



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO DO BOM
JARDIM A PARTIR DE MODELOS DE EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE
SEDIMENTOS**

DIEGO REPEZA AMARAL

UBERLÂNDIA
DEZEMBRO 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO DO BOM
JARDIM A PARTIR DE MODELOS DE EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE
SEDIMENTOS**

DIEGO REPEZA AMARAL

PROF. DR. JOSÉ EDUARDO ALAMY FILHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

UBERLÂNDIA

DEZEMBRO 2018

Resumo

O ribeirão do Bom Jardim, localizado nas proximidades da cidade de Uberlândia é um curso d'água com bastante relevância na região do Triângulo Mineiro por conta das numerosas atividades que dele dependem, principalmente pela formação de um reservatório artificial utilizado para abastecimento de água de Uberlândia, município mais populoso dessa Mesorregião. Os estudos preventivos realizados para manutenção da funcionalidade operacional do ribeirão e de sua bacia são importantes, visto que um problema que ocorre nos reservatórios em geral é o assoreamento, fenômeno que pode causar redução do volume útil. Com o objetivo de estudo do fenômeno, este trabalho buscou avaliar modelos empíricos de assoreamento de reservatórios e técnicas estatísticas para regionalização de vazões afluentes, com o fim de levantar parâmetros quantitativos tanto sobre a vazão quanto sobre os sedimentos depositados. Para confeccionar tais estudos, foram utilizadas ferramentas computacionais como o Google Earth, Microsoft Excel, além de dados históricos de precipitação e de vazão, disponíveis no sistema Hidroweb, na página eletrônica da Agência Nacional de Águas (ANA). Com os dados necessários em mãos, foi possível, numa primeira etapa, regionalizar as vazões médias mensais que alimentam o reservatório do Bom Jardim. Na segunda etapa do trabalho, calcularam-se as eficiências de retenção do reservatório e os volumes de sedimentos depositados em sua evolução temporal. Os resultados revelaram que a quantidade de massa depositada tem bastante influência para a depreciação do volume útil do ribeirão, devido aos altos índices de eficiência de retenção calculados.

Palavras-chave: sedimentos, assoreamento, volume útil, eficiência de retenção.

Abstract

The Bom Jardim river, located near from the city of Uberlândia, has its area of influence in the Triângulo Mineiro region due to the numerous activities that are necessary, under the supervision from an artificial reservoir to the water of Uberlândia, most populous city in this meso-region. The preventive studies carried out to maintain the operational binomial of the river and its basin are important, since a problem that occurs in reservoirs in general is the silting, which can help to reduce the useful volume. With the objective to study the phenomenon, this work sought empiric models of reservoir silting and statistical techniques for regionalization of tributaries, in order to raise quantitative parameters on both the flow and sediments deposited. To make this studies, were used computational tools like Google Earth, Microsoft Excel and historical data from precipitation and flow, available on the Hidroweb system, in the website from National Water Agency (ANA). With the necessary data in hand, in a first step, were possible to regionaliza the medium monthly flows that feed the reservoir of Bom Jardim. In the second stage of the work, the retention efficiencies in the reservoir and the volume from the deposited sediment in its temporal evolution were calculated. The results showed that the amount of mass deposited has many influence to depreciacion on the useful volume from the brook, due to the high retention efficiency values calculated.

Keywords: sediments, silting, useful volume, retention efficiency.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Curvas de E segundo Churchill.....	10
Figura 2 - Curvas de E segundo Brune.....	12
Figura 3 – Exemplo de conversão na Calculadora Geográfica.....	18
Figura 4 - Mapa da região no entorno do Bom Jardim.....	19
Figura 5 - Exemplo de discretização da bacia para obtenção do centróide.....	21
Figura 6 – Sub-bacia E_{Enxada}	29
Figura 7 – Exemplo de cálculo de área (E_{Enxada}).....	29
Figura 8 – Sub-bacia $E_{direita}$	30
Figura 9 – Sub-bacia $E_{esq,1}$	31
Figura 10 – Sub-bacia $E_{esq,2}$	31
Figura 11 – Sub-bacias alvo.....	32
Figura 12 – Curva de sedimentos afluentes ao reservatório do Bom Jardim.....	33
Figura 13 – Gráficos de dispersão entre a vazão específica (na estação fluviométrica) e a precipitação total mensal (no centróide da bacia).....	41
Figura 14 – Diagramas box-plot para os desvios relativos entre as vazões específicas e as precipitações mensais.....	46
Figura 15 – Curvas de permanência dos desvios relativos.....	48
Figura 16 – Reta de regressão média para as nove estações fluviométricas analisadas..	54
Figura 17 – Variações Q^* x P decorrente da aplicação das funções regionais para desvios relativos máximos e médios, com 80% de probabilidade de permanência.....	55
Figura 18 – Curva E x IS calculados via método de Churchill.....	57
Figura 19 – Curva E x IS calculados via método de Brune.....	57
Figura 20 – Variações de chuva e de vazões afluentes ao reservatório.....	58
Figura 21 – Variações de chuva e de descargas de sedimentos ao reservatório.....	58

Figura 22 – Evolução do assoreamento do reservatório do Bom Jardim segundo método de Churchill.....59

Figura 22 – Evolução do assoreamento do reservatório do Bom Jardim segundo método de Brune.....60

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação do reservatório para o cálculo de E.....	11
Tabela 2 – Lista de estações utilizadas na regionalização.....	18
Tabela 3 – Dados das estações fluviométricas com registros históricos com vazões diárias.....	19
Tabela 4 – Tipo de operação do reservatório.....	38
Tabela 5 – Constantes W e K em função do tipo de operação do reservatório.....	39
Tabela 6 – Valores máximos e médios de desvios relativos a 80% de probabilidade de ocorrência.....	53

Sumário

1. Introdução	8
2. Revisão Bibliográfica	10
2.1. Eficiência de retenção.....	10
2.1.1. Método de Churchill.....	10
2.1.2. Método de Brune	11
2.1.3. Outros métodos na literatura	12
2.2. Curva-chave de sedimentos	13
2.3. Estudos similares	14
3. Metodologia.....	16
3.1. Regionalização de Vazões	16
3.1.1. Séries históricas de vazão e de precipitação	16
3.1.2. Cálculo das vazões específicas	20
3.1.3. Interpolação das precipitações para os centróides das bacias fonte.....	20
3.1.4. Relações entre as vazões específicas e as precipitações totais mensais ...	22
3.1.5. Curvas de permanência dos desvios relativos	24
3.1.6. Função de regionalização das vazões específicas.....	25
3.2. Estimativa de assoreamento do reservatório do Bom Jardim.....	27
3.2.1. Áreas das Sub-bacias Alvo	27
3.2.2. Cálculo das Vazões e Cargas para as Sub-Bacias Alvo	33
3.2.3. Eficiência de Retenção	34
3.2.3.1. Cálculo da Eficiência de Retenção pelo Método de Churchill.....	35
3.2.3.2. Cálculo da Eficiência de Retenção pelo Método de Brune	36
4. Resultados.....	40
4.1. Análises das bacias fonte	40
4.1.1. Correlações entre as vazões específicas e a precipitação mensal	40

4.1.2. Desvios relativos e curvas de permanência dos desvios.....	46
4.2. Análises das bacias alvo	53
4.2.1. Equação regional para a vazão específica.....	53
4.2.2. Equação regional para as descargas de sedimentos	55
4.2.3. Granulometria dos sedimentos depositados.....	56
4.2.4. Assoreamento do reservatório do Bom Jardim segundo os métodos de Churchill e de Brune	56
5. Conclusão	62
Referências	63

1. Introdução

Segundo Mazzini *et al.* (2011), assoreamento em reservatórios pode ser definido como o acúmulo de sedimentos desprendidos do solo da bacia de contribuição ou do leito dos cursos de água afluentes e depositados nas margens e fundo. Esse acúmulo deve ser estudado em quaisquer etapas no processo de retirada de sedimentos, obtendo total controle do que é retirado com as devidas cautelas necessárias a serem tomadas dependendo da substância em questão.

Os estudos eventualmente feitos devem apresentar várias abordagens sobre a operação de retirada dos sedimentos, sendo mais detalhados quando maiores forem os problemas de erosão e do transporte dos sedimentos no curso d'água (Carvalho *et al.*, 2000).

Segundo Trainini (2005), onde as atividades de agricultura e pecuária são mais intensas, a perda de solo e o conseqüente assoreamento ocorrem de forma mais acentuada. Fenômenos geotécnicos são citados; por exemplo, voçorocamento e rapinamento. Tais atividades aliadas à gravidade e ao fator histórico das civilizações antigas iniciarem a cultura de que o ser humano se estabelecia onde tinha água abundante (Bruni, 1994) auxilia o entendimento da ocorrência do assoreamento no fundo de reservatórios.

A segurança dos reservatórios é severamente afetada pelo assoreamento. Como exemplos de problemas causados, os sedimentos aumentam as cargas nas paredes de barragens e reduzem a atenuação de inundação. Estudos realizados em reservatórios na Europa Central mostraram que o esgotamento por sedimentação ocorre em uma taxa média de 0,51% ao ano (Mama; Okafor, 2015).

Cargas de sedimentos são geralmente idealizadas como pressões estáticas em repouso (no caso, pressões de depósitos). O manual de projeto do Departamento de Reclamação dos Estados Unidos (USBR) para pequenas barragens sugere que os sedimentos sejam considerados equivalentes a um fluido com coeficiente de pressão implícita e coeficiente de atrito interno com valores relevantes o bastante para alterar o comportamento natural da água nessas barragens caso não existisse assoreamento (Schellenberg *et al.*, 2017). Desta forma, o fluido com sedimentos depositados tem características distintas do fluido sem os mesmos.

Na Austrália, houve casos de inoperação total de reservatórios por assoreamento, devido ao descuido de projetistas e operadores não levarem em conta a erosão e sedimentação e transporte do solo de forma correta para a realização das obras destes reservatórios.

Assim, nenhuma medida prática foi induzida pré-assoreamento e a inoperação foi crescente a ponto de tornar os reservatórios inutilizáveis (Mama; Okafor, 2015).

O objetivo principal deste trabalho é realizar a comparação entre dois diferentes métodos para estimativa da eficiência de retenção de sedimentos e aplicá-los ao reservatório do Bom Jardim. Dentre os objetivos periféricos, citam-se a estimativa do volume útil do mesmo, além da apresentação de uma metodologia para regionalização de vazões médias mensais.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Eficiência de retenção

Eficiência de retenção de sedimento em um reservatório (E) é a quantificação do assoreamento que um reservatório pode suportar. O valor de E pode ser obtido conforme medições sistemáticas das descargas sólidas afluentes e a jusante da barragem (Cabral, 2005). Os cálculos podem ser realizados de várias formas, devido à diversos estudos realizados para esse mesmo parâmetro. Utilizando os principais e mais elaborados, os cálculos levam à construção de curvas que relacionam os sedimentos retidos, a carga sólida que o corpo hídrico suporta e a vazão afluente do mesmo.

2.1.1. Método de Churchill

O primeiro método estudado para o cálculo de E é o de Churchill (1948), que utiliza o valor do índice de sedimentação (IS) para a construção da curva. Esse índice é um valor que relaciona dados hídricos e geométricos do reservatório e serve para ter uma noção temporal da sedimentação por metro. A unidade é s^2/m e o cálculo é descrito na equação 1.

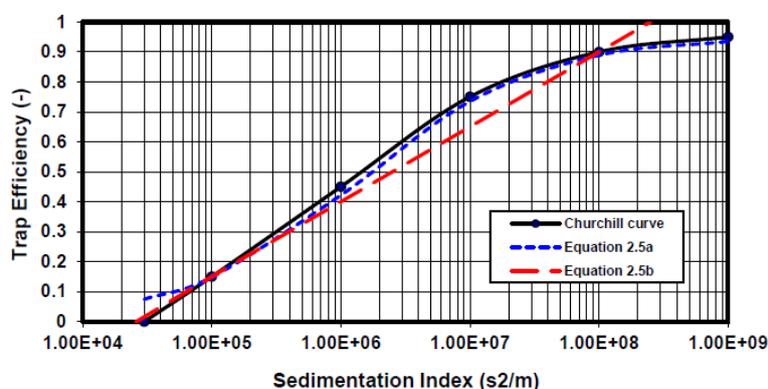
$$IS = \frac{Vol^2}{Q^2L} \quad (1)$$

Vol = volume total do reservatório (m^3);

Q = vazão média afluente (m^3/s);

L = comprimento do reservatório (m).

Figura 1 – Curvas de E segundo Churchill



Fonte: Van Rijn, 2013

Para o cálculo de E pelo método de Brune, deve ser feito um gráfico semelhante ao da figura 1, relacionando o valor de E calculado com o IS. Caso a curva seja próxima à curva representada na figura 2, o cálculo foi realizado de forma satisfatória.

Conforme Carvalho *et al.* (2000), o tamanho do reservatório é um fator importante para o cálculo de E. Os métodos mais conhecidos, como Churchill e Brune, são usados conforme esse parâmetro, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do reservatório para cálculo de E

Porte do Reservatório	Classificação em volume (m ³)	Cálculo de E
Pequeno	< 10 . 10 ⁶	Churchill
Médio	10 - 100 . 10 ⁶	Brune
Grande	>100 . 10 ⁶	Brune

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2000)

2.1.2. Método de Brune

As curvas de eficiência de Brune (1953) são calculadas conforme as envoltórias, em que as refrentes à curva média dizem respeito aos depósitos contendo sedimentos finos (curva inferior) e grossos (curva superior). O método é mais facilitado para ser usado pois necessita de menos dados de entrada, sendo o mais utilizado em território brasileiro para o mesmo tipo de estudo. Os dados de saída para o método de Brune são dados na figura 2.

