis de Horton referem-se a Lei do Número de Canais, Lei do Comprimento de Canais e Lei da Área da Bacia, (Tabela 8.1). As relações espaciais de escalonamento geométrico são independentes da ordem ou resolução onde a rede está sendo observada e tendem a auto-similaridade do sistema de canais da bacia. Nesse sentido, as referidas leis podem ser empregadas para determinar dimensões fractais de canais individuais e rede de canais.

Tabela 8.1 - Resumo das leis de Horton (1945).

Leis de Horton	Parâmetro da equação	Variação comum dos parâmetros
Lei do Número de Canais	$R_B = \text{taxa de bifurcação}$ $R_B = N_w / N_{w+1}$	$3 < R_B < 5$
Lei do Comprimento de Canais	$R_L = \text{taxa de comprimento}$ $R_L = \bar{L}_{w+1} / \bar{L}_w$	$1,5 < R_L < 3,5$
Lei da Área da Bacia de Canais	$R_A = \text{taxa de área}$ $R_A = \bar{A}_{w+1} / \bar{A}_w$	$3 < R_A < 6$

Sendo N_w o número de segmento da ordem w ; L_w o comprimento médio da ordem w ; e \bar{A}_w a área média das bacias de cada canal da ordem w .

8.2.3 - DERIVAÇÃO DO GIUH

A precipitação efetiva é considerada como sendo constituída por um número infinito de pequenas gotas, de tamanho uniforme e sem interação, que caem instantaneamente e homoganeamente ao longo de toda a região. O tempo de percurso, ao longo do canal, de uma gota de água aleatoriamente escolhido, a partir do seu ponto de partida para a saída, representa a PDF da bacia (Bhadra *et al.* 2008).

Durante o tempo de viagem da gota d'água ao longo de qualquer um dos canais, ela passa uma certa quantidade de tempo em cada um dos estados que compõem efetivamente o caminho. O tempo que uma partícula T_x gasta no estado x ($x = O_i$ ou $x = C_i$) é uma variável

aleatória, que pode ser descrito por $f_x(t)$. Sendo a ordenada do HUI representada por $h(t)$, PDF:

$$h(t) = \sum \left[f_{x_{oi}}(t) * f_{x_j}(t) * f_{x_j}(t) * \dots * f_{x_k}(t) \right]_{\omega} \cdot P_r(\gamma) \quad (8.1)$$

onde f_{x_j} é a função do tempo de permanência da gota no canal de ordem (Ω); * é a operação de convolução; e $Pr(\gamma)$ é a probabilidade de a gota seguir o caminho γ .

Uma abordagem probabilística, Eq. (8.2), é aplicada na bacia de ordem (Ω) para encontrar a probabilidade de uma gota efetiva seguir um caminho γ

$(x_{oi} \rightarrow x_i \rightarrow x_j \rightarrow \dots x_{\Omega})$, isto é:

$$P_r(\gamma) = \pi_{x_{\omega}} P_{r_{x_{\omega}, x_{\omega+1}}} \dots P_{r_{x_{\omega+1}, x_{\omega+r}}} \dots P_{r_{x_{\Omega-1}, x_{\Omega}}} \quad (8.2)$$

Gupta *et al.* (1980) comentaram que os resultados devem ser relacionados ao número de canais N_i para cada ordem i .

$$P_{r_{i,j}} = \frac{(N_i - 2 N_{i+1}) E(j, \Omega)}{\sum_{k=1+1}^{\Omega} E(k, \Omega) N_k} + \frac{2 N_{i+1}}{N_i} \delta_{i+1,j} \quad (8.3)$$

onde δ é a distribuição delta de Kronecker (unitário e diferente de zero somente se $j = i + 1$; e $E(i, \Omega)$ é o número médio de ligações no interior da ordem i em uma rede de drenagem finita de ordem Ω , cuja expressão é dada por:

$$E(i, \Omega) = N_i = \prod_{j=2}^i \frac{(N_{j-1} - 1)}{2 N_j - 1} \quad (8.4)$$

Para $i=2, \dots, \Omega$, igualmente, a probabilidade que uma gota caia em uma área de ordem ω é aproximado de acordo com as seguintes expressões: (segundo Rodríguez-Iturbe & Valdés, 1979)

$$\pi_1 = \frac{N_1 A_1}{A(\Omega)} \quad (8.5)$$

$$\pi_{\omega} = \frac{N_{\omega}}{A(\omega)} \left(A_{\omega} - \sum_{j=1}^{\omega-1} A_j \frac{N_j P_{r_{j,\omega}}}{N_{\omega}} \right) \quad (8.6)$$

Desprezando-se o tempo de permanência da água na superfície do terreno e os efeitos não lineares da transformação $P-Q$, Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979), chegaram à seguinte expressão para o tempo de permanência médio da partícula num canal de x_i -ésima ordem:

$$\lambda_{x_i} = \bar{L}_{x_i} / v_{x_i} \quad (8.7)$$

onde λ_{x_i} em função do tamanho ou característica de escala da bacia, sendo o número de λ_{x_i} igual à ordem da bacia, incorporando neste parâmetro a componente dinâmica de resposta da bacia; v_{x_i} é a velocidade média no canal de ordem (i) , \bar{L}_{x_i} é o comprimento médio do canal de ordem (i) .

Portanto, $h(t)$ é representado pela Eq. (8.8).

$$f(t) = \lambda_{x_i} e^{-\lambda_{x_i} t} \quad (8.8)$$

A aplicação da Eq. (8.8) para todas as ordens de fluxo, incluindo as de maiores ordens (j) implicaria em um hidrograma para toda a bacia, representado por uma distribuição gama, com valor nulo na origem. Para evitar isso, Rodríguez- Iturbe & Valdés (1979) representaram o canal de ordem (j) por dois reservatórios lineares em série, resultando na seguinte equação, (Franchini & O'Connellb, 1996; Carvalho & Chaudrhy, 2001).

$$h^*(t) = \int_0^t h(\tau) 2\lambda_j e^{-2\lambda_j(t-\tau)} d\tau \quad (8.9)$$

O modelo subsequente representa a resposta do sistema a um impulso instantâneo (excitação) da unidade de volume aplicada na origem no tempo $(t = 0)$. A resposta dos sistemas lineares e contínuos pode ser expresso, no domínio do tempo, em termos da função de resposta de impulso através da convolução integrante do seguinte modo,

$$Q(t) = \int_0^t i(\tau) h(t - \tau) \quad (8.10)$$

onde $i(\tau)$ é a precipitação efetiva; e $h(\tau)$ o GIUH.

8. 2. 4 - CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL V .

Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979) sugeriram que PDF do tempo de deslocamento da gota nos canais é dada por uma distribuição exponencial, (Eq. 8.8), sendo λ estimado pela Eq. 8.7. Kumar *et al.* (2004) observou a dependência do GIUH em relação à dinâmica de v . Pois as características de não linearidade dos processos que transformam $P - Q$ podem ser modelados linearmente quando assumimos que v é constante no decorrer da bacia (Pilgrim, 1977). Para determinação de v existem vários métodos, entre os quais, destacam-se: em

função da intensidade da precipitação efetiva (Rodríguez-Iturbe *et al.*, 1979a; Bhaskar *et al.*, 1997; Wagdany & Rao, 1997; Sahoo *et al.*, 2006); a relação entre o tempo de concentração (t_c) da bacia (Kumar, 2014); e o comprimento do canal principal (Carvalho & Chaudrhy, 2001; Steffen *et al.*, 2009).

$$V_{máx} = \frac{L}{t_c} \quad (8.11)$$

Além destes, Al-Wagdany & Rao (1997) avaliaram v através de uma análise de regressão linear em função da precipitação (P), mostrando que v é inversamente proporcional ao total da precipitação efetiva, ou seja,

$$v = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{P}\right) \quad (8.12)$$

onde β_0 e β_1 são os coeficientes de regressão linear relacionado aos parâmetros geomorfológicos da bacia; e P é a precipitação (mm).

Villela (2001) gerou uma equação regionalizada da variável v para sete bacias no Estado de São Paulo, com áreas entre 40 e 270 km².

$$v = 2,774740 - 0,013127 \cdot A + 0,051679 \cdot L - 0,792506 \cdot Ic \quad (8.13)$$

onde A é a área da bacia [km²]; L é o comprimento do rio principal [km]; Ic é o índice de compacidade da bacia.