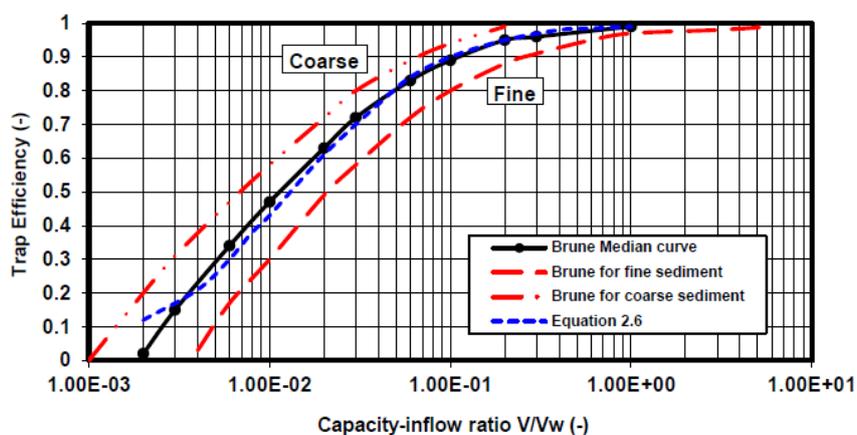
Este método relaciona, através de curvas determinadas empiricamente, a capacidade de afluência de um reservatório com a estimativa da porcentagem de sedimentos retidos pelo mesmo. A capacidade de afluência (Cafl) pode ser obtida através da equação a seguir.

$$Cafl = \frac{V_{res}}{Vafl} \quad (2)$$

V_{res} = volume do reservatório (m³);

V_{afl} = volume médio anual afluente ao reservatório (m³).

Figura 2 – Curvas de E segundo Brune



Fonte: Van Rijn, 2013

Para o cálculo de E pelo método de Brune, deve ser feito um gráfico semelhante ao da figura 2, relacionando o valor de E calculado com o Ca_{fl} . Caso a curva seja próxima à curva representada na figura 2, o cálculo foi realizado de forma satisfatória.

2.1.3. Outros métodos na literatura

Van Rijn (1987) estudou e viabilizou um método indireto com uso de equacionamento para o cálculo de E, que depende da temperatura da água, da gravidade específica, da aceleração da gravidade e do diâmetro dos sedimentos, necessitando de dados bastante precisos e diretos tanto sobre os sedimentos quanto sobre o local a ser sedimentado.

Eysink e Vermaas (1981), em sua estimativa para o cálculo de E, fizeram estudos onde o reservatório foi fracionado em repartições, levando em conta vários fatores referentes às partículas de água e de sedimentos em questão. Para o cálculo, o método depende do comprimento total do reservatório e de cada repartição, da vazão, da velocidade de assentamento do sedimento e da velocidade média de cisalhamento do leito do reservatório.

Borland e Miller (1960) realizaram outra metodologia utilizada para obter a distribuição de sedimentos. O cálculo e confecção de gráficos depende do deflúvio sólido total médio anual efluente, do peso específico aparente médio dos depósitos, da descarga sólida total e do volume total ou outro característico do reservatório.

Alvim e Chaudhry (1987) apresentaram um estudo de previsão da distribuição dos sedimentos e consequente modificação da geometria do fundo de reservatórios ao longo do tempo, na pesquisa “Modelo Matemático de Assoreamento de Reservatórios”. Desenvolveram um modelo matemático de processo de sedimentação com a utilização de balanço de massa aplicada em escoamento permanente bidimensional de fundo inclinado. A equação foi resolvida por método de diferenças finitas, obtendo perfis de concentração ao longo do eixo longitudinal do reservatório.

Alvim e Righetto (1993) estimaram as prováveis alterações na configuração dos depósitos de sedimentos em um reservatório, decorrentes de um rebaixamento do nível de água. Utilizaram um modelo matemático para o estudo do escoamento permanente e parcialmente tridimensional, simulando a distribuição de velocidades e tensões. Com levantamentos aerofotográficos, foi possível estimar a evolução dos depósitos de fundo e seu completo estudo antes da construção de uma barragem no reservatório em questão.

Bufon (1999) estudou o tempo de vida útil da represa Velha em Pirassununga – SP, comparando-se medidas efetuadas em 1998 com anos anteriores e utilizando modelos matemáticos em para estimativa para até 230 anos adiante.

Carvalho e Catharino (1993) utilizaram um programa de estudos sedimentológicos para o reservatório de Itaipu prevendo o assoreamento e a vida útil do reservatório para 100 anos, além da distribuição de depósitos a partir de curvas cota-área-volume. Utilizaram, como parte do estudo, os métodos de Borland & Miller e Brune.

2.2. Curva-chave de sedimentos

A curva-chave de sedimentos se designa em um modelo quantitativo e gráfico da relação entre a vazão em um curso d'água por algum parâmetro relacionado aos sedimentos ali presentes (Bellinaso; Paiva, 2007). O processo de construção da curva é bastante empregado para estimar a descarga sólida em cursos d'água. É muito importante empregá-lo com cautela, afinal quanto mais preciso forem os dados referentes à construção da curva, mais eficaz a mesma se apresentará (Merten *et al.*, 2006).

A eficácia do uso do método gráfico de curva-chave de sedimentos é relacionada com todo o aparato estudado antes, durante e depois da aferição das coordenadas cota-vazão. São importantes estudos minuciosos e objetivos no campo, como visitas à estação,

reconhecimento de trechos, pesquisas de indicadores de controle de vazão, dentre outros; nos arquivos disponíveis, como o histórico do posto de controle, nas medidas de cotas originais, nos relatórios das visitas de hidrometristas, etc.; e nos dados disponíveis, com análise detalhada do que se tem (Jacon; Cudo, 1989).

Geralmente, utilizam-se sensores eletrônicos para a aferição das coordenadas cota-vazão necessárias para a construção gráfica da curva. A Estatística é utilizada de acordo com as condições locais e naturais ou antrópicas, que afetam os valores na equação da curva. Geralmente ocorrem condições numerológicas em que a equação não se torna viável, por exemplo, quando a cota é maior ou igual a um certo valor a equação utilizada é uma, enquanto se for menor pode vir a ser outra, dependendo do reservatório estudado (Silva Jr. *et al.*, 2011) (Bellinaso; Paiva, 2007).

2.3. Estudos similares

Heinermarm (1981) fez uma espécie de continuação dos estudos de Brune (1953) e sua curva de eficiência, utilizando dados de 20 reservatórios nos Estados Unidos e desenvolvendo uma nova curva. Conforme o mesmo, na época dos estudos feitos por Brune, a falta de dados disponíveis para análise de sedimentos fez com que o trabalho pudesse vir a ser continuado, devido a novas tecnologias para implantação deste estudo. O uso dessa nova curva de eficiência significou uma redução em 4 a 10 % no volume de alguns reservatórios por conta do armazenamento de sedimentos, entre 1953 e 1981.

Venâncio (2009) realizou um estudo no reservatório Represa Velha, situado na bacia hidrográfica do Mogi Guaçu, acerca do assoreamento no mesmo. Por conta da disponibilidade de dados batimétricos, de vazão e sedimentos, foi possível realizar simulações numéricas utilizando ferramentas computacionais, comparando os resultados com campanhas batimétricas realizadas.

Alamy Filho *et al.* (2002) estudaram o caso do reservatório Salto Grande, situado no rio Atibaia, em Americana – SP. O estudo foi realizado através de ferramentas computacionais, estimando o volume assoreado basicamente por vazões mensais e descargas sólidas afluentes, eficiência de retenção e peso específico aparente. Os resultados foram comparados com o trabalho de Coelho (1993) que realizou uma amostragem direta do depósito em 15 pontos diferentes do reservatório, onde o volume

assoreado é representado pela espessura média de depósito multiplicada pela área em que se situa o ponto.

Maia (2006) em tese de doutorado pela USP de São Carlos viabilizou pesquisas sobre a interferência do assoreamento no reservatório de Promissão, localizado no Médio Tietê, na geração de energia da Usina Hidrelétrica Mário Lopes Leão. O assoreamento foi calculado conforme comparação da topografia original do lago na época do seu enchimento em 1975 com os resultados da batimetria realizada em 2005. Utilizando métodos e ferramentas computacionais, foram analisadas as variações do volume no período mencionado, além de uma previsão para os anos de 2055 e 2105. A redução do volume útil do reservatório foi de 4,14% até 2005 e cerca de 9,46% em 2105. O estudo do assoreamento também foi realizado por análise qualitativa dos dados, identificando os afluentes que apresentavam maior grau de assoreamento. Ainda com ferramentas computacionais, foram realizadas simulações considerando diferentes curvas cota x área x volume de 1975, 2005, 2055 e 2105, resultando que a interferência de 130 anos de assoreamento no reservatório não foi significativa.

3. Metodologia

A etapa preliminar de estudo teve como objetivo o entendimento e caracterização do fluxo de vazão ao reservatório Bom Jardim. Para isso, foi necessário obter uma série de dados referentes às vazões das bacias no entorno do reservatório, para que fosse possível analisar toda a vazão afluyente no Bom Jardim, afim de quantificar com precisão a eficiência de retenção e caracterizar o assoreamento no mesmo.

Assim, a metodologia deste trabalho é dividida em dois grandes eixos. O primeiro deles é dedicado à regionalização de vazões, abordando um conjunto de técnicas para estimativa das vazões afluentes ao reservatório do Bom Jardim. O segundo eixo abrange a previsão de assoreamento do reservatório, segundo os métodos empíricos de Churchill e Brune, ambos baseados no cálculo da eficiência de retenção do corpo hídrico.

Vale destacar que esse método para realização de regionalização de vazões é de autoria própria, com pensamento em inovação, sem perder a precisão e otimização na questão de realizar cálculos referentes ao assoreamento.

3.1. Regionalização de Vazões

3.1.1. Séries históricas de vazão e de precipitação

O primeiro passo realizado para o estudo da região foi feito de acordo com o procedimento de regionalização de vazões. Nesse contexto, é importante destacar que não há registros históricos de vazões afluentes ao reservatório do Bom Jardim. Os dados de campo disponibilizados em trabalhos como os de Martins (2018) e Oliveira (2018) são instantâneos e ainda insuficientes para sustentar uma geração de série sintética de vazões veiculadas para o interior do reservatório. Por isso, para que fossem estimadas as vazões afluentes, partiu-se para uma análise de regionalização, utilizando registros fluviométricos históricos em rios e ribeirões vizinhos. Tal estudo pôde ser viabilizado pelos dados fluviométricos e pluviométricos disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), no portal *online* “Hidroweb”.

O Hidroweb é uma plataforma digital onde a ANA registra dados referentes às estações fluviométricas e pluviométricas em todo o território nacional. Os dados disponíveis são acerca da vazão nas estações, o nível de consistência dos dados, o tipo de medição dos dados, restrições de consulta, quantidade de chuva, dentre outros.

De acordo com a localização do reservatório do Bom Jardim no sistema Hidroweb, foi possível selecionar algumas estações fluviométricas próximas e as pluviométricas em seus entornos. Desta forma, com os dados do sistema, séries de dados históricos de vazão e chuva foram armazenadas e trabalhadas com procedimentos de regionalização. Isto permitiu gerar séries sintéticas de vazões afluentes correlacionadas com a precipitação, para previsão do comportamento das bacias que contribuem para o reservatório.

Foram baixadas gratuitamente as séries das estações pluviométricas e fluviométricas de interesse do Hidroweb, que continham os dados diários das estações para um determinado período nas mesmas. Neste trabalho, o interesse foi voltado para os valores de vazões médias mensais. Logo, os dados diários de vazão foram utilizados para que, dentro de cada mês, fosse extraído o valor médio. Em suma, para as estações fluviométricas selecionadas, calcularam-se as médias mensais (Q média mensal), em m^3/s , para cada uma delas; para as pluviométricas, a adaptação foi com a precipitação total mensal (P total mensal), em mm, para cada uma delas. Em suma, para as estações fluviométricas foi retirada a vazão média mensal e para as pluviométricas a soma total das precipitações diárias dentro de cada mês.

O *download* das séries de vazão e pluviometria foi realizado na extensão “csv”, compatível com o Microsoft Excel, *software* utilizado para edição e adaptação dos arquivos baixados.

As estações fluviométricas (F) e pluviométricas (P) selecionadas são listadas na tabela 2, juntamente com o período em que os dados foram disponíveis.

O sistema Hidroweb, dentre os parâmetros já citados, fornece a localização exata de cada ponto no globo terrestre, em coordenadas geográficas (graus, minutos, segundos). Para cada uma das estações, foi realizada a conversão das coordenadas geográficas para coordenadas UTM, que trabalha com dados em metros e é dividido em 60 zonas ao redor do planeta.

A conversão foi realizada *online*, pela Calculadora Geográfica disponibilizada gratuitamente pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI), que faz parte da Coordenação Geral de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A figura 3 apresenta um exemplo de conversão realizada pela Calculadora Geográfica.

Tabela 2 – Lista de estações utilizadas na regionalização

Tipo	Estação	Período
F	Estação Ponte Preta (rio Jordão)	1953 - 1960
	Estação de Sucupira (rio Uberabinha)	1953 - 1965
	Estação Fazenda Paraíso (rio Tijucu)	1953 - 2016
	Estação Uberaba (rio Uberaba)	1976 - 2016
	Estação Ponte da Antinha (rio Capivara)	2005 - 2011
	Estação Israel (rio Bagagem)	2005 - 2011
	Estação Ponte Velha Romaria (rio Bagagem)	2005 - 2011
	Estação Copasa (rio Bagagem)	1953 - 2012
	Estação Pontilhão (rio Bagagem)	2005 - 2011
P	Estação Estrela do Sul	1953 - 2014
	Estação Araxá	1975 - 1998
	Estação de Uberaba	1953 - 1965
	Estação Conceição das Alagoas	1958 - 1963
	Estação Itaipu	2000 - 2018
	Estação Itiguapira	2000 - 2018
	Estação Fazenda Letreiro	1974 - 2018
	Estação Patrimônio Rio do Peixe	2000 - 2018
	Estação Uberaba (na cidade)	1966 - 2015
	Estação Veríssimo	1995 - 2018
	Estação Zelândia	1975 - 2018
	Estação Santa Juliana	1953 - 2018
	Estação Perdizes	1974 - 2018

Fonte: Autor (2018)

Figura 3 – Exemplo de conversão na Calculadora Geográfica

The image shows a web-based Geographic Calculator interface. It is divided into several sections:

- Input Section:**
 - Header: "Sua coordenada esta em:"
 - System: "GEOGRAFICA (Grau Minuto Segundo)"
 - Coordinates: Longitude (Oeste) -18.88 41 0.12; Latitude (Sul) -50.00 45 8.88
 - Datum: "Seleção o Datum de entrada" - SAD 69
 - Button: "Avançar"
 - Note: "Use ponto (.) para separação decimal"
- Output Section:**
 - Header: "Seleção a Projecao de saída" - UTM
 - Datum: "Seleção o Datum de saída" - SAD 69
 - Button: "Avançar"
- Result Section:**

Resultado	
Datum Entrada	SAD69
Datum Saida	SAD69
Resultado da conversao:	Veja a região no Google Maps
--	--
Longitude em GMS	L 18 11 47.880
Longitude em GD	18.1966333333
Coord X UTM em metros	296004.547408
--	--
Latitude em GMS	N 49 15 9.120
Latitude em GD	49.2525333333
Coord Y UTM em metros	5459330.6057
Meridiano Central = 21 /// Fuso UTM = 34	
- Additional Tools:**
 - "Calcula distancia entre 2 pontos": Fields for initial and final longitude/latitude, datum selection, and a "Calcular" button.
 - "Calcula Meridiano Central": Field for longitude, datum selection, and a "Calcular" button.
- Footer:**
 - Coordenadas para testes: [aqui](#)
 - Problema, dúvida ou sugestão: proatoo@dpi.inpe.br
 - Tutorial (produzido pela Unesp – Câmpus de Presidente Prudente) [aqui](#)

Fonte: DPI (2018)

No caso, o exemplo realizado foi para transformar em coordenadas UTM o ponto W (-18,88° 41' 0,12"), S (-50,005° 45' 8,88"). O resultado é exibido em sistema de coordenadas (X, Y) e a zona UTM, sendo importante ressaltar que o exemplo da figura 3 é fictício, não fazendo parte dos pontos necessários deste trabalho, com função apenas de exemplificar o funcionamento da Calculadora. A tabela 3 explicita todas estações fluviométricas e suas coordenadas UTM.

Tabela 3 – Dados das estações fluviométricas com registros históricos de vazões diárias

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	RIO	Período de Dados	Bacia de contribuição	COORDENADAS		ZONA
		Data	A (km ²)	E UTM (m)	S UTM (m)	
COPASA Iraí de Minas	Bagagem	01/2005 a 12/2011	91	241329,354	7899894,331	23
Fazenda Paraíso	Tijuco	01/1953 a 02/2016	1510	755804,004	7871164,376	22
ISRAEL	Bagagem	01/2005 a 12/2011	289,95	224158,3061	7908818,476	23
Ponte da Antinha	Capivara	01/1953 a 08/1992	1270	286364,701	7862879,158	23
Ponte Preta	Jordão	10/1952 a 6/1960	762	804320,929	7942833,057	22
PONTE VELHA	Bagagem	01/2005 a 12/2011	262,42	227094,4242	7907514,949	23
Pontilhão	Bagagem	01/2005 a 12/2011	17,52	253729,2099	7899543,381	23
Sucupira	Uberabinha	01/1953 a 12/1965	716	798533,642	7898274,063	22
Uberaba	Uberaba	10/1976 a 02/2016	566	187780,8	7815870,4	23

Fonte: Autor (2018)

Com as coordenadas em mãos, foi possível confeccionar, com o *software* Google Earth, um mapa referente a todos os pontos estudados para melhor representação visual e entendimento regional do entorno do Bom Jardim, exibido no Anexo A deste trabalho. A Figura 4 mostra a região próxima ao reservatório.

Figura 4 – Mapa da região no entorno do Bom Jardim



Fonte: Autor (2018)

3.1.2. Cálculo das vazões específicas

As áreas das bacias de contribuição são fatores geométricos que influenciam diretamente nas vazões dos corpos de água. Por isto, quanto maior for a área de drenagem, maior deverá ser a vazão em determinada seção transversal de um rio. Para estabelecer a influência deste parâmetro na regra de regionalização, este trabalho considerou as vazões específicas mensais de cada estação fluviométrica. Dessa forma, a variável que foi motivo de regionalização foi a vazão específica mensal. Esta variável é matematicamente descrita como:

$$Q_k^* = Q_k/A \quad (3)$$

K = um indicador do mês;

Q_k^* = vazão específica mensal para o mês k ;

Q_k = vazão média mensal para o mês k ;

A = área da bacia contribuinte ao sítio da estação fluviométrica analisada.

Resumindo, a partir das vazões médias para cada mês k , foram quantificadas as vazões específicas para todos os postos fluviométricos citados no item anterior.

3.1.3. Interpolação das precipitações para os centróides das bacias fonte

No presente trabalho, o termo bacia fonte refere-se àquelas que são drenadas pelas estações fluviométricas. De acordo com a rede de dados pluviométricos, para cada posto de medição de vazão, há um conjunto de postos pluviométricos vizinhos, dentro ou fora das bacias fonte. Nesse sentido, para levar em conta o reflexo dessas precipitações nas vazões, os totais mensais de chuva de cada estação foram transferidos para o centróide de cada bacia fonte. Este centróide foi calculado a partir das coordenadas dos divisores de água das bacias, utilizando uma macro criada no programa Excel. A referida macro teve como premissa a subdivisão de cada bacia em áreas pequenas de retângulos cuja maior dimensão alinha-se no sentido norte-sul, como ilustra a Figura 5. Por fim, foram calculadas as coordenadas dos centróides de cada bacia pelas Equações 4 e 5.

$$X_{cg} = \int \frac{x.dA}{A} \quad (4)$$

$$Y_{cg} = \int \frac{y.dA}{A} \quad (5)$$

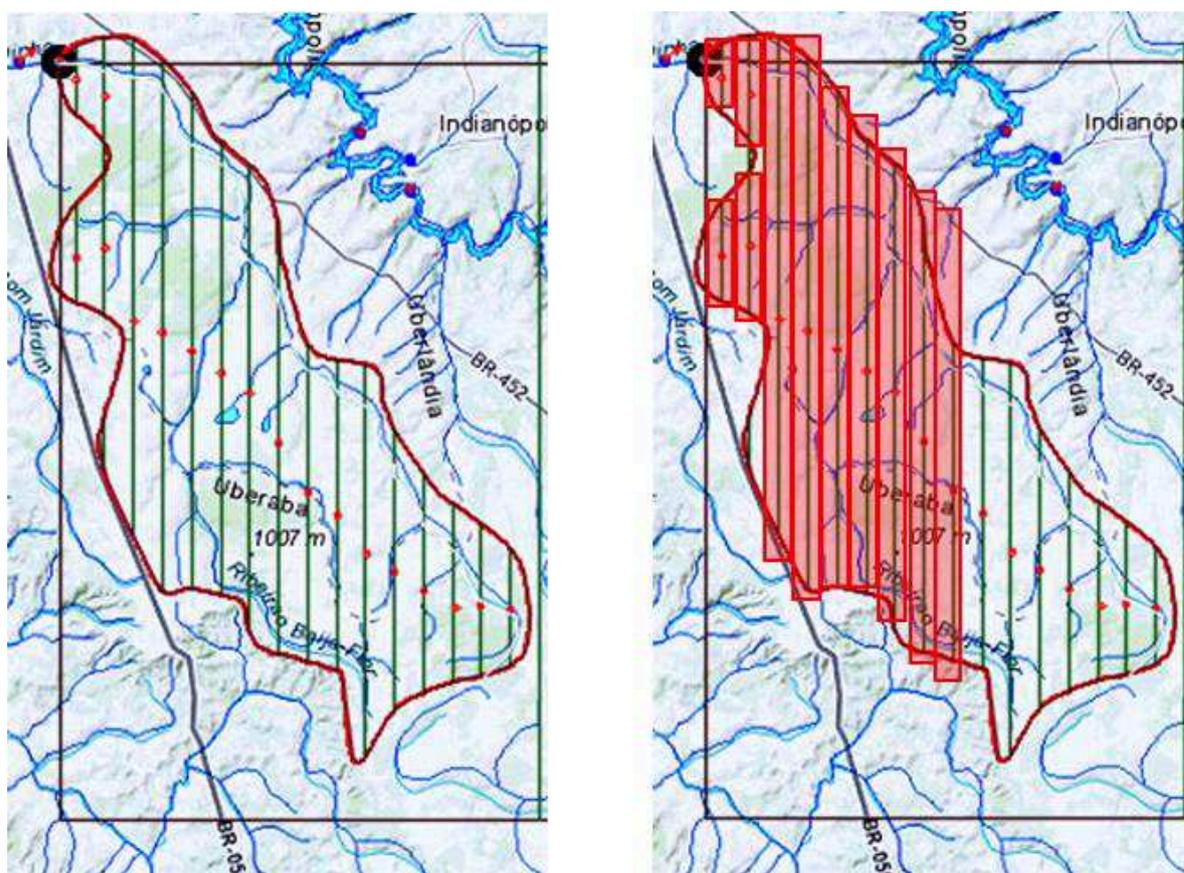
X_{cg} = coordenada x do centróide da bacia;

Y_{cg} = coordenada y do centróide da bacia;

dA = área de cada delimitação;

A = área total da bacia.

Figura 5 – Exemplo de discretização da bacia para obtenção do centróide.



Fonte: Autor (2018)

As integrais indicadas nas equações (4) e (5) foram resolvidas numericamente, em macro do Excel, utilizando o método dos retângulos.

Definidos os centróides das bacias fonte, foram selecionadas as estações pluviométricas mais próximas de forma que as precipitações totais mensais foram interpoladas de acordo com método do inverso do quadrado das distâncias. Este método utiliza o inverso do quadrado da distância, entre o centróide e o posto pluviométrico, como peso de ponderação para interpolação. Assim, aqueles pontos de medição de vazão mais

próximos do centróide terão maior peso para o valor mais representativo daquele ponto. Esta maneira de interpolação é definida matematicamente como:

$$P_{cg} = [\sum(P_i \cdot 1/dist^2)] / (1/dist^2) = P \quad (6)$$

P_i = precipitação total mensal da estação pluviométrica vizinha i ;

$dist$ = distância dessa estação ao centróide da bacia;

P_{cg} = precipitação mensal trasladada para o centróide. Para efeito de simplificação, no decorrer deste texto P_{cg} será reescrito simplesmente como P .

Para o uso da macro de transferência, a entrada era disposta com uma série de dados mensais de vazão (referentes à estação fluviométrica considerada) e n séries de chuva (P), além das coordenadas UTM de todas as estações (fluviométrica e das pluviométricas vizinhas). Os resultados finais fornecem uma coluna, representando todas as n séries P no centróide da bacia da estação fluviométrica, realizando assim a transferência de n pontos de medição de chuva para apenas um ponto fictício mais representativo para a bacia.

3.1.4. Relações entre as vazões específicas e as precipitações totais mensais

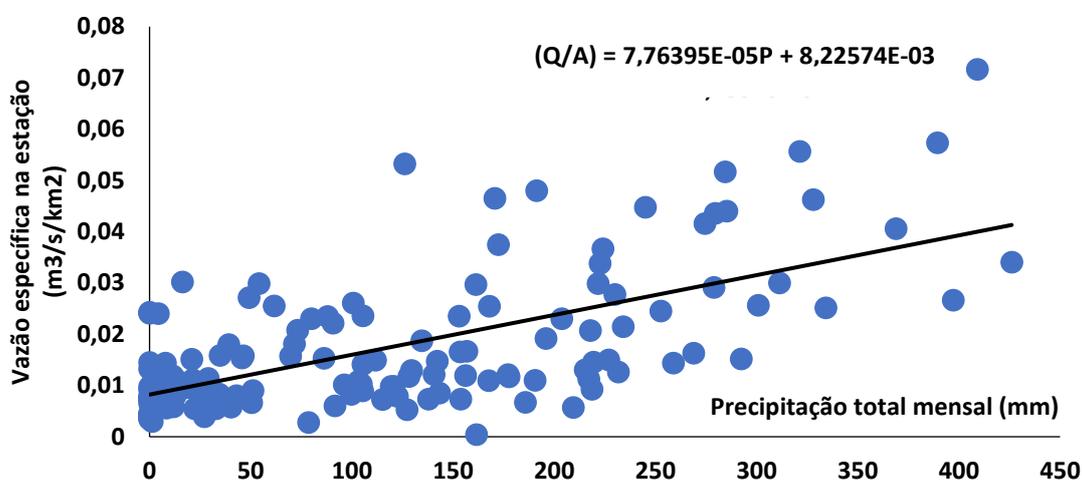
Foram analisadas todas as estações fluviométricas em função das pluviométricas mais próximas e confeccionados gráficos que explicitam possíveis comportamentos das vazões específicas em relação aos totais precipitados em cada mês. Neste contexto, parte-se do princípio de que a área da bacia é o principal parâmetro geométrico influente na vazão e de que a precipitação é a principal variável climática interveniente.

Foram montadas planilhas com auxílio do Excel, uma para cada estação fluviométrica. Com as séries de dados mensais da vazão, foi possível calcular a vazão específica (Q/A) em cada estação. Com a praticidade de uso do Excel, este cálculo foi facilmente realizado dividindo-se a vazão mensal pela área de drenagem de cada estação, dado fornecido nas planilhas baixadas do Hidroweb. Uma importante ressalva é que os dados das estações pluviométricas só poderiam ser utilizados se coincidissem com algum período evidenciado nos dados fluviométricos. Em outras palavras, somente há sentido em se analisar possíveis correlações entre a vazão específica e a precipitação mensal se ambos os dados corresponderem a um mesmo mês.