Nota-se que diversos autores abordaram diferentes formas de se determinar a variável v , inclusive, Beven *et al.* (1987) e Franchini & O'Connell (1996) propuseram que v deve ser considerada puramente como um parâmetro de calibração.

8.2.5 - GEOMETRIA HIDRÁULICA

A teoria da Geometria Hidráulica (GH) foi proposta por Leopold & Maddock (1953) que a definiram como a medida da largura, profundidade, velocidade e carga sedimentar de um curso d'água natural. Esta teoria descreve a maneira pela qual as propriedades do canal fluvial mudam no decorrer do tempo e do espaço para suportar uma variedade de fluxos. Os autores estabeleceram as relações das variáveis da seção como funções potenciais, diferenciadas somente pelos valores de seus expoentes e coeficientes, ou seja:

$$w = a \cdot Q^b \quad (8.14)$$

$$d = c \cdot Q^f \quad (8.15)$$

$$v = k \cdot Q^m \quad (8.16)$$

onde Q é a vazão líquida [m^3/s]; w é a largura (nesse caso adotou-se a largura da linha d'água no momento da medição de vazão) [m]; d é a profundidade média (profundidade em relação a cota de medição da vazão) [m]; v é a velocidade, determinada pela razão entre vazão líquida e área molhada da seção [m/s]; a , c , e k são coeficientes; e b , f e m são expoentes.

Em qualquer tempo e lugar estas variáveis estão inter-relacionadas pela equação de continuidade de massa.

$$Q = wdv = (ack) \cdot Q^{b+f+m} \quad (8.17)$$

Assim, automaticamente, obtêm-se que $b+f+m=1$ e $ack=1$. Os valores b , f e m representam a inclinação da reta, enquanto, as constantes a , c e k expressam a intersecção da reta com o valor unitário do débito, colocado nas ordenadas. Por esse motivo, os valores numéricos das constantes aritméticas a , c e k não são muito significativos para geometria hidráulica dos rios, enquanto os dos expoentes b , f e m são muito importantes. A descrição detalhada desta teoria e sua revisão podem ser encontradas em Grison & Kobiyama (2011).

8.2.6 - GEOMETRIA FRACTAL

A Geometria Fractal (GF) foi primeiramente proposta por Mandelbrot (1983) para descrever padrões de distribuição, estruturas significativamente complexas da natureza, ou seja, formas irregulares, fragmentadas, especialmente aquelas que possuem auto-similaridade e/ou auto afinidade. Analisando a estrutura fractal da rede de drenagem e divisores topográficos dentro de bacias hidrográficas, localizadas na Colômbia e Estados Unidos da América, Puente & Castillo (1996) comentaram que a geometria fractal de redes de drenagem tem recebido considerável atenção por diversos autores, por exemplo Tarboton *et al.* (1988), La Barbera & Rosso (1989), Marani *et al.* (1991), Liu (1992), Rodríguez-Iturbe *et al.* (1992) e Rinaldo *et al.* (1992). Os maiores desenvolvimentos, na elucidação de uma variedade de expressões que relatam as dimensões fractais de uma bacia hidrográfica foram embasadas nas clássicas leis geomorfológicas (Tabela 8.1) propostas por Horton (1945).

Neste contexto, o presente trabalho aborda as dimensões fractais de acordo com as expressões demonstradas na Tabela 8.2. Os parâmetros (df) e (Df) apresentados referem-se a dimensão fractal do canal e da bacia hidrográfica, respectivamente. Esta abordagem foi adotada com base em Schüller *et al.* (2001).

Tabela 8.2 - Equações empregadas para estimar a dimensão fractal, a partir das Leis de Horton.

Autores	Equações	
	df	Df
Feder (1998)	$df = 2 \frac{\ln R_L}{\ln R_B}$	
Rosso <i>et al.</i> (1991)	$df = \max\left(1, 2 \frac{\log R_L}{\log R_A}\right)$	
La Barbera & Rosso (1987 e 1989)		$Df = \max\left(\frac{\log R_B}{\log R_L}, 1\right)$
Tarboton <i>et al.</i> (1990)		$Df = df \frac{\log R_B}{\log R_L}$
La Barbera & Rosso (1990)		$Df = \left(\frac{1}{2 - df}\right) \frac{\log R_B}{\log R_L}$

Modificado de Schüller *et al.* (2001).

8.3 - MATERIAIS E MÉTODOS

8.3.1 - DADOS UTILIZADOS

No presente estudo foram analisadas informações morfológicas da bacia hidrográfica do rio Ijuí, através do modelo digital de elevação (MDE), com resolução de 90 m, base cartográfica vetorial do Rio Grande do Sul, na escala 1:50.000. Disponível em: www.ecologia.ufrgs.br; acesso em 15/07/2013.

Com o *software ArcGIS* para processamento dos dados, foram determinados os parâmetros de entrada R_B (taxa de bifurcação), R_A (taxa de área) e R_L (taxa de comprimento), apresentados na Tabela 8.1, com esse *software* também foi definida a ordem (i) de cada bacia pela classificação de Strahler. Os dados de P , Q e v foram extraídos das séries históricas de estações pluviométricas e fluviométricas, implantadas na bacia, operadas pela (CPRM) Serviço Geológico do Brasil e sob responsabilidade da (ANA) Agência Nacional de Águas, disponível em: www.hidroweb.ana.gov.br; acesso em 03/04/2014. Salienta-se que os dados de Q e v das bacias de Turcato e Taboão são oriundos de estações implantadas e operadas pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (CASTRO *et al.*, 2000).

Os dados de P utilizados foram das estações pluviométricas (Condor, Passo Faxinal, Conceição, Passo Viola, Boa Vista, Girua, Tupaciretã e Coimbra), localizadas dentro e no entorno da bacia do rio Ijuí. As precipitações (diárias) foram determinadas em virtude dos eventos analisados, ou seja, foram utilizados os dados que geraram os hidrogramas estudados neste trabalho. Em decorrência da dispersão das estações na bacia, definiram-se pesos para cada estação pluviométrica pelo método de Thiessen, tanto para os eventos unitários quanto para a precipitação média anual. Posteriormente determinou-se a precipitação efetiva de cada evento pelo método de *Soil Conservation Soil - SCS*, com base em Sartori *et al.* (2005). Em decorrência do uso e ocupação e do tipo de solo predominante na bacia do rio Ijuí, o valor do parâmetro CN é 87. O escoamento de base foi retirado dos hidrogramas observados utilizando a metodologia descrita em Carvalho & Chaudrhy (2001).

A Tabela 8.3 apresenta de forma resumida a data dos eventos analisados, bem como a precipitação total ocorrida na bacia, no respectivo período, e as vazões de picos de cada bacia hidrográfica. Já a Tabela 8.4 apresenta os valores de precipitações médias anuais utilizadas como parâmetro de entrada no modelo proposto. Salienta-se, que estes valores são oriundos das estações pluviométricas localizadas dentro e no entorno da bacia, sendo aplicada a metodologia de Thiessen para definir pesos em relação à contribuição da estação pluviométrica sob a geração de escoamento nas respectivas bacias em estudo.

Tabela 8.3 - Resumo dos eventos utilizados.

	Data dos eventos		Precipitação total no período	Ponte Mística	Santo Ângelo	Colônia Mousquer	Ponte Nova Conceição	Conceição	Ponte Nova Potiribu Jusante	Passo Faxinal	Taboão	Turcato
	Início	Fim	(mm)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)	Vazão de pico (m ³ /s)
Calibração	04/10/1979	20/10/1979	189,95	1747,30	1239,10	594,01	230,30	176,10	120,20	636,00	Sem dados	Sem dados
	04/07/1983	25/07/1983	194,76	2238,60	1434,60	790,09	281,70	203,40	210,10	561,93	Sem dados	Sem dados
	26/07/1987	22/08/1987	238,29	2463,60	1617,00	826,68	285,25	247,26	128,10	797,80	Sem dados	Sem dados
	20/09/1989	16/10/1989	139,43	1883,20	1362,90	810,25	390,56	267,56	171,80	605,96	Sem dados	Sem dados
	16/06/1991	10/07/1991	94,14	954,90	675,88	302,43	152,54	136,65	50,17	237,10	Sem dados	Sem dados
	13/11/1993	10/12/1993	167,37	1547,40	916,25	366,32	192,48	201,34	77,71	365,61	Sem dados	Sem dados
	16/11/2006	14/12/2006	117,54	117,54	429,20	103,11	51,30	32,70	34,44	190,12	Sem dados	Sem dados
Validação	17/07/2011	30/07/2011	166,52	Sem dados	970,65	377,00	168,34	184,76	57,04	595,71	13,96	6,43

Tabela 8.4 – Precipitação média anual.