Convém lembrar que, neste trabalho, para as estações fluviométricas fonte, foram utilizados dados de chuva das estações pluviométricas no entorno, com intenção de interpolar os dados e fazer com que a análise pluviométrica seja feita apenas em um ponto, ou seja, transferir toda a chuva das estações P para um único ponto referente ao centróide da bacia drenada pela estação fluviométrica.

Com os resultados obtidos, foram realizados gráficos onde as ordenadas eram referentes às vazões específicas ($m^3/s/km^2$) e as abscissas às precipitações totais mensais em todos os centróides das bacias fonte. O Gráfico 1 ilustra um exemplo destes diagramas de dispersão. Destaca-se que cada ponto é equivalente a um mesmo período.

Gráfico 1 – Diagrama de vazão específica *versus* precipitação mensal



Fonte: Autor (2018)

Nota-se que os diagramas deverão fornecer nuvens de pontos dispersos. Para cada estação fonte, estes diagramas poderão denotar tendências mais ou menos evidentes entre a vazão específica e a precipitação mensal. Em todos os casos testados, curvas de tendência lineares forneceram os maiores coeficientes de determinação (R^2).

As linhas de tendência estabelecidas nos diagramas ($Q^* \times P$) são importantes na análise de regionalização aqui proposta. A partir disto, calcularam-se os desvios relativos positivos e negativos dos dados em relação à curva de tendência, de acordo com:

- se $Q_k^* \geq QLT_k^*$: $D^+ = 100 \cdot (Q_k^* - QLT_k^*) / QLT_k^*$
- se $Q_k^* < QLT_k^*$: $D^- = 100 \cdot (Q_k^* - QLT_k^*) / QLT_k^*$ (7)

Q_k^* = vazão medida na estação fonte para o mês k;

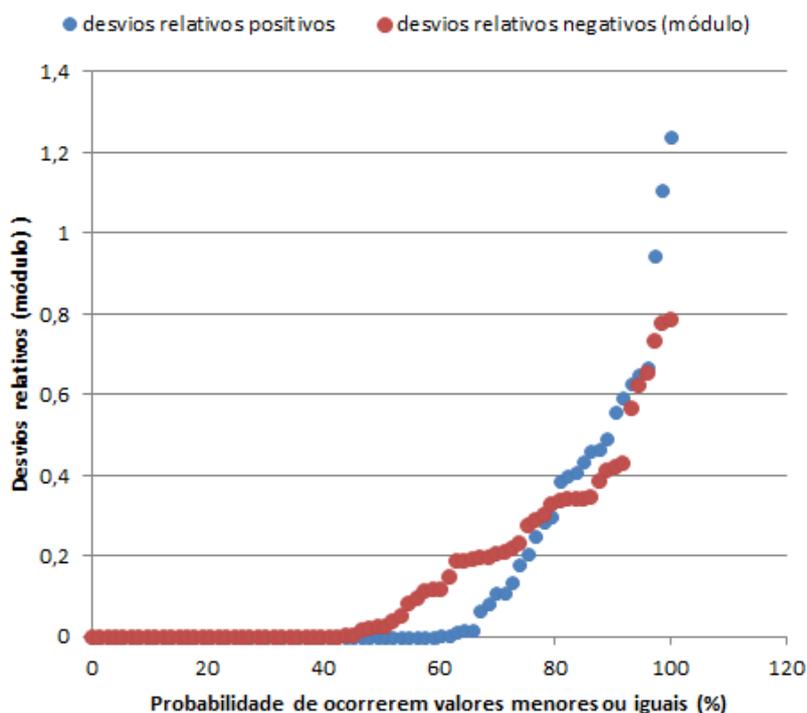
QLT_k^* = vazão estimada pela linha de tendência linear;

D^+ e D^- = respectivamente, os desvios relativos positivo e negativo em relação à linha de tendência.

3.1.5. Curvas de permanência dos desvios relativos

Os desvios relativos, calculados conforme a Equação 7, foram dispostos em ordem crescente, estabelecendo-se um intervalo de 0 a 100% para estes valores. Assim, o maior valor (em módulo) para o desvio corresponde a 100%, enquanto que o menor valor corresponde a 0. Este procedimento, quando aplicado para os desvios relativos positivos (D^+) e para o módulo dos desvios relativos negativos (D^-) resultou em diagramas conforme os ilustrados pelo Gráfico 2.

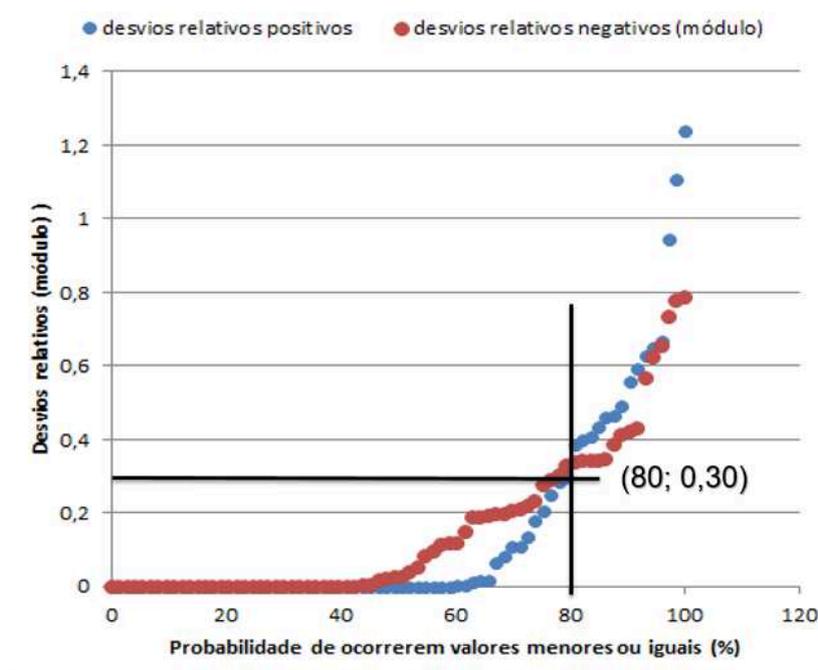
Gráfico 2 – Curvas de permanência dos desvios relativos



Conforme ilustra o Gráfico 2, a curva de permanência descreve a probabilidade de ocorrerem desvios relativos cujo módulo seja menor ou igual a determinado valor. Por exemplo, no caso ilustrado, há aproximadamente 80% de chances de ocorrerem desvios positivos ou negativos inferiores a 30% (Gráfico 3). Isto indica que a linha de tendência que expressa a relação linear entre Q^* e P , nesta estação fonte, apresenta boa capacidade de representar os dados medidos, ou seja, a relação entre a vazão específica e a

precipitação mensal. Neste caso, há apenas 20% de riscos das vazões fugirem da curva com valores que atingem 25% de diferença, para mais ou para menos. No procedimento de regionalização de vazões, proposto neste trabalho, a permanência de 80% será utilizada como referência.

Gráfico 3 – Desvios relativos na curva de permanência (Estação Uberaba) com 80% de probabilidade de ocorrência



3.1.6. Função de regionalização das vazões específicas

Os procedimentos descritos nos itens anteriores devem ser aplicados, separadamente, para cada uma das bacias fonte. Assim, para cada estação fluviométrica, deverão ser extraídos os valores médios de vazão para cada mês, calculadas as vazões específicas, selecionadas as estações pluviométricas mais próximas, interpolados os dados de chuva mensal (em períodos equivalentes aos das vazões) para o centróide da bacia e, finalmente, construídas as curvas de permanência dos desvios relativos.

A função de regionalização é construída a partir dos valores médios fornecidos pelas linhas de tendência de todas as estações fonte utilizadas. Todavia, os desvios relativos também interferem no procedimento. Assim, para cada estação, são computados os desvios relativos com 80% de probabilidade de ocorrência, tanto para mais, quanto para menos (D^+_{80} e D^-_{80}). Posteriormente, são extraídos os maiores valores, em módulo, para

esses desvios ($D^{+}_{80máx}$ e $D^{-}_{80máx}$). Com isto, a função de regionalização para a vazão específica pode ser escrita como:

$$Q^*_k = QLT^*_{MÉDIO\ k} \cdot (1 + \alpha \cdot D^{+}_{80máx} - \beta \cdot D^{-}_{80máx}) \quad \text{para desvios máximos} \quad (8)$$

$$Q^*_k = QLT^*_{MÉDIO\ k} \cdot (1 + \alpha \cdot D^{+}_{80méd} - \beta \cdot D^{-}_{80méd}) \quad \text{para desvios médios} \quad (9)$$

Q^*_k = vazão específica regionalizada para o mês k;

$QLT^*_{MÉDIO}$ = vazão específica obtida pela regressão linear (linha de tendência);

α e β = números aleatórios que variam entre 0 e 1;

$D^{+}_{80máx}$ e $D^{-}_{80máx}$ = maiores desvios relativos (positivos e negativos) obtidos dentre todas as estações fonte analisadas.

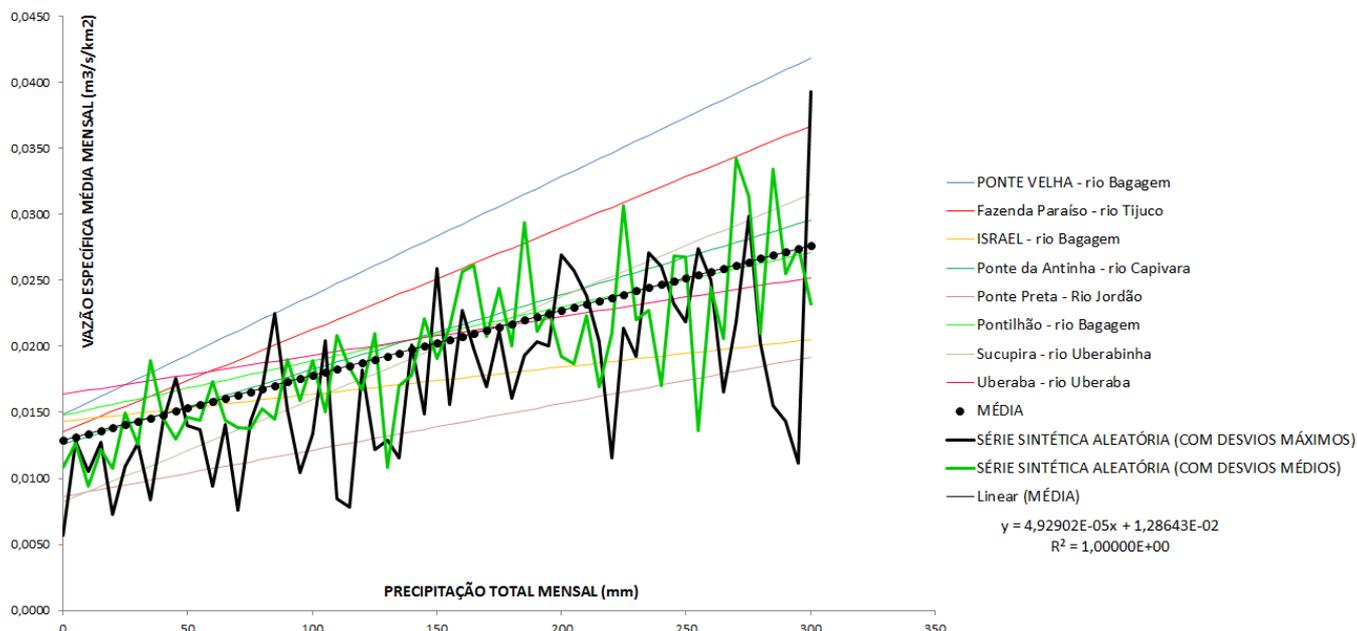
De forma análoga, $D^{+}_{80méd}$ e $D^{-}_{80méd}$ correspondem às médias dos desvios dentre todas as estações analisadas. Em todos os casos, os valores dos desvios relativos são números entre 0 e 1. Ou seja, utiliza-se a fração (entre 0 e 1) e não a porcentagem (entre 0 e 100%).

Assim, foram obtidas duas regras de regionalização: uma para os desvios máximos e outra para os desvios médios. Os parâmetros aleatórios α e β foram inseridos propositalmente, para introduzir um caráter randômico na relação chuva-vazão. O Gráfico 3 ilustra um exemplo de curvas de regionalização.

No Gráfico 3, as diversas linhas mais finas representam as retas de regressão para cada estação fluviométrica fonte. A linha preta pontilhada corresponde à reta de regressão média. Em torno dessa última, flutuam valores de vazão específica calculados de acordo com as Equações de regionalização (8) e (9). Tais flutuações decorrem dos parâmetros aleatórios introduzidos nessas equações. Nota-se ainda que a intensidade dessas flutuações é mais evidente nas curvas de desvios máximos (Equação 8), a qual tende a impor variações mais bruscas de vazão em torno da linha de tendência média.

Ainda a partir das Equações de regionalização (8) e (9), é possível recuperar a vazão média mensal, multiplicando a vazão específica pela área de contribuição da bacia.

Gráfico 3 – Curvas de regionalização de vazões específicas considerando desvios relativos máximos e médios, com 80% de probabilidade de ocorrência



Ainda a partir das Equações de regionalização (8) e (9), é possível recuperar a vazão média mensal, multiplicando a vazão específica pela área de contribuição da bacia.

3.2. Estimativa de assoreamento do reservatório do Bom Jardim

3.2.1. Áreas das Sub-bacias Alvo

Uma vez obtida a regra de regionalização que permitirá a estimativa das vazões afluentes ao reservatório do Bom Jardim, parte-se para a análise das bacias alvo. Neste trabalho, este termo é utilizado para designar as sub-bacias drenadas por cursos de água perenes, intermitentes e efêmeros, os quais contribuem para descargas pontuais de volumes de água no reservatório. Consequentemente, por estes afluentes serão veiculados sedimentos que tenderão a formar depósitos de fundo, assoreando pouco a pouco o reservatório.

A identificação de tributários diretos ao redor do reservatório foi primordial para este trabalho, pois assim foi possível quantificar e localizar exatamente onde chegam os afluentes. Esses locais de chegada são locais onde pequenas sub-bacias deságuam. Essas sub-bacias, chamadas de sub-bacias alvo, fazem parte da sub-bacia do ribeirão Bom

Jardim, que faz parte da bacia do rio Uberabinha. Por sua vez, a bacia do Uberabinha faz parte da bacia do rio Araguari, pertencente à região hidrográfica da bacia do Paraná.

As sub-bacias alvo foram traçadas conforme os pontos em que desaguavam no reservatório do Bom Jardim. Utilizando o Google Earth, foi possível identificar os principais veios de água a partir da visualização de alinhamentos de matas ciliares convergentes ao lago. Com o *software*, as imagens de satélite exibiram, juntamente com o relevo do terreno fornecido, 5 pontos de chegada de água no Bom Jardim. A partir desses pontos e das elevações de relevo, foi realizada a delimitação dos divisores de água dessas sub-bacias alvo.

Para cada sub-bacia, foram feitos traços graduais até preencher os limites, em formato semelhante a grades, a fim de formar um polígono irregular e assim encontrar a área total de cada uma delas. O método de fazer polígonos otimizou o processo de encontrar as áreas, pois o erro admitido entre os polígonos e as sub-bacias reais não era significativo e os métodos para cálculo de área de polígonos irregulares, por serem de fácil utilização e compatível com o uso do Excel, foram admitidos sem maiores inconvenientes.

O método escolhido para o cálculo das áreas foi o método de Gauss. Neste método, cada ponto do polígono é descrito como um par de ordenadas (x_i, y_i) , sendo correlacionados matematicamente de forma a percorrer cada um dos pontos do polígono, partindo de um e chegando no mesmo. A equação que segue representa este cálculo.

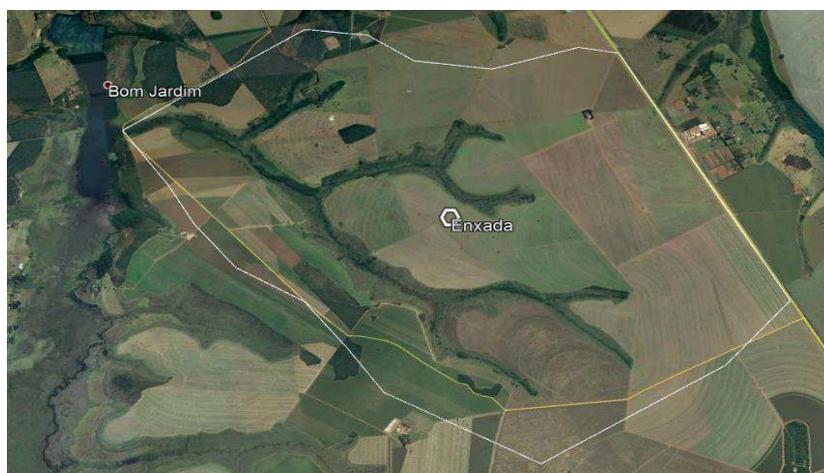
$$A = \frac{1}{2} \left[\left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 \right) - \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_i x_{i+1} + y_n x_1 \right) \right] \quad (10)$$

Nesta fórmula, são descritos os pares de coordenadas de (x_i, y_i) até (x_n, y_n) , retornando em (x_i, y_i) . Como neste trabalho foram utilizados pontos de mapa do Earth, as coordenadas para cada ponto foram em coordenadas UTM, que concordam com as operações descritas por também se apresentarem em coordenadas métricas.

Faria (2013) elaborou uma tabela, utilizando o Excel, que faz o cálculo de área utilizando o método de Gauss de forma intuitiva e otimizada, obtendo além da área, um gráfico representando essa área em coordenadas cartesianas. Neste trabalho, essa tabela foi utilizada e adaptada para o cálculo da área das sub-bacias.

Caracterizando cada uma das sub-bacias alvo, primeiramente tem-se o divisor de águas próximo ao córrego da Enxada. Essa sub-bacia (E_{Enxada}), que tem como limite a rodovia BR-050, foi sobrescrita por caminhos em linha reta feitos no Google Earth, formando grades, e admitindo pontos de maior altura conforme o relevo e a descrição do terreno, como corpos hídricos próximos e áreas com maior densidade vegetal. Concordados todos os pontos e ligando-os, tem-se o divisor de águas da sub-bacia E_{Enxada} , formada por um polígono irregular de 17 pontos. A Figura 6 mostra os limites da E_{Enxada} , enquanto a Figura 7 exemplifica o uso da tabela para o cálculo da área, além de mostrar a área em pontos de coordenadas cartesianas.

Figura 6 – Sub-bacia E_{Enxada}



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

Figura 7 – Exemplo de cálculo de área (E_{Enxada})

Área de Polígonos Irregulares - Método de Gauss				
Coordenadas	X	Y	Produto Diagonal de X	Produto Diagonal de Y
1	787850	7894361	6,21881E+12	6,22329E+12
2	788321	7893395	6,22203E+12	6,22443E+12
3	788562	7892760	6,22335E+12	6,22718E+12
4	788974	7892021	6,22609E+12	6,23237E+12
5	789705	7891385	6,23131E+12	6,23487E+12
6	790086	7890675	6,23377E+12	6,23688E+12
7	790411	7889984	6,23581E+12	6,24278E+12
8	791228	7889330	6,24178E+12	6,24819E+12
9	791980	7888729	6,24835E+12	6,26639E+12
10	794347	7889540	6,26759E+12	6,27488E+12
11	795342	7890239	6,27865E+12	6,26698E+12
12	794270	7894272	6,27034E+12	6,26637E+12
13	793787	7894471	6,26644E+12	6,25732E+12
14	792620	7894357	6,25749E+12	6,24973E+12
15	791671	7894684	6,25042E+12	6,24596E+12
16	791160	7895224	6,24659E+12	6,24019E+12
17	790376	7895486	6,23951E+12	6,22046E+12
1	787850	7894361	Área total (m ²)	31006951,070
			Área total (km ²)	31,007

Fonte: Adaptado de Faria (2018)

Como é possível observar na Figura 7 e comparando com a figura 6, as coordenadas UTM retratam de forma precisa o polígono a ser utilizado no método de Gauss. Ainda sobre a Figura 6, observa-se que a área total do polígono é dada em metros quadrados, por conta da unidade das coordenadas UTM (m). Assim, é realizada uma conversão para quilômetros quadrados para posteriores utilizações da mesma. Para a E_{Enxada} , a área calculada foi de 31,007 km².

A segunda sub-bacia analisada foi chamada de E_{direita} , pois localiza-se do lado direito do reservatório do Bom Jardim, a jusante da confluência do córrego da Enxada. Os mesmos passos utilizados para traçado e cálculo da área da E_{Enxada} foram utilizados para E_{direita} e também para todas as outras sub-bacias. Desta forma, a área calculada para E_{direita} foi de 2,588 km², calculada em um polígono de 17 lados que tem seu traçado mostrado na figura 8.

A terceira das 5 sub-bacias traçadas foi a $E_{\text{esq},1}$. Essa sub-bacia fica do lado esquerdo do Bom Jardim, em um local com bastante vegetação e com limites visualizados com facilidade por conta de curvas de nível realizadas no terreno. A área calculada para $E_{\text{esq},1}$ foi de 2,049 km² em um polígono de 15 pontos. A Figura 9 mostra a sub-bacia e nela fica visível os parâmetros citados para limite e também a vegetação.

Figura 8 – Sub-bacia E_{direita}



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

Figura 9 – Sub-bacia $E_{esq,1}$ 

Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

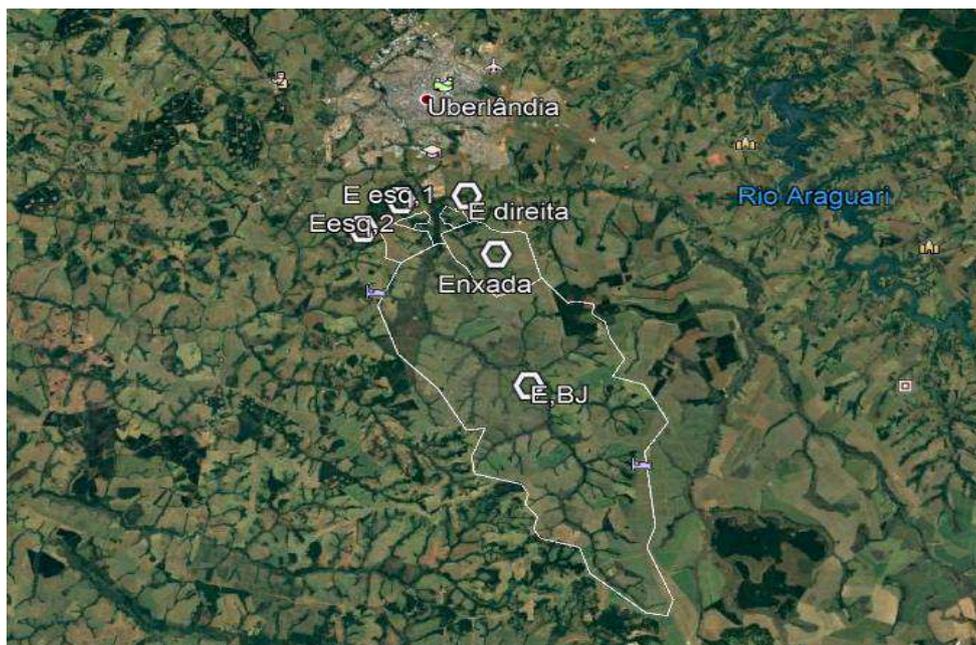
A penúltima sub-bacia realizada foi a $E_{esq,2}$, localizada ao sul da $E_{esq,1}$, em região de efluência bastante plana e com uma contribuição maior em época com maior intensidade de chuvas. Seu polígono teve 12 vértices e área de 8,984 km², evidenciados na Figura 10.

Figura 10 – Sub-bacia $E_{esq,2}$ 

Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

A última e maior das sub-bacias analisadas foi a denotada por E_{BJ}, referente à contribuição mais volumosa decorrente da vazão do ribeirão Bom Jardim. A E_{BJ} foi constituída por 45 pontos, encontrando-se ao norte com a E_{direita} e abrangendo área calculada de 333,248 km². A Figura 11 mostra a sub-bacia e engloba todas as outras, com toda a área estudada próxima ao Bom Jardim em foco.

Figura 11 – Sub-bacias alvo



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

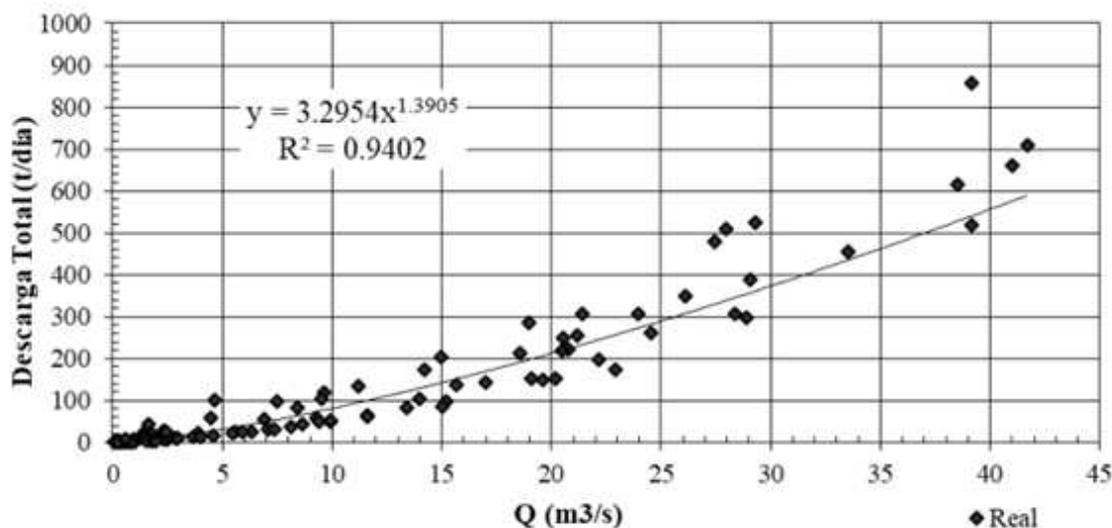
Pela Figura 11, é possível observar a proximidade das sub-bacias alvo com a cidade de Uberlândia e com o rios Uberabinha e Araguari, aprimorando a noção do espaço e localização exata de onde estão elas. É possível também analisar a sub-bacia do Bom Jardim em relação às 5 estudadas.

A sub-bacia do Bom Jardim possui área de drenagem próxima a 398,54 km², de perímetro próximo a 108,848 km, percorrendo cerca de 40 km da nascente em Uberaba até a foz no rio Uberabinha (Santos, 2018). Somando todos os valores das sub-bacias alvo obtém-se 377,876 km², valor esperado tendo em vista o valor total de 398,54 km² que contém as sub-bacias alvo e as áreas difusas. Essa quantificação dos limites estabelecidos no Google Earth satisfazem o princípio já citado de que o método realizado minimizava os erros ocorrentes no processo.

3.2.2. Regionalização da curva-chave de sedimentos

A curva-chave de sedimentos expressa a descarga total de sedimentos em função da vazão afluyente ao reservatório. Neste caso, utilizou-se como base a curva obtida por Martins (2018), a partir de simulações com o *software* SWAT, para a mesma bacia. Esta curva-chave, tomada como referência, é ilustrada pela Figura 12.