Estação	Precipitação média anual (mm)
Ponte Mística	1725
Santo Ângelo	1742
Colônia Mousquer	1695
Conceição	1668
Ponte Nova Conceição	1668
Ponte Nova Potirubu Jusante	1695
Passo Faxinal	1831
Taboão	1659
Turcato	1659

8.3.2 - CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA DETERMINAÇÃO DE (V).

No presente trabalho determinou-se o valor de λ_{x_i} pela Equação (8.7) para cada bacia de estudo, tomando-se valores aleatórios com distribuição de probabilidade uniforme.

Os valores do vetor λ_{x_i} foram restritos ao domínio definido por v máximas e mínimas da série histórica de cada bacia, a partir de valores medidos diretamente em campo. Com o vetor de valores λ_{x_i} e as precipitações efetivas referentes a sete eventos registrados nas sete bacias, foram gerados os hidrogramas de saída de cada evento. Através da função intrínseca “*fmincon*”, disponível no *Toolbox* do *Matlab*, estimou-se o vetor λ_{x_i} que minimiza o erro, avaliado com o coeficiente de Nash & Sutcliffe. Com λ calibrado e com os comprimentos médios de cada canal \bar{L}_{x_i} , obteve-se para cada sub-bacia v_{x_i} associada ao canal de ordem (i). Finalmente, com os valores de v_{x_i} foi calculada a velocidade média no exutório de cada bacia de estudo, conforme a seguinte equação:

$$\bar{v}_j = \frac{\sum_{i=1}^{\omega} v_{x_i}}{\omega} \quad (j = \text{Santo Angelo, Ponte mistica, ...}) \quad (8.18)$$

onde ω representa a maior ordem do canal. Através de uma regressão multivariada foram ajustadas equações lineares e potenciais que relacionam a \bar{v}_j com parâmetros de geometria hidráulica, geometria fractal e precipitação média anual, visando a regionalização de \bar{v}_j que é um parâmetro de entrada para a geração do GIUH (equação 8.8).

Como parâmetros de entrada para determinação das referidas equações testou-se as diferentes expressões de GF apresentadas na Tabela 8.2, juntamente com Pma (Tabela 8.4) e os expoentes b e f (Tabela 8.5). Com a calibração e a inserção das expressões citadas, chegou-se a três modelos de GIUH, denominados de (a) GIUH-C calibrado em função de v ; (b) GIUH-L oriundo da função linear resultante da inserção da GH, GF e Pma e (c) GIUH-P oriundo da função potencial resultante da inserção das mesmas variáveis. A Figura 8.3 ilustra os procedimentos realizados para calibração e validação dos modelos propostos.

Cabe salientar que o modelo proposto se adequa para vazões $\geq Q_5$ da curva de frequência de vazões medidas em campo, para determinação deste ponto de corte $\geq Q_5$ foram utilizados dados de vazões observados em campo.

Tabela 8.5 - Valores dos expoentes b e f para estações fluviométricas

Estações fluviométricas	$\geq Q_5$	
	b	f
Ponte Mística	0,15	0,38
Santo Ângelo	0,30	0,25
Colônia Mousquer	0,22	0,33
Ponte Nova Conceição	0,12	0,31
Conceição	0,20	0,72
Ponte Nova Potiribu Jusante	0,40	0,30
Passo Faxinal	0,15	0,38

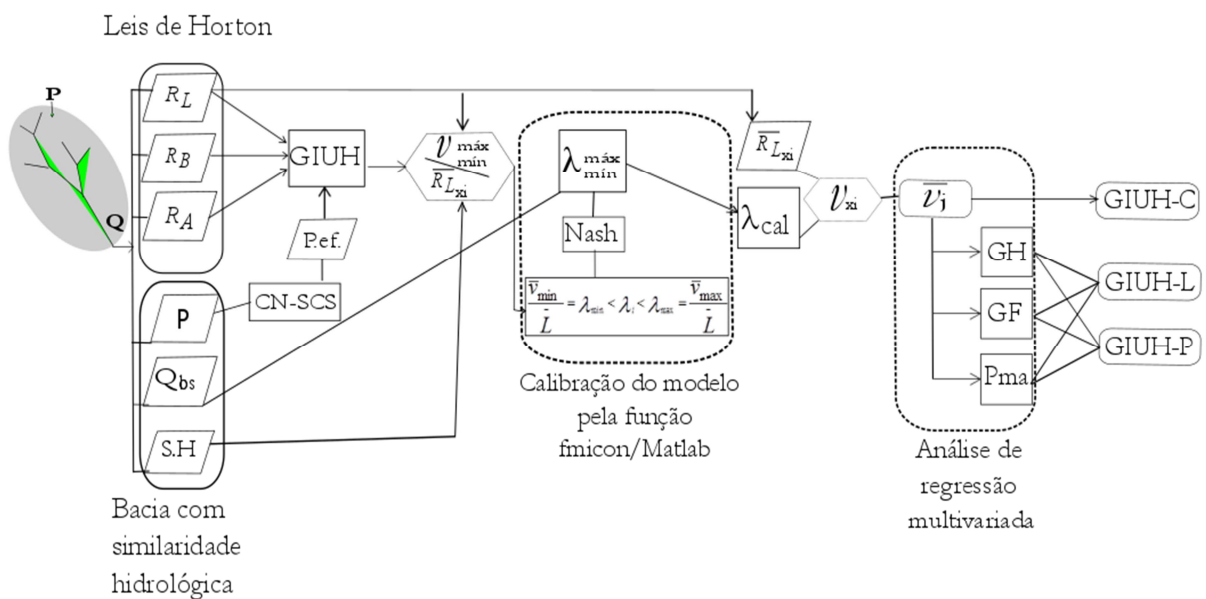


Figura 8.2 - Fluxograma de calibração e validação dos modelos GIUH-C, GIUH-L e GIUH-P.

8.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.4.1 - HIDROGRAMAS CALIBRADOS

Foram gerados 49 hidrogramas calibrados, referente a sete eventos ocorridos nas sete bacias em estudo. Com o intuito de demonstrar a eficiência da calibração, apresenta-se na Figura 8.4, através do gráfico *box-plot*, o erro relativo dos picos de vazão dos hidrogramas calibrados em relação aos observados. Quando se analisa somente os valores superestimados o modelo obteve um erro relativo médio de 0,429 e quando se faz a análise para os valores subestimados o erro relativo médio é de -0,353. Constata-se na Figura 8.4 que somente duas estações não apresentaram valores em *outliers* (Ponte Mística e Colônia Mousquer), sendo estes valores, oriundos do evento ocorrido de 16/11/2006 a 14/12/2006; quando se retira este evento o modelo superestima os valores observados em 0,288; melhorando o desempenho do mesmo. Também se observa que as bacias de Conceição e Ponte Nova Potiribu Jusante foram as que apresentaram maiores erros relativo (2,419 e 1,452), respectivamente, apresentando, conseqüentemente, erros relativos médios de 0,741 e 0,711, respectivamente. Quando se retira os valores de *outliers* nestas bacias o erro médio cai para 0,462 e 0,464, respectivamente. Isto comprova que a calibração proposta apresenta bom desempenho, pois na média os valores calibrados apresentam-se condizentes com os valores observados.

A calibração dos hidrogramas foi realizada em função do vetor de valores λ_{x_i} e das precipitações efetivas de cada evento. Para definição das precipitações efetivas foi utilizado o método CN-SCS, no qual, observou-se que a geração dos hidrogramas eram extremamente sensíveis ao valor estimado. No presente trabalho, o valor CN foi generalizado para todos os eventos não sendo levada em consideração a umidade antecedente. Esta sensibilidade do valor de CN e a não consideração da umidade antecedente pode explicar os valores *outliers* encontrados na calibração. Assim sendo, pode-se dizer que a adoção do único valor de CN sem consideração da umidade antecedente é um fator limitante na calibração.