Figura 12 – Curva chave de sedimentos afluentes ao reservatório do Bom Jardim



Fonte: Martins (2018)

Para levar em conta as descargas de sedimentos resultantes das 5 sub-bacias contribuintes ao reservatório, a curva-chave da Figura 12 foi regionalizada de forma simples, usando o conceito de descarga específica de sedimentos. Com isto, as descargas sólidas em (t/dia) e as vazões afluentes em (m^3/s) foram divididas pela área total da bacia do ribeirão Bom Jardim, resultando em pares de valores $Q_s^* = Q_s/A_{BJ}$ versus $Q^* = Q/A_{BJ}$. Nesse caso, a relação foi feita com a área total da bacia do ribeirão Bom Jardim, haja vista que as descargas sólidas obtidas por Martins (2018) consideraram toda a bacia contribuinte ao reservatório.

3.2.2. Cálculo das Vazões e Cargas para as Sub-Bacias Alvo

O cálculo da vazão de cada uma das sub-bacias alvo foi realizado utilizando os valores das áreas e os resultados para vazão específica calculada pela equação de regionalização, conforme:

$$Q = Q^* \cdot A_{SB} \quad (11)$$

Q^* = vazão específica calculada nas equações de regionalização (8) e (9);

A_{SB} = área de cada sub-bacia.

Para cada sub-bacia, então, existirá um valor de Q mensal diferente, pois as vazões específicas e as áreas são distintas em cada uma delas. O valor de Q é calculado em (m^3/s).

Analogamente, foi realizado o cálculo para a descarga de sedimentos em cada sub-bacia.

$$Q_S = Q_S^* \cdot A_{SB} \quad (12)$$

Q^*s = carga específica (t/dia/ km^2);

A_{SB} = área em cada sub-bacia.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, cada sub-bacia terá seu Q_s mensal específico, calculado em t/dia.

Para ajustar os dados com o propósito de calcular as eficiências de retenção, os valores de Q e Q_s foram somados, a fim de obter os valores, tanto da vazão quanto da carga total para o reservatório do Bom Jardim. As equações 13 e 14 mostram as expressões utilizadas para estes somatórios.

$$\sum Q = Q_{Enxada} + Q_{Esq,1} + Q_{Esq,2} + Q_{Direita} + Q_{BJ} \quad (13)$$

$$\sum Q_S = Q_{S_{Enxada}} + Q_{S_{Esq,1}} + Q_{S_{Esq,2}} + Q_{S_{Direita}} + Q_{S_{BJ}} \quad (14)$$

Q_{Enxada} = vazão da sub-bacia E_{Enxada} (m^3/s);

$Q_{Esq,1}$ = vazão da sub-bacia $E_{Esq,1}$ (m^3/s) e assim respectivamente. Analogamente, o somatório de carga é realizado em cada bacia em t/dia.

3.2.3. Eficiência de Retenção

Com todos os cálculos necessários realizados, a eficiência de retenção pôde então ser calculada com precisão. O recorte desta pesquisa optou pelos métodos de Brune e Churchill. Tais métodos baseiam-se nos volumes do reservatório, nas vazões e nas descargas sólidas afluentes, dados que são compatíveis com os que foram levantados neste trabalho. Métodos mais avançados também baseiam-se nas tensões cisalhantes

sobre o fundo do reservatório, o que careceria de uma discretização do mesmo e a determinação dos campos de velocidade por equações diferenciais parciais (equações de Saint Venant integradas ao longo da profundidade). Em suma, os dados para utilização de outros métodos são mais detalhados, além de que os dois métodos citados obtiveram resultados otimizados mediante poucas informações necessárias. O cálculo da eficiência de retenção foi realizado também via planilha eletrônica.

Vale ressaltar que, de acordo com a tabela 1, o córrego do Bom Jardim se localiza na categoria de reservatório de pequeno porte, pois seu volume é menor que $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Assim, o método mais apropriado e menos impreciso para o cálculo seria o de Churchill.

3.2.3.1. Cálculo da Eficiência de Retenção pelo Método de Churchill

Para o cálculo de E por Churchill, havia necessidade de ter em mãos o volume e o comprimento do reservatório, a vazão efluente no reservatório e o índice de sedimentação, calculado mediante a equação 1.

Martins (2018) realizou curvas cota-volume e cota-área inundada e comparou os resultados com o contorno do reservatório, obtido a partir de imagens aéreas. Admitindo-se o nível d'água máximo na cota 804m, o volume obtido foi de $7,30 \text{ hm}^3$. Além disso, o comprimento do reservatório foi estimado em 3 km, da crista da barragem até o último ponto de divisor de águas relativo ao alcance da sub-bacia do Bom Jardim.

Para utilização da equação 1, o volume e o comprimento são constantes e as vazões eram variáveis em relação ao mês calculado. Aplicando os valores constantes na equação 1, o índice de sedimentação (s^2/m) foi calculado assim como na equação 1. Nota-se que o volume e o comprimento foram adequados para as unidades necessárias para sua utilização na equação 1 (m^3 e m, respectivamente).

$$IS = \frac{Vol^2}{Q^2 L} = \frac{(7,3 \cdot 10^6)^2}{Q^2 \cdot 3000} = \frac{1,78 \cdot 10^{10}}{Q^2} \text{ s}^2/\text{m} \quad (15)$$

A vazão Q a ser utilizada na fórmula condiz com a vazão total na sub-bacia do Bom Jardim. Desta forma, a eficiência pôde ser calculada com erros estatísticos em torno de

5% independentemente de propriedades de sedimentos, pela equação 16. (Van Rijn, 2013)

$$E = \frac{-20 + 0,95 \cdot IS^{0,63}}{7500 + IS^{0,63}} \quad (16)$$

Assim, o valor de E foi calculado em porcentagem. Conforme já citado no item 2.1.1, os resultados obtidos serão satisfatórios se, ao realizar um gráfico de E x IS, a curva representada deve ter comportamento semelhante ao da curva de Churchill, exibido na Figura 1.

3.2.3.2. Cálculo da Eficiência de Retenção pelo Método de Brune

Seguindo a mesma linha de raciocínio para o cálculo de E por Churchill, o método de Brune consiste em comparar um gráfico calculado com o gráfico de Brune, exibido anteriormente (Figura 2).

Para o cálculo, são necessários o volume do reservatório e o volume afluente do reservatório (V_{afl}). O volume é constante, $7,3 \text{ hm}^3$ ou $7,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. O volume afluente foi calculado com ajustes de unidades, ajeitando a soma de vazões de m^3/s para m^3/ano . Como o valor deste volume é variável mensalmente, esta é a variável principal para o cálculo da capacidade de afluência.

A capacidade de afluência, assim como o índice de sedimentação em Churchill, é um parâmetro a ser calculado para ser plotado relacionando-se ao E calculado e observando a semelhança com o gráfico de Brune. Diferentemente do IS, o Ca_{fl} é calculado conforme a equação 2.

$$Ca_{fl} = \frac{V_{res}}{V_{afl}} = \frac{7,3 \cdot 10^6}{(3,15 \cdot 10^7) \cdot Q} = \frac{0,2315}{Q} \quad (17)$$

Segundo VAN RIJN (2013), a eficiência de retenção pode ser calculada com erros estatísticos em torno de 10% independentemente de propriedades de sedimentos, pela equação 18.

$$E = \frac{0,000085 + Ca_{fl}^{1,1}}{0,0085 + Ca_{fl}^{1,1}} \quad (18)$$

Desta, o valor de E foi calculado em porcentagem. Os resultados obtidos serão satisfatórios se, ao realizar um gráfico de E x Cafl, a curva representada deve ter comportamento semelhante ao da curva de Brune, exibido na Figura 2.

3.2.4. Cálculo da massa de sedimentos depositada no reservatório

De acordo com o item anterior, a eficiência de retenção depende do volume e das vazões que afluem ao reservatório, as quais injetam descargas de massa de sedimentos em seu interior. Dessa forma, conhecendo-se as descargas sólidas de entrada e a eficiência de retenção, pode-se estimar a massa que fica retida no fundo do reservatório, de acordo com:

$$M^k = Q_s^k \cdot E^k \quad (18)$$

M^k = massa depositada no mês k;

Q_s^k = descarga sólida no mês k;

E^k = eficiência de retenção no mês k. Nessa equação, E^k é utilizado em fração (de 0 a 1) e não em porcentagem.

Nota-se que, no presente trabalho, o intervalo de cálculo ocorre em escala mensal.

3.2.5. Cálculo dos volumes de depósito no reservatório

A relação entre a massa dos depósitos e seu volume é calculada simplesmente pela massa específica (ρ) dos mesmos:

$$Vol^k = M^k / \rho \quad (19)$$

Todavia, em função da sedimentação ocorrer ao longo dos meses, dentro de horizontes de vários anos, é natural que a compactação amplie a massa específica dos depósitos mais antigos, de forma que este valor também deverá ter variação temporal, ou seja $\rho = \rho^k$.

O estudo do volume sedimentado no reservatório requer análises sobre os grãos depositados, dentre estas, análises granulométricas são importantes para quantificar os parâmetros necessários para o cálculo do volume assoreado.

A massa de sedimentos afluyente (M), calculada na equação 20 (em toneladas), é uma das variáveis importantes para o cálculo do volume assoreado. Como já foi calculado o valor da carga diária do reservatório, foi possível calcular o valor da massa com um ajuste de unidades.

$$M = 30 \cdot \Sigma Q_s \quad (20)$$

Além de saber o valor em toneladas da massa total assoreada, outro parâmetro a ser calculado é a massa específico (ρ). Para o cálculo deste, deve-se aplicar o estudo das frações granulométricas de areia, silte e argila contidas nessa massa assoreada.

O cálculo da massa específica aparente média utilizada foi apresentado por Carvalho (1994), sendo realizado conforme o tipo de operação do reservatório (tabela 4) com as fórmulas apresentadas nas equações 21, 22 e 23.

$$\rho_i = W_c \cdot P_c + W_m \cdot P_m + W_s \cdot P_s \quad (21)$$

$$K = K_c \cdot K_c + K_m \cdot K_m + K_s \cdot K_s \quad (22)$$

$$\rho_T = \rho_i + K \cdot \log(T/12) \quad (23)$$

ρ_i = massa específica aparente inicial (t/m^3);

W_c, W_m, W_s = coeficientes de compactação de argila, silte e areia, respectivamente;

P_c, P_m, P_s = frações de quantidade de argila, silte e areia contidas no sedimento;

ρ_T = massa específica aparente média em T anos (t/m^3);

T = tempo de compactação do sedimento depositado (meses);

K_c, K_m, K_s = constantes que dependem da granulometria do sedimento.

Tabela 4 – Tipo de operação do reservatório

Tipo	Operação de Reservatório
1	Sedimento sempre ou quase sempre submerso
2	Depleção do sedimento de pequena média
3	Reservatório de significativas variações de níveis
4	Reservatório normalmente vazio

Fonte: Adaptado de Strand (1974) apud Carvalho *et al.* (2000)

Os valores de W e K estão contidos na tabela 5.

Tabela 5 – Constantes W e K em função do tipo de operação do reservatório

Tipo	Argila Wc	Argila Kc	Silte Wm	Silte Km	Areia Ws
1	0,416	0,2563	1,121	0,091	1,554
2	0,561	0,1346	1,137	0,029	1,554
3	0,641	0	1,153	0	1,554
4	0,961	0	1,169	0	1,554

* As constantes K para areia são nulas para todos os tipos de operação

Fonte: Adaptado de Strand (1974) apud Carvalho *et al.* (2000)

4. Resultados

Os resultados descritos neste capítulo seguem os dois eixos principais estabelecidos neste trabalho. Assim, primeiramente serão apresentados os resultados que culminaram na equação de regionalização de vazões específicas para as 9 bacias fonte. Posteriormente, informados os resultados para as 5 sub-bacias alvo, as quais injetam descargas de sedimentos no reservatório, contribuindo para seu assoreamento ao longo do tempo. Todos os cálculos realizados neste item foram utilizados em planilhas do Excel.

4.1. Análises das bacias fonte

4.1.1. Correlações entre as vazões específicas e a precipitação mensal

As 9 bacias alvo, selecionadas na vizinhança do reservatório do Bom Jardim, apresentam áreas variáveis entre 17,52 km² (estação Pontilhão, no rio Bagagem) e 1510 km² (estação Fazenda Paraíso, no rio Tijuco). Estas dimensões cobrem o intervalo de áreas para as 5 sub-bacias alvo, contribuintes diretas do reservatório. Diante da vizinhança e do intervalo de áreas compatível, pressupõe-se que as equações de regionalização aqui obtidas devem representar satisfatoriamente as vazões específicas dos tributários do reservatório.