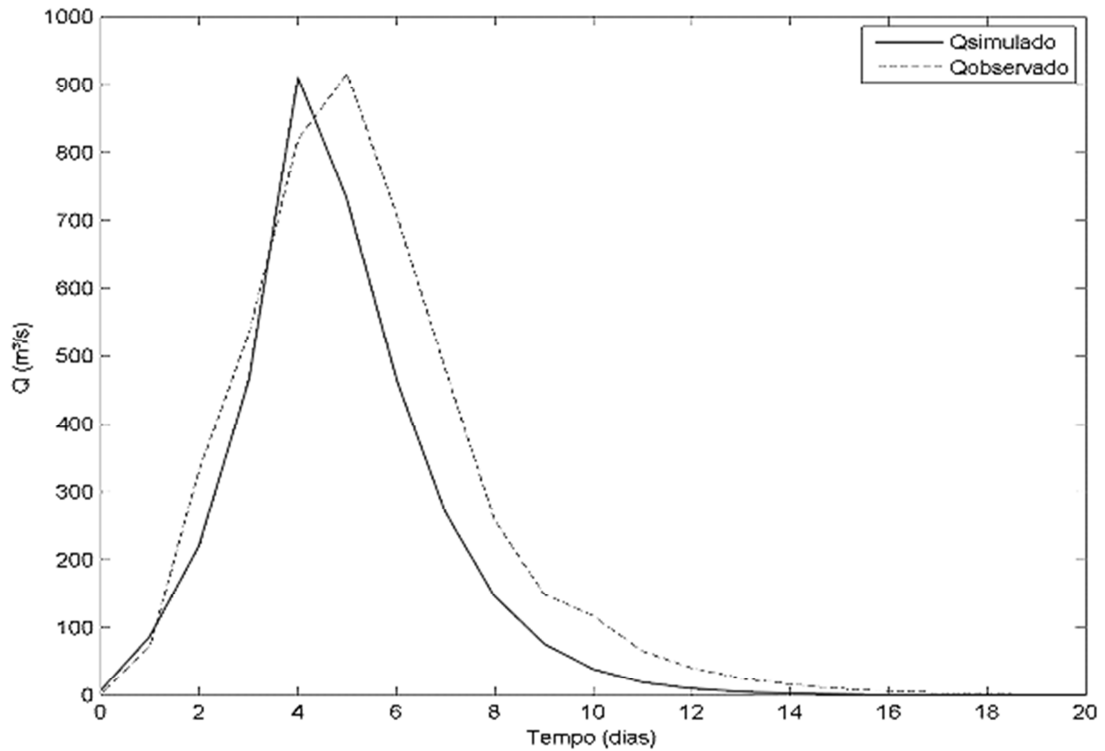


Figura 8.3 - - Modelo calibrado e observado na bacia hidrográfica Santo Ângelo, no período de 13/11 a 12/12/1993.

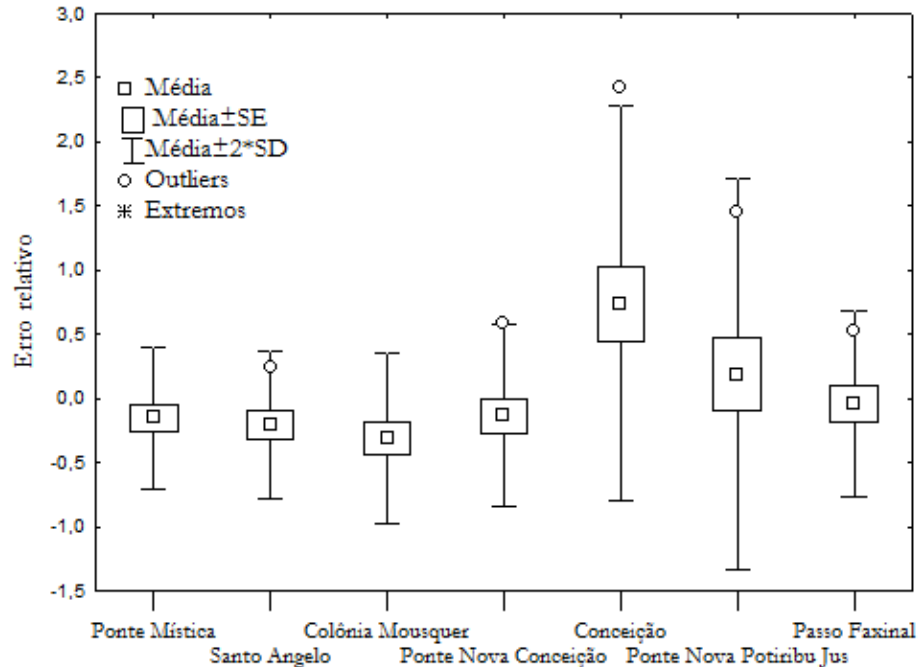


Figura 8.4 - Avaliação da eficiência dos hidrogramas calibrados em relação aos hidrogramas observados.

Em relação ao tempo de pico entre os valores calibrados e observados, a Figura 8.5 demonstra o quanto os hidrogramas calibrados foram anteriores ou posteriores, em média, aos picos observados. Constata-se que na maioria dos casos os picos foram antecedentes aos

observados, dos 49 hidrogramas calibrados, 27 hidrogramas antecederam o tempo de pico, seis hidrogramas foram posteriores ao tempo de pico e 16 hidrogramas tiveram o tempo de pico no mesmo dia que o observado.

A bacia de Ponte Mística foi a que obteve maior incidência de erros, dos sete hidrogramas calibrados, seis tiveram seu tempo de pico antecipados, variando de um a três dias, e somente um hidrograma calibrado teve o tempo de pico no mesmo dia do observado. Já a bacia de Conceição obteve os melhores resultados, sendo que dos sete hidrogramas calibrados, cinco hidrogramas tiveram o tempo de pico no mesmo dia do observado e dois hidrogramas precederam o pico observado em um dia.

Do ponto de vista hidrológico para previsão de ondas de cheias, a antecipação do tempo de pico é preferencial, pois com sua antecedência em relação ao observado pode-se acionar um sistema de alerta, no qual, auxiliaria na prevenção e tomada de decisão.

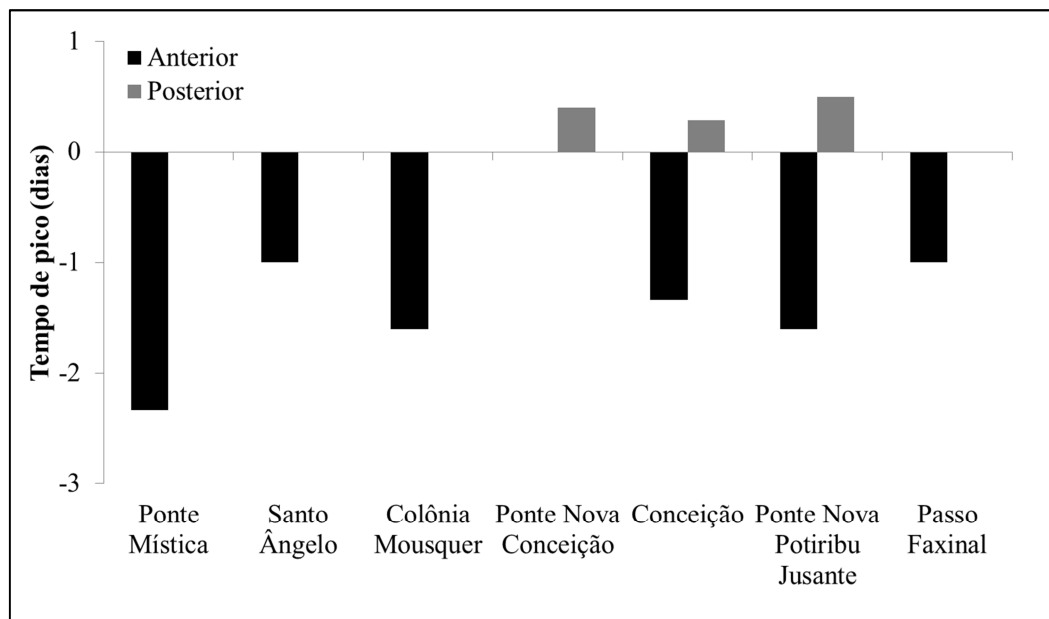


Figura 8.5 - Erro do tempo de pico dos valores simulados.

8.4.2 - HIDROGRAMAS VALIDADOS

Beven *et al.* (1988) colocaram que o problema da relação entre a escala da bacia hidrográfica e sua linearidade de resposta exige muito mais pesquisa, de uma forma que se deve ter em conta a relação entre a morfologia e os processos hidrológicos da bacia. Com o intuito de contribuir para a colocação desses autores, o presente trabalho apresenta os parâmetros de GH (Tabela 8.5), juntamente com os valores de GF (Tabela 8.6) e Pma (Tabela

8.4) para determinar \bar{v}_j , através de uma regressão multivariada. Com \bar{v}_j das sub-bacias inseridas a bacia hidrográfica do rio Ijuí (Figura 4.1), pretende-se estimar vazões em locais com poucos dados, ou até mesmo sem dados, utilizando a metodologia do GIUH.

São apresentados na Tabela 8.6 os valores de GF das sete sub-bacias, estimadas por diferentes métodos, na qual, pode-se observar que os resultados encontrados se assemelham aos valores apresentados por Mandelbrot (1983), em que os padrões fractais dos canais (df) são em torno de 1,1 e os padrões fractais da rede de drenagem (Df) são próximos a 2,0. Isso confirma que esta metodologia se adequa para prever as dimensões geomorfológicas de uma bacia hidrográfica.

Com os valores de GF, GH e Pma, utilizando v como variável dependente, realizou-se a análise de regressão multivariada, sendo as funções testadas na forma linear e potencial. Na referida análise os parâmetros independentes, GH (Tabela 8.5) e Pma (Tabela 8.4) são constantes para cada bacia analisada e a GF (Tabela 8.6) variável de acordo com a equação proposta.

Tabela 8.6 - Valores das dimensões fractais estimados por diferentes métodos.

Bacia	Feder (1998)	Rosso <i>et al.</i> (1991)	df	La Barbera & Rosso (1987)	Tarboton <i>et al.</i> (1990)	La Barbera & Rosso (1990)	Df
	df	df	Média	Df	Df	Df	Média
Ponte Mística	1,26	1,19	1,23	1,59	1,89	1,96	1,81
Santo Ângelo	1,29	1,20	1,25	1,55	1,86	1,94	1,78
Colônia Mousquer	1,47	1,33	1,40	1,36	1,80	2,01	1,72
Ponte Nova Conceição	1,27	1,19	1,23	1,57	1,87	1,93	1,79
Conceição	1,14	1,07	1,11	1,75	1,87	1,88	1,83
Ponte Nova Potiribu Jusante	1,35	1,24	1,30	1,48	1,84	1,96	1,76
Passo Faxinal	1,19	1,11	1,15	1,69	1,87	1,90	1,82
Média	1,28	1,19	1,24	1,57	1,86	1,97	1,79

Quando se considera Df juntamente com Pma para prever valores de v obtém-se valores de R^2 de 0,25. Os valores da GH quando avaliados juntamente com Pma para estimar valores de v obteve-se R^2 de 0,19. Com isso, conclui-se que a GF e GH quando abordadas

separadamente não se adequaram para prever vazões unitárias. No entanto, quando se avaliou o desempenho da Df , proposta por La Barbera & Rosso (1990), juntamente com a GH e Pma, através da regressão multivariada obteve-se R^2 de 0,57 para a função linear e 0,75 para a função potencial, conforme é demonstrado na Tabela 8.7.

Tabela 8.7 - Valores de R^2 das dimensões df e Df testadas.

Método		Para vazões $\geq Q_5$	
		Linear	Potência
Feder (1998)	df	0,46	0,70
Rosso <i>et al</i> (1991)	df	0,44	0,49
La Barbera & Rosso (1987 e 1989)	Df	0,56	0,70
Tarboton <i>et al.</i> (1990)	Df	0,44	0,48
La Barbera & Rosso (1990)	Df	0,57	0,75

A partir dos valores de R^2 apresentados na Tabela 8.7 definiram-se as equações linear e potencial (Equação 8.19 e 8.20) da variável dependente v regionalizada.

$$v = -25,263 + 8,006 \cdot Df + 0,006 \cdot P - 1,684 \cdot b + 0,541 \cdot f \quad (8.19)$$

$$v = e^{-102,119} \cdot Df^{17,813} \cdot P^{12,043} \cdot b^{-0,274} \cdot f^{-0,205} \quad (8.20)$$

Com as equações de determinação do GIUH a partir de v regionalizada, denomina-se de agora em diante os valores de Q oriundos da equação 8.19 e 8.20 de GIUH-L e GIUH-P, respectivamente, e os valores de Q oriundos de v calibrados denomina-se de GIUH-C.

Para validar os modelos apresentados, os picos de vazões calculados (Figura 8.6) e os tempos de pico (Figura 8.7) dos hidrogramas gerados GIUH-L, GIUH-P e GIUH-C foram comparados com os picos de vazões dos hidrogramas observados. Para tal, foi utilizado o evento ocorrido de 17 a 30/07/2011, incluindo agora as sub-bacias Turcato e Taboão e excluía a bacia Ponte Mística, por esta ter sido desativada em período anterior. Na Figura 8.6 é apresentada de forma esquemática a percentagem de erros entre os valores observados e os calculados, ou seja, quanto mais próximo a zero forem os valores dos erros calculados, melhor o modelo (Linear, Potencial ou Calibrado) consegue estimar as vazões de pico nas respectivas bacias.

Observa-se que nas bacias de Passo Faxinal, Ponte Nova Conceição, Ponte Nova Potiribu Jusante e Turcato os modelos propostos superestimaram os valores observados, chegando a até 542 e 491%, para a forma linear e potencial, respectivamente, para a estação de Ponte Nova Potiribu Jusante. Este erro extremamente alto para a bacia de Ponte Nova Potiribu Jusante pode ser em virtude de alguns fatos ocorridos em campo. Analisando as fichas de inspeção da respectiva bacia, observou-se que em alguns casos as medições de vazões não eram medidas sempre na mesma seção de medição, o que pode ocasionar erros na análise da GH, que é em virtude do formato do canal da seção.

Porém, quando se retira essa estação da análise os valores ficam na média de 110 e 101%, para a forma linear e potencial, respectivamente, acima do valor de pico observado. Já para as estações de Santo Ângelo, Colônia Mousquer, Conceição e Taboão os modelos, tanto na forma linear quanto potencial, subestimaram os valores observados em 33 e 35%, em média para a forma linear e potencial, respectivamente.