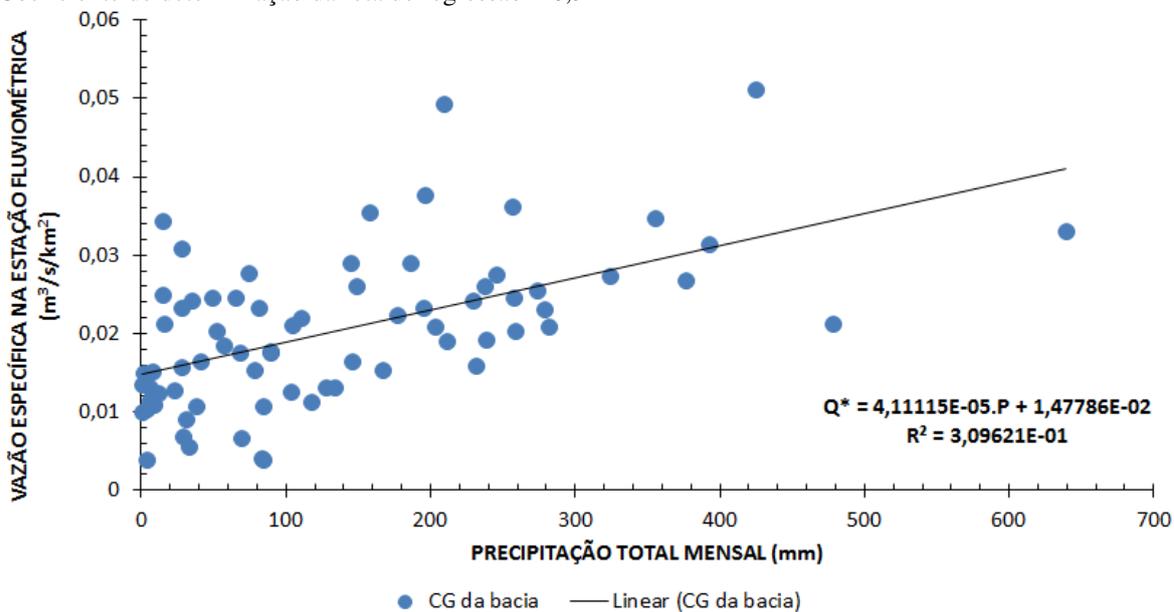
Os resultados serão apresentados por ordem crescente de área das bacias de contribuição. Com intuito de verificar a correlação entre os resultados de Q^* e P , a Figura 13 apresenta gráficos de dispersão dessas variáveis.

Figura 13 – Gráficos de dispersão entre a vazão específica (na estação fluviométrica) e a precipitação total mensal (no centróide da bacia)

(a) Estação Pontilhão – rio Bagagem (A = 17,52 km²)

Coefficiente de correlação = 0,56

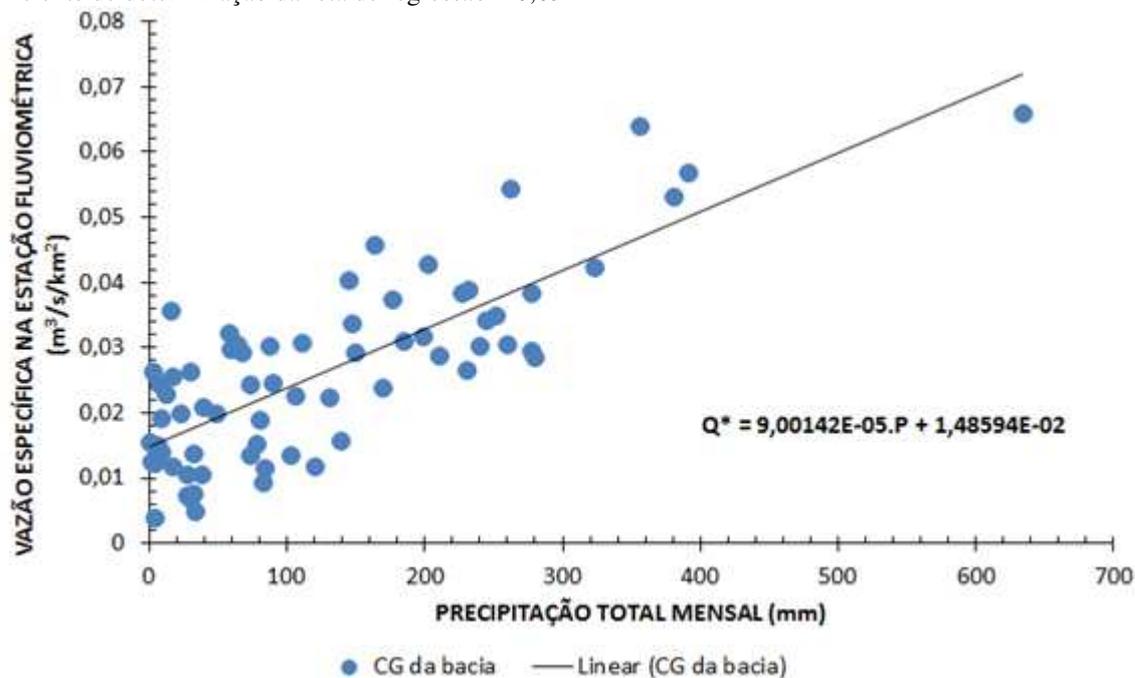
Coefficiente de determinação da reta de regressão = 0,31



(b) Estação COPASA, na cidade de Iraí de Minas – rio Bagagem (A = 91 km²)

Coefficiente de correlação = 0,796

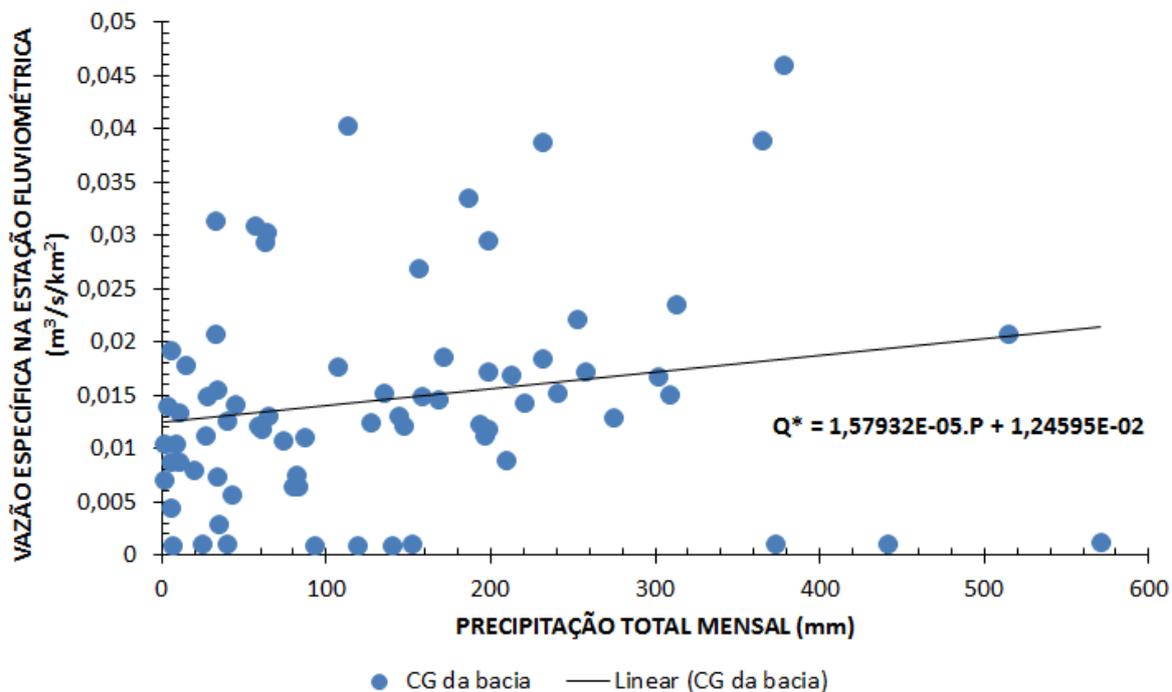
Coefficiente de determinação da reta de regressão = 0,63



(c) Estação Ponte Velha, Romaria – rio Bagagem (A = 262,42 km²)

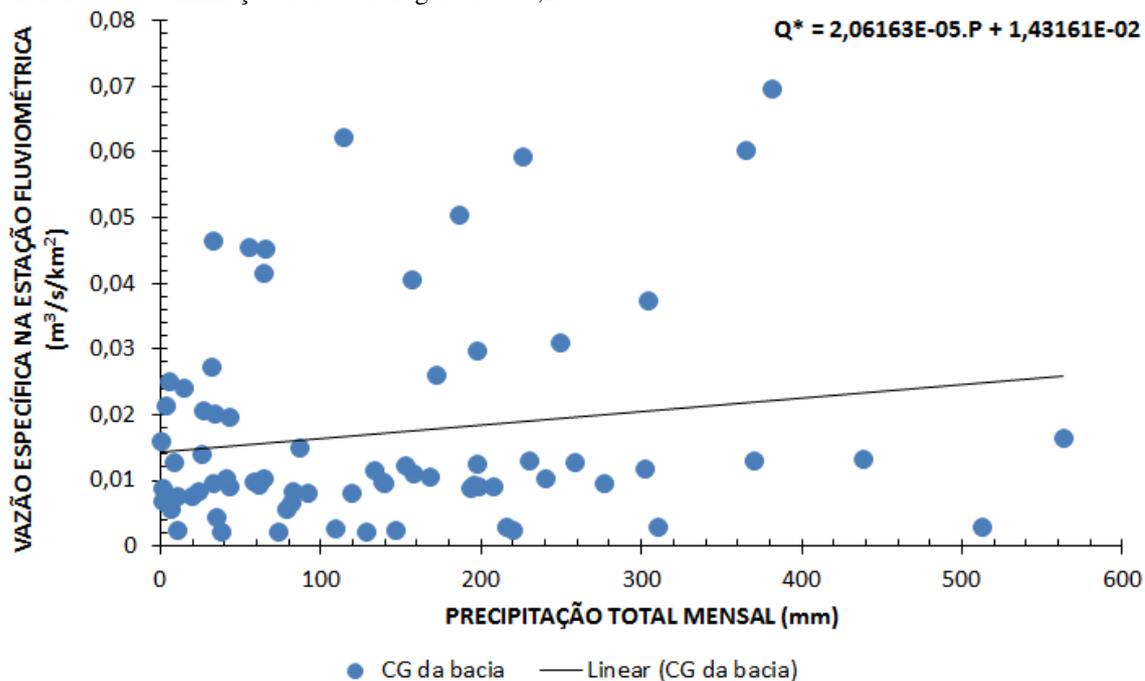
Coeficiente de correlação = 0,196

Coeficiente de determinação da reta de regressão = 0,38

**(d) Estação Israel – rio Bagagem (A = 289,95 km²)**

Coeficiente de correlação = 0,16

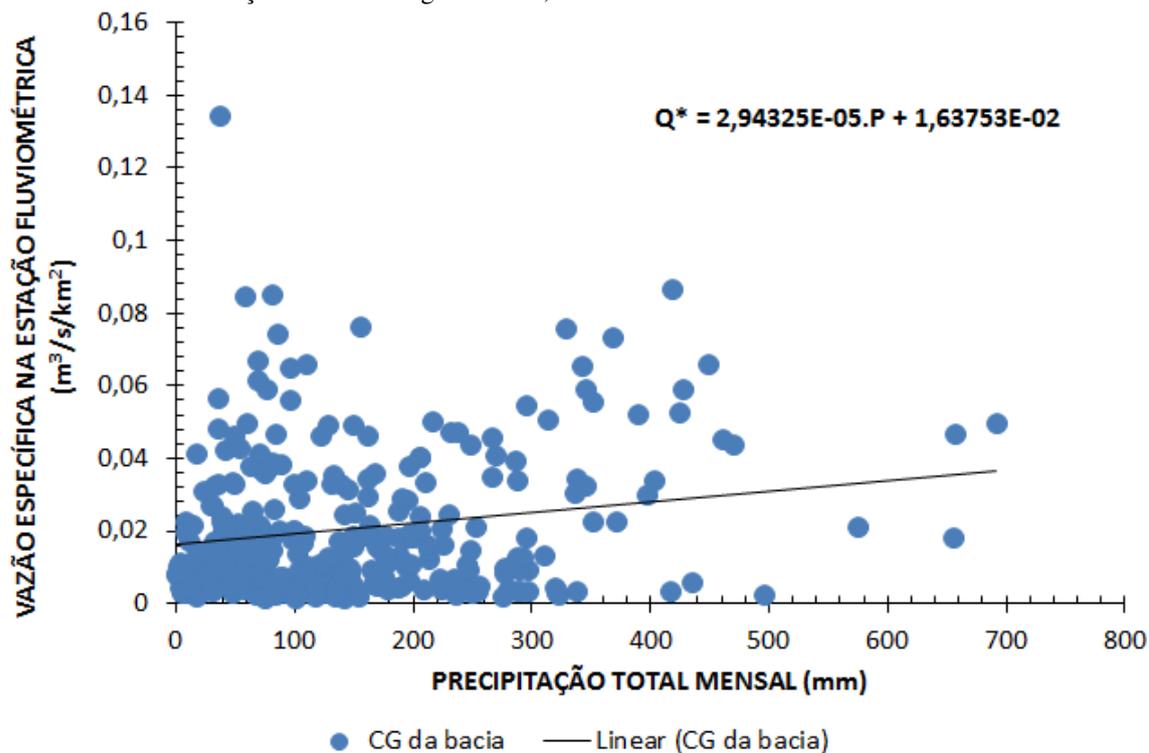
Coeficiente de determinação da reta de regressão = 0,27



(e) Estação Uberaba – rio Uberaba (A = 566 km²)