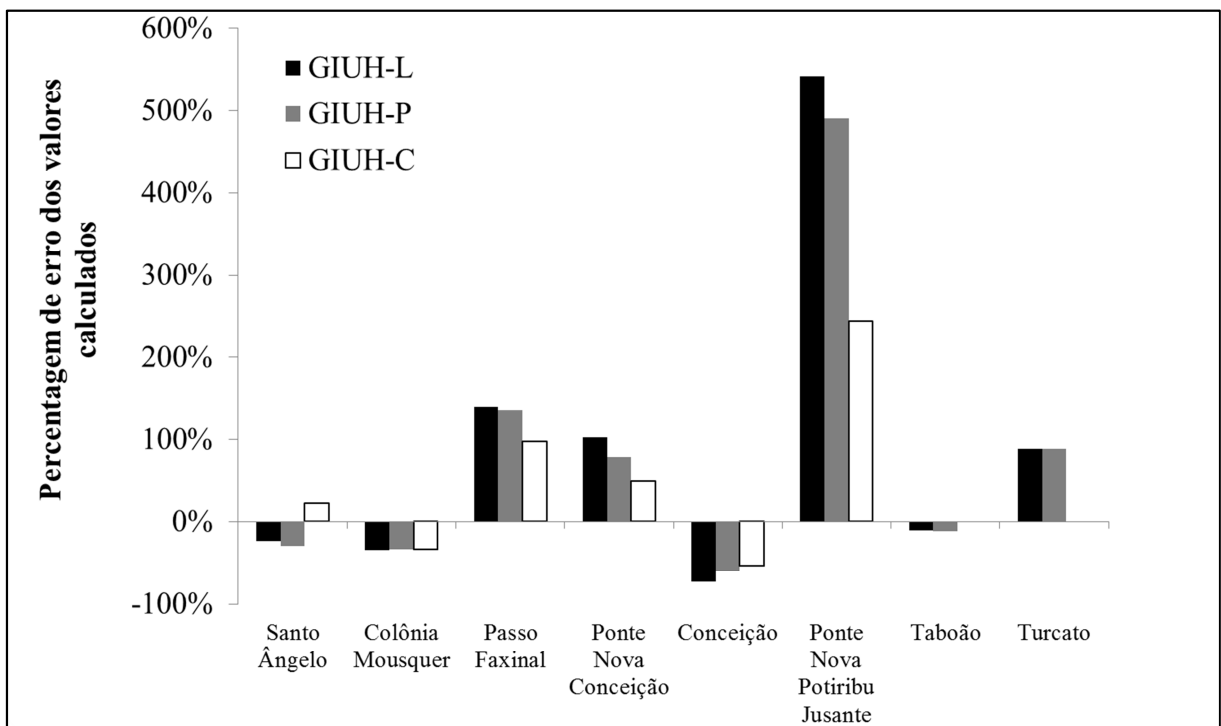


Figura 8.6 - Percentagem de erros dos valores calculados em relação aos valores de pico observados.

Na Figura 8.7, observa-se que os picos de vazões na estação de Ponte Nova Potiribu Jusante anteciparam o pico observado em dois dias. As estações de Santo Ângelo, Colônia Mousquer e Passo Faxinal os picos foram antecipados em um dia, tanto para a forma linear

quanto para a forma potencial. Já as estações de Ponte Nova Conceição, Taboão e Turcato os tempos de picos simulados coincidiram com os tempos de pico observados. A estação de Conceição teve seu tempo de pico posterior ao tempo de pico observado para a forma linear, conforme Figura 8.7.

Discutindo este resultado em um âmbito de gerenciamento de recursos hídricos para a previsão de enchentes pode-se dizer que os resultados se demonstraram satisfatórios, pois é melhor que o modelo antecipe os picos de vazões do que postergue os mesmos.

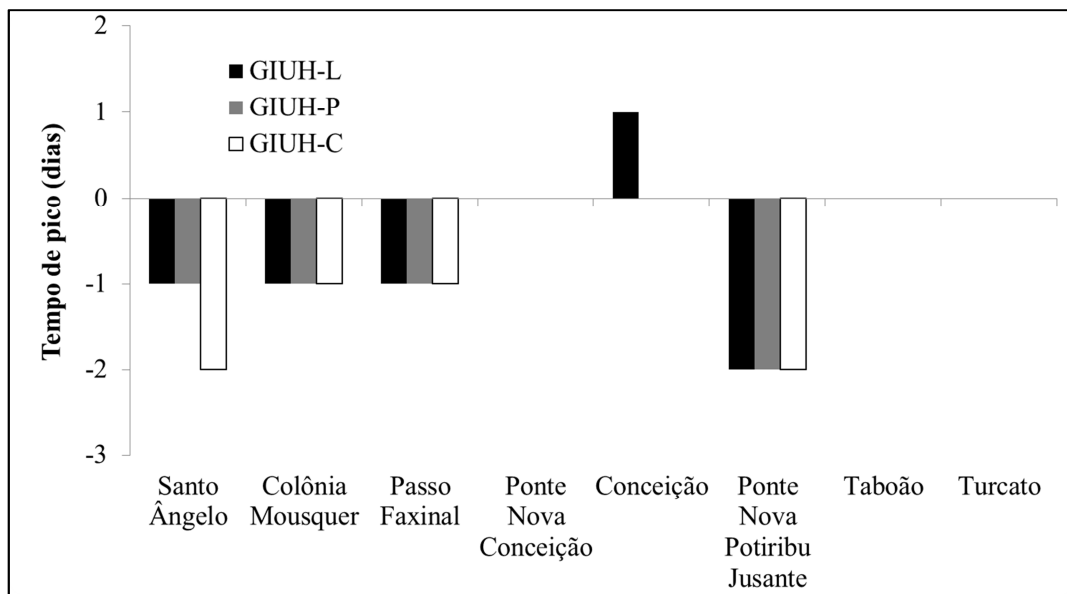


Figura 8.7 - Tempo de picos dos modelos propostos.

Para dar uma melhor visualização dos modelos propostos e o seu comportamento em relação aos hidrogramas observados a Figura 8.8 demonstra os resultados para os modelos propostos comparando-os com os valores observados na estação de Santo Ângelo, no evento ocorrido de 17 a 30/07/2011.

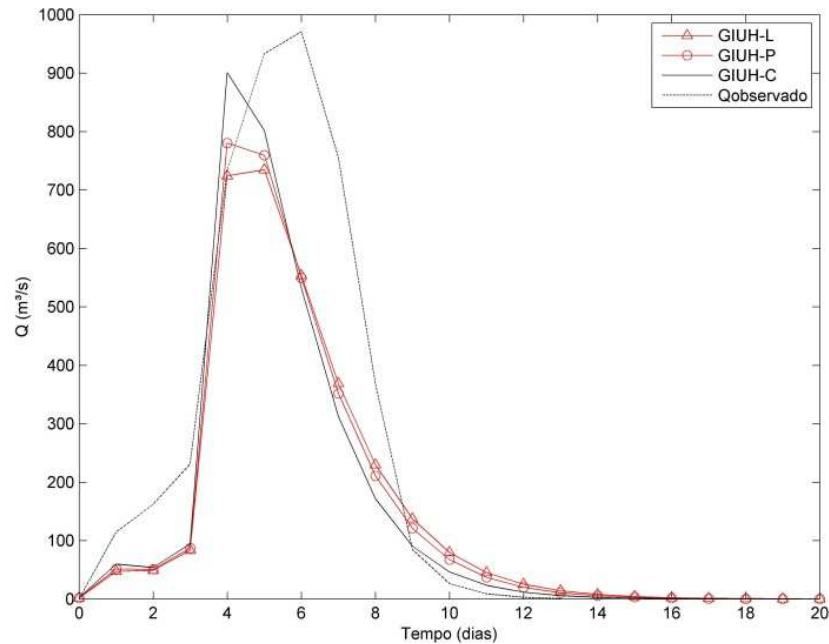


Figura 8.8 - Hidrogramas observado, calibrado, linear e potencial.

Apesar dos modelos propostos apresentarem valores muito acima dos observados, em especial para a estação de Ponte Nova Potiribu Jusante, pode-se concluir que esta metodologia apresenta valores satisfatórios para prever vazões ($\geq Q_5$) em eventos unitários em bacias com poucos dados ou até mesmo sem dados. Pois analisando os resultados sem levar em consideração a estação de Ponte Nova Potiribu Jusante os valores encontrados se demonstram aceitáveis.

Além de ter-se obtido resultados aceitáveis, os modelos propostos apresentam a vantagem de seus parâmetros de entrada ser de fácil obtenção. Sabendo-se a GH da bacia em análise, ou de bacias vizinhas a esta, pode-se inferir estes parâmetros à bacia. No caso da GF, seus valores podem ser facilmente determinados a partir do MDE utilizando *softwares* de geoprocessamento, não precisando estes dados ser coletados em campo, o que facilita muito a utilização deste parâmetro para prever vazões. A Pma é um parâmetro facilmente adquirido, pois o monitoramento pluviométrico é de fácil realização e existe uma gama de estações em operação com uma série histórica considerável.

8.5 - CONCLUSÕES

A determinação da relação $P - Q$ de uma bacia hidrográfica é um elemento importante no monitoramento e gestão dos recursos hídricos. Por ser um fenômeno complexo que envolve a interação de parâmetros físicos, necessita-se o conhecimento de algumas variáveis envolvidas neste processo, para se obter uma modelagem fidedigna deste fenômeno. Nesse

sentido, o GIUH tem o intuito de prever vazões unitárias, utilizando relações geomorfológicas da bacia e condições hidráulicas de movimento da gota d'água ao longo do canal para determinar a relação $P - Q$.