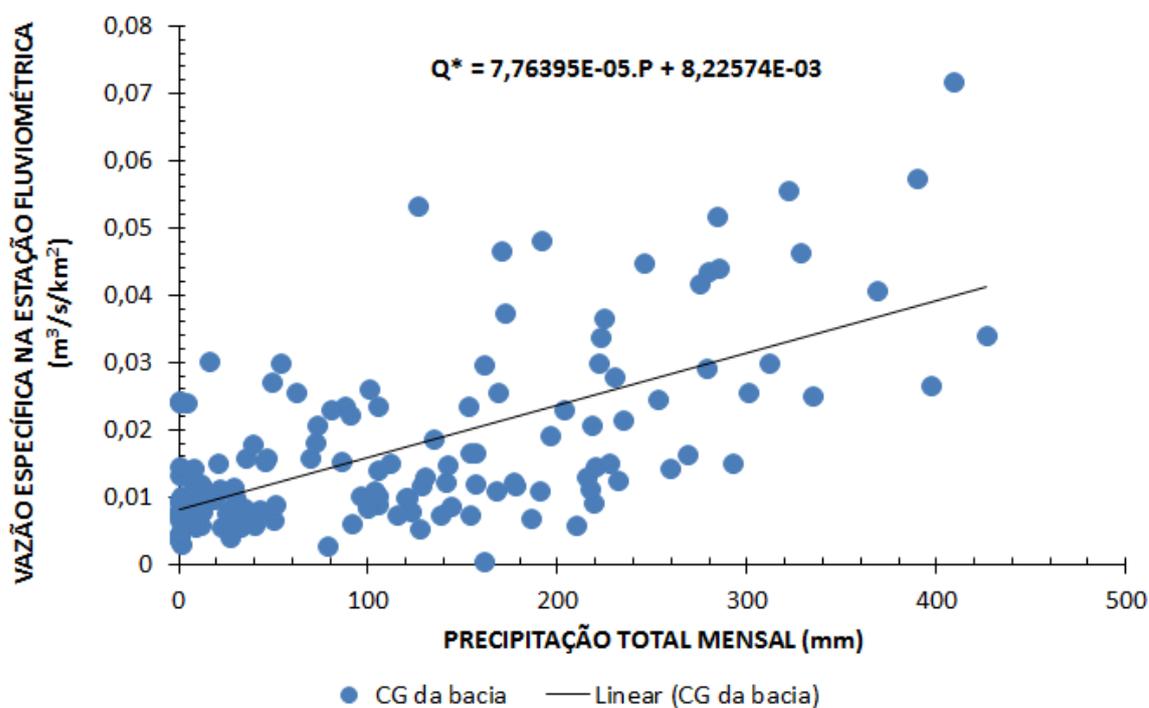
Coeficiente de correlação = 0,185

Coeficiente de determinação da reta de regressão = 0,34

**(f) Estação Sucupira – rio Uberabinha (A = 716 km²)**

Coeficiente de correlação = 0,64

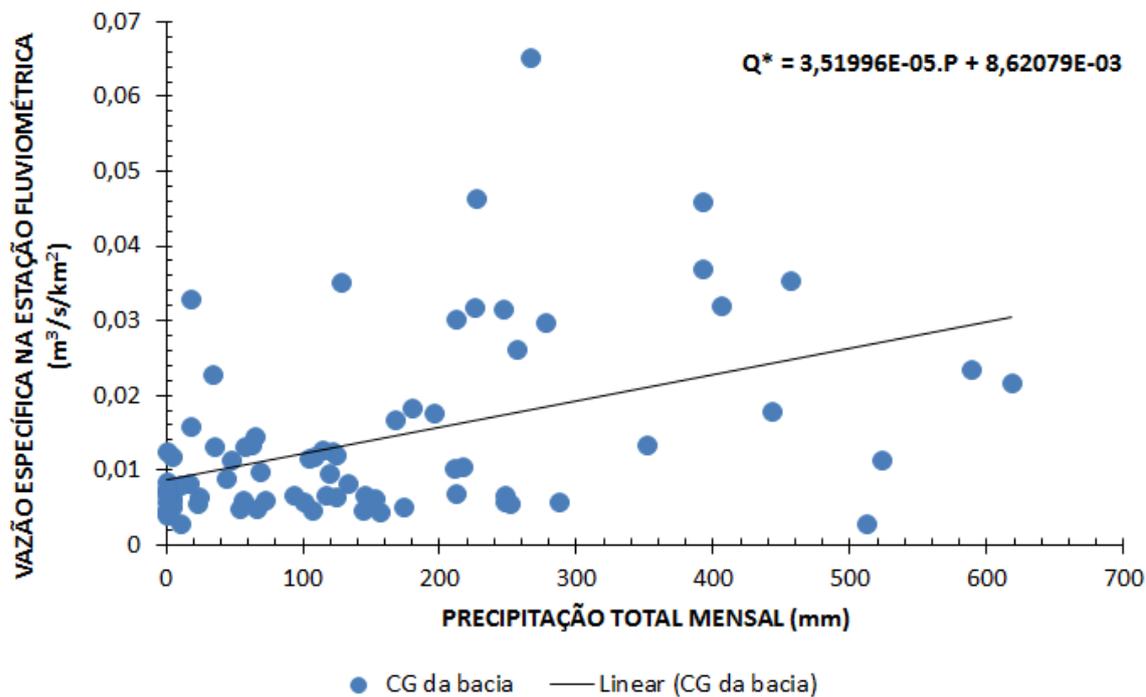
Coeficiente de determinação da reta de regressão = 0,416



(g) Estação Ponte Preta – rio Jordão (A = 762 km²)

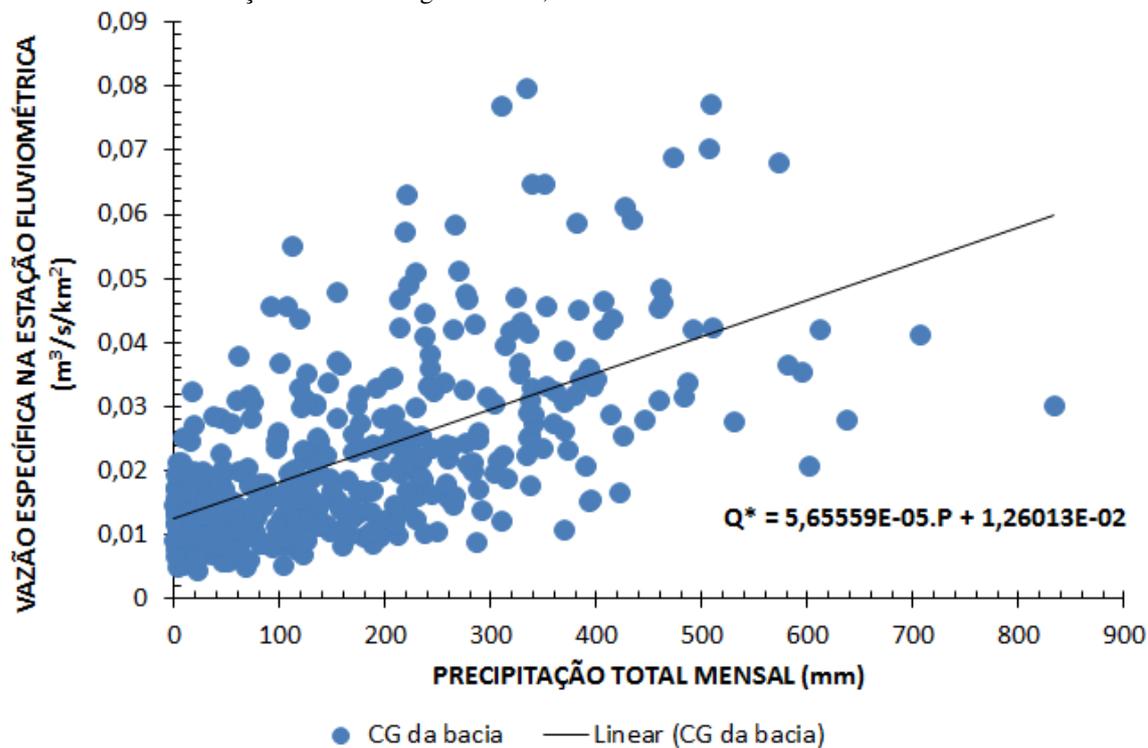
Coeficiente de correlação = 0,44

Coeficiente de determinação da reta de regressão = 0,198

**(h) Estação Ponte da Antinha – rio Capivara (A = 1270 km²)**

Coeficiente de correlação = 0,608

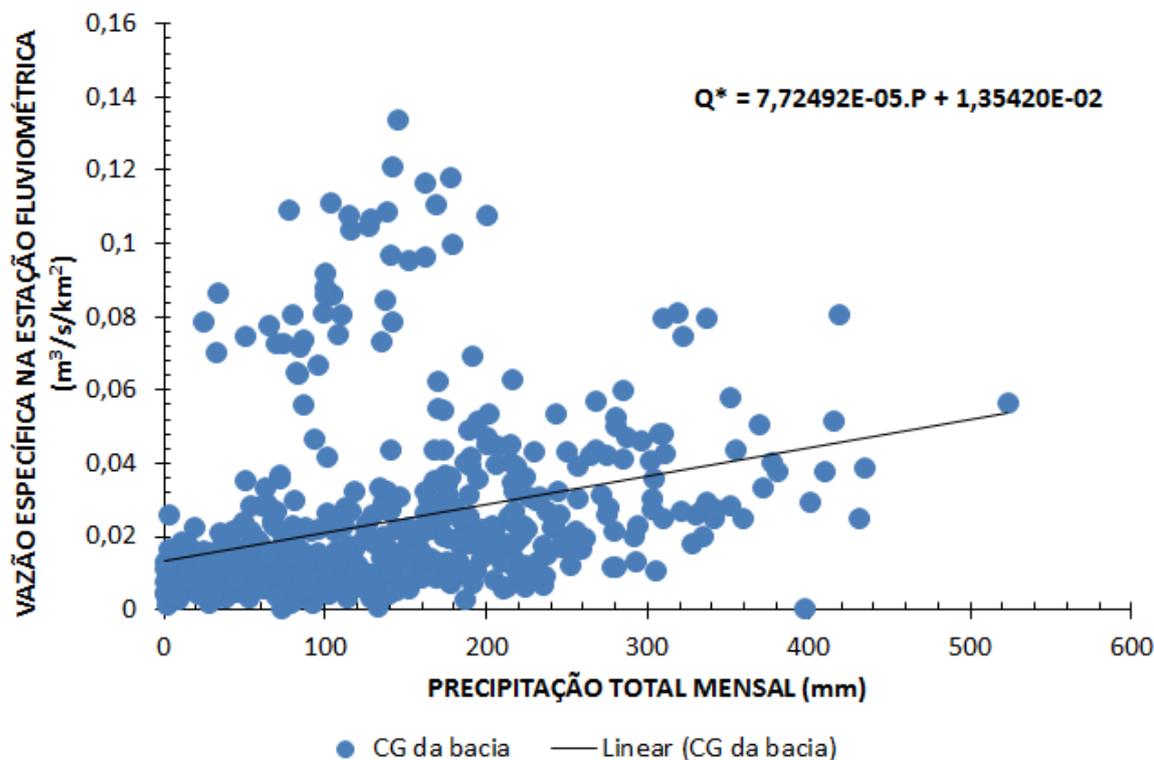
Coeficiente de determinação da reta de regressão = 0,37



(i) Estação Fazenda Paraíso – rio Tijuco (A = 1510 km²)

Coeficiente de correlação = 0,315

Coeficiente de determinação da reta de regressão = 0,10

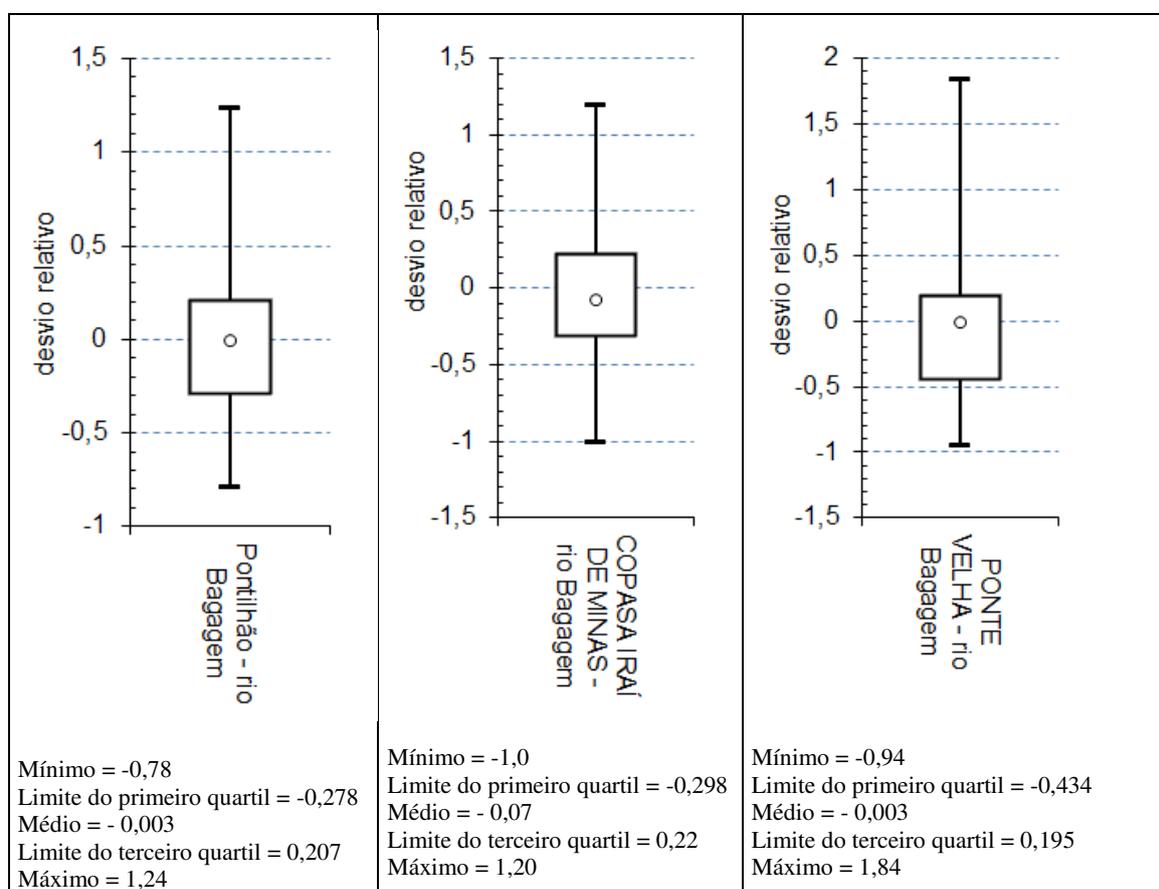