O GIUH é uma metodologia consolidada no meio científico, porém o presente trabalho se diferencia por determinar \bar{v}_j a partir de λ calibrado e dos comprimentos médios de cada canal \bar{L}_{x_i} . Os HU gerados a partir desta calibração apresentaram valores satisfatórios, com exceção do evento ocorrido na bacia de Conceição e Ponte Nova Potiribu Jusante de 16/11/2006 a 14/12/2006, demonstrando-se ser uma metodologia adequada para inferir vazões.

Após calibrado o modelo, através de uma regressão multivariada foram ajustadas equações lineares e potenciais que relacionam \bar{v}_j com parâmetros de GH, GF e Pma, visando regionalizar \bar{v}_j que é um parâmetro de entrada para a geração do GIUH. Esses parâmetros GH, GF e Pma são metodologias também já conhecidas no meio científico, no entanto, as mesmas não foram utilizadas em conjunto com o intuito de prever vazões. Os modelos GIUH-L e GIUH-P apresentaram resultados satisfatórios, com exceção da bacia de Ponte Nova Potiribu Jusante, fato que, provavelmente, foi em decorrência dos dados coletados em campo. No entanto, o respectivo modelo apresenta subsídios para estimar vazões em locais com poucos dados ou até mesmo sem dados, que é o princípio da regionalização.

Limitações dos modelos GIUH-L e GIUH-P:

a) Salienta-se que para elaboração do presente trabalho foram utilizados eventos com vazões $\geq Q_5$. Para analisar o comportamento dos modelos propostos em vazões médias. Recomenda-se que para futuras pesquisas sejam utilizados hidrogramas observados com vazões de pico em torno da Q_{50} .

b) A determinação da precipitação efetiva, que é um parâmetro de entrada do GIUH, foi pelo método CN-SCS. No presente estudo pode-se observar que este parâmetro é extremamente sensível na geração de vazões, assim sendo recomenda-se a inserção de uma metodologia mais fidedigna com a realidade das bacias brasileiras para inferir precipitação efetiva.

c) Os erros relativos dos modelos GIUH-L e GIUH-P para as bacias de Taboão foram de - 0,10 e -0,11, respectivamente, e para a estação de e Turcato 0,88 tanto para a forma linear e potencial. Mesmo sendo 0,88 um valor alto para inferir vazões, salienta-se que estas bacias não entraram nos eventos de calibração do modelo, em virtude da não existência de dados observados nos períodos dos eventos escolhidos, o que pode ter afetado a extrapolação para

pequenas bacias. Salienta-se, portanto, a necessidade da continuidade do monitoramento, principalmente em pequenas bacias. Pois em pequenas bacias as inter-relações de $P-Q$ não seguem uma linearidade, dificultando a extrapolação por parte dos modelos hidrológicos. Porém, com o monitoramento contínuo e a inserção da GH e GF para determinar vazões, esta lacuna poderá ser preenchida.

8.6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGIRRE, U.; GONI, M.; LOPEZ, J. J.; GIMENA, F. N. Application of a Unit Hydrograph based on sub catchment division and comparison with Nash Instantaneous Unit Hydrograph. **Catena**, v.64, p. 321–332, 2005.
- AL-WAGDANY, A. S.; RAO, A. R. Estimations of the Velocity Parameter of the geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph. **Water Resources Management**, v. 11, p.1-16, 1997
- AMORIM, E. L. C. de; NETTO, A. P. de O.; MEDIONDO, E. M. Estudo de métodos para regionalização de vazão. In. **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa, p. 641-641, 2005.
- BEVEN, K. J.; WOOD, E.F.; SIVAPALAN, M. On hydrological heterogeneity – catchment morphology and catchment response. **Journal of Hydrology**, v. 100, p. 353-375, 1988.
- BHADRA, A.; PANIGRAHY, N.; SINGH, R.; RAGHUWANSHI, N. S.; MAL, B. C.; TRIPATHI, M. P. Development of a geomorphological instantaneous unit hydrograph model for scantily gauged watersheds. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 1013-1025, 2008.
- BHASKAR, N. R; PARIDA, B. P, NAYAK A. K. Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. **Journal Water Resources Planning and Management**, v. 123, n.4, p. 228–238, 1997.
- CARVALHO, M. A. de; CHAUDRHY, F. H. Aplicação de Hidrograma Unitário Geomorfológico na Previsão de Respostas Hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.6, n.4, p. 5-17, 2001.
- CASTRO, N. M. R.; CHEVALLIER, P.; GOLDENFUM, J.A. **Projeto Potiribu-Atualização 1989-1998. Dados básicos de Fluviometria e Pluviometria**. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 2000. (Recursos Hídricos volume 35)
- CHOW, V.T. **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1964.
- CUDENNEC, C., FOUAD, Y., SUMARJO I., DUCHESNE, J. A geomorphological explanation of the Unit Hydrograph concept. **Hydrological Processes**, v. 18. p. 603–621, 2004.
- FEDER, J. **Fractal**. New York: Plenum Press, 1988.

- FRANCHINI, M.; O'CONNEL, P. E. An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. **Journal of Hydrology**, v.175, p. 407-428, 1996.
- GHUMMAN, A. R.; AHMADA, M. M.; HASHMI, N. H.; KAMAL, M. A. Development of geomorphologic instantaneous unit hydrograph for a large watershed. **Environmental Monitoring Assess**, v. 184, p. 3153–3163, 2012.
- GUPTA, V. K, WAYMIRE, E, WANG, C. T. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. **Water Resources Research**, v.16 n.5, p.863–870, 1980.
- GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Teoria e aplicação da geometria hidráulica: Revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, 2011.
- HALL, M. J.; ZAKI, A. F.; SHALIN, M. M. A. Regional analysis using the Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 93–102, 2001.
- HRACHOWITZ, M.; SAVENIJE, H. H. G.; BLÖSCHL, G.; MCDONNELL, J. J.; SIVAPALAN, M.; POMEROY, J.W.; ARHEIMER, B.; BLUME, T.; CLARCK, M. P.; EHRET, U.; FENICIA, F.; FREER, J. E.; GELFAN, A.; GUPTA, H. V.; HUGHES, D. A.; HUT, R. W.; MONTANARI, A.; PANDE, S.; TETZLAFF, D.; TROCH, P. A.; UHLENBROOK, S.; WAGENER, T.; WINSEMIUS, H. C.; WOODS, R. A.; ZEHE, E.; CUDENNEC, C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 6, 60p. 2014.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol Soe. Am. Bull.**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.
- KHALEGHI, M. R.; GHODUSI, J.; AHMADI, H. Regional Analysis Using the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) Method. **Soil & Water Research**, v. 9, p. 25-30, 2014.
- KUMAR, A. Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Based Hydrologic Response Models for Ungauged Hilly Watersheds in India. **Water Resources Management**, 21p. 2014.
- KUMAR, R.; CHATERRJEE, C.; SINGH, R. D.; LOHANI, A. K.; KUMAR, S. GIUH based Clark and Nash models for runoff estimation for an ungauged basin and their uncertainty analysis. **International Journal of River Management**, v. 2, n. 4, p. 281–290, 2004.
- LA BARBERA, P.; ROSSO, R. On the fractal dimensions of stream networks. **Water Resources Research**, v. 25, n. 4: p. 735-741, 1989.
- LA BARBERA, P.; ROSSO, R. “Reply.” **Water Resources Research**. v. 26, n. 9, p. 2245-2248. 1990.

- LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. **The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications**. United States Geological Survey, Prof. Paper, n. 252, 56p, 1953.
- LIU, T. Fractal structure and properties of stream networks. **Water Resources Research**, v. 28, n. 11, p. 2981-2988, 1992.
- MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 468p, 1983.
- MARANI, A.; RIGON, R. RINALDO, A. A note on fractal channel networks. **Water Resources Research**. v. 27, n. 12, p. 3041-3049, 1991.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.
- NOURANI, V.; SINGH, V. P.; DELAFROUZ, H. Three geomorphological rainfall-runoff models based on the linear reservoir concept. **Catena**, v. 76, p. 206–214, 2009.
- NOVAES, L. F. de; PRUSKI, F. F.; QUEIROZ, D. O. de; RODRIGUEZ, R. del G. R.; SILVA, D. D. da; RAMOS, M. R. Avaliação do Desempenho de Cinco Metodologias de Regionalização de Vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 12, n. 2, p. 51- 61, 2007.
- PEREIRA, M. A. F.; KOBIYAMA, M.; CASTRO, N. M. R. Relação entre a Geometria Hidráulica e a Curva de Permanência em estações fluviométricas da bacia do rio Ijuí – RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 3, 2014.
- PILGRIM, P. H. Isochrones of travel time and distribution of flood storage from a tracer study on a small watershed, **Water Resources Research**. v.15, p. 1409–1420, 1977.
- PUENTE, C. E.; CASTILHO, P. A. On the fractal structure of networks and dividers within a watershed. **Journal of Hydrology**, v. 187, p. 173-181, 1996.
- RINALDO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; RIGON, R.; BRAS, R.L.; LJASZ-VASQUEZ, E.; MARANI, A. Minimum energy and fractal structures of drainage networks. **Water Resources Research**, v. 28, n. 9, p. 2183-2195, 1992.
- RODRIGUEZ -ITURBE, I.; VALDÉS, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 15, n.6, 12p., 1979.
- RODRIGUEZ -ITURBE, I., DEROTO, G.; VALDÉS, J. B. Discharge response analysis and hydrologic similarity: the interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics. **Water Resources Research**. v. 15, n. 6, p.1435-1444, 1979a.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I., IJASZ-VASQUEZ, E., BRAS, R.L. TARBOTON, D.G. Power law distributions of discharge mass and energy in river basins. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1089-1093, 1992.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I.; RINALDO, A. **Fractal River Basins – Change and Self-Organization**. Cambridge University Press. 547p. 1997.

- ROSSO, R.; BACCHI, B.; LA BARBERA, P. Fractal Relation of Mainstream Length to Catchment Area in River Networks. **Water Resources Research**. v. 27, n.3, p. 381-387. 1991.
- SHERMAN, L. K. Stream flow from rainfall by the unit- graph method. *Engin. News-Rec.* v.108, p. 501-505, 1932.
- SAHOO, B., CHANDRANATH, C., NARENDRA, S. SINGH, R. Flood estimation by GIUH-based Clark and Nash models. **Journal of Hydrologic Engineering ASCE**, 11(6), p. 515–525, 2006.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. 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, n. 4, p. 05-18, 2005.
- SCHÜLLER, D. J.; RAO, A. R.; JEONG, G. D. Fractal characteristics of dense stream networks. **Journal of hydrology**, v. 243, p. 1-16, 2001.
- STEFFEN, J. L.; ANDRADE, A. C. de S.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S. de; RODRIGUES, D. B. B. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico Aplicado a Bacias Desprovidas de Dados Hidrológicos. São Paulo, UNESP, **Revista Geociências**, v. 28, n. 3, p. 247-254, 2009.
- TARBOTON, D.G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. The fractal nature of river networks. **Water Resources Research**, v. 24 n. 8, p. 1317-1322, 1988.
- TARBOTON, D.G.; BRAS, R.L. RODRIGUEZ-ITURBE, I. Comment on ‘On the Fractal Dimension of Stream Networks. **Water Resources Research**, v. 26, n. 9, p. 2243-2244, 1990.
- VILLELA, M. C. de C. **Análise do Hidrograma Unitário Geomorfológico e Regionalização do parâmetro de velocidade**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. 92p., 2001.
- WAGDANY, A.S.; RAO, A. R. Estimation of the velocity parameter of the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph. **Water Resources Management**. v.11, p. 1-16, 1997.

9 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para alcançar o objetivo deste trabalho, regionalizar vazões máximas a partir do hidrograma unitário instantâneo geomorfológico em bacias embutidas, com inserção da geometria hidráulica e geometria fractal, foi necessário à determinação de algumas variáveis envolvidas. Sendo elas a precipitação média anual, a geometria hidráulica das seções de medições na foz de cada bacia analisada e a geometria fractal dos canais e da bacia hidrográfica.

Para se determinar a precipitação média anual (capítulo 5), utilizada como parâmetro de entrada do GIUH, foi determinada a homogeneidade pluviométrica, diária, na bacia do rio Ijuí. Com este concluiu-se que as precipitações ocorridas apresentam homogeneidade ao longo da bacia. Sabendo isto, pode-se inserir esta variável como parâmetro de entrada no modelo de regionalização.

Para determinação da geometria hidráulica das seções de medições, localizadas na foz das nove sub-bacias inseridas na bacia do rio Ijuí, foram realizados dois artigos que serviram como base para elaboração dos capítulos seis e sete. No qual, o capítulo seis aborda a bacias do Turcato e Taboão e o capítulo sete aborda as outras bacias, sendo que, nos dois trabalhos foi correlacionado o comportamento dos expoentes b , f e m em diferentes vazões (Q_5 , Q_{50} e Q_{95}). O capítulo seis abordou as bacias do Turcato e Taboão (20 e 77 km², respectivamente), sendo evidenciado que a variável d sofre maior influência sobre as oscilações de Q , seguidos por w e v , com maior ênfase na menor bacia. No capítulo 7, que abordou as outras bacias, com área variando de 609 a 9.450 km², concluiu-se que a variável v tem maior correlação com Q , seguido por d e por último w . Com isto, pode-se concluir que a dinâmica do comportamento das variáveis b , f e m são dependentes da escala que a bacia em estudo esta inserida. Estas constatações vão ao encontro do que é colocado na literatura hidrogeomorfológica, em pequenas escalas espaciais os processos hidrológicos são mais dependentes das encostas, e com o aumento da escala estes passam a ser mais influenciados pela rede de drenagem.

A determinação da geometria fractal dos canais e da rede de drenagem das sub-bacias da bacia do rio Ijuí foi definida a partir das leis de Horton. Sendo os valores encontrados condizentes com os valores demonstrados na literatura, portanto, estes valores puderam ser utilizados como dados de entrada para o GIUH.

Com os valores de geometria fractal, juntamente com os valores de geometria hidráulica e precipitação média anual, foi elaborado o artigo “Regionalização com geometria hidráulica e fractal: Estudo de caso com Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (GIUH)”;

este artigo é apresentado no capítulo oito. A utilização do GIUH se deu em duas etapas, a primeira foi através da calibração do parâmetro λ , utilizando os valores máximos e mínimos de v da série histórica de cada bacia e o comprimento médio de cada canal de ordem (i). Na segunda etapa, através de uma regressão multivariada, foram ajustadas equações lineares e potenciais que relacionam a \bar{v}_j com parâmetros de geometria hidráulica, geometria fractal e precipitação média anual, visando a regionalização de \bar{v}_j que é um parâmetro de entrada para a geração do GIUH.

A aplicação deste modelo foi realizada em nove sub-bacias embutidas, inseridas na bacia hidrográfica do rio Ijuí, com área variando de 22 a 9.450 km². O modelo apresentou resultados satisfatórios quando comparados com os picos de cheia dos respectivos hidrogramas observados, com exceção da bacia de Ponte Nova Potiribu Jusante. Com isso pode-se concluir que o método proposto pelo presente estudo se adequa para prever vazões máximas.

Além disto, com a aplicação da geometria fractal no presente estudo, aborda-se a questão de similaridade dos parâmetros desde a escala da encosta até a escala da bacia hidrográfica. Com a aplicação da geometria hidráulica aborda-se o equilíbrio resultante de vazões impostas e as condições hidrogeomorfológicas ocorridas na bacia no decorrer do tempo e do espaço. Com a aplicação destas duas metodologias colabora-se para o entendimento dos fenômenos existentes no processo de transformação de Precipitação (P) em Vazão (Q).

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se para o futuro trabalho os seguintes itens: (a) a aplicação deste modelo em outras bacias hidrográficas brasileiras com o intuito de prever vazões máximas; (b) a aplicação deste modelo para prever vazões médias; (c) inserção de uma metodologia para inferir a umidade do solo mais condizente com o solo da bacia em estudo; e (d) a elaboração de outros trabalhos que abordem a geometria hidráulica e geometria fractal em bacias brasileiras.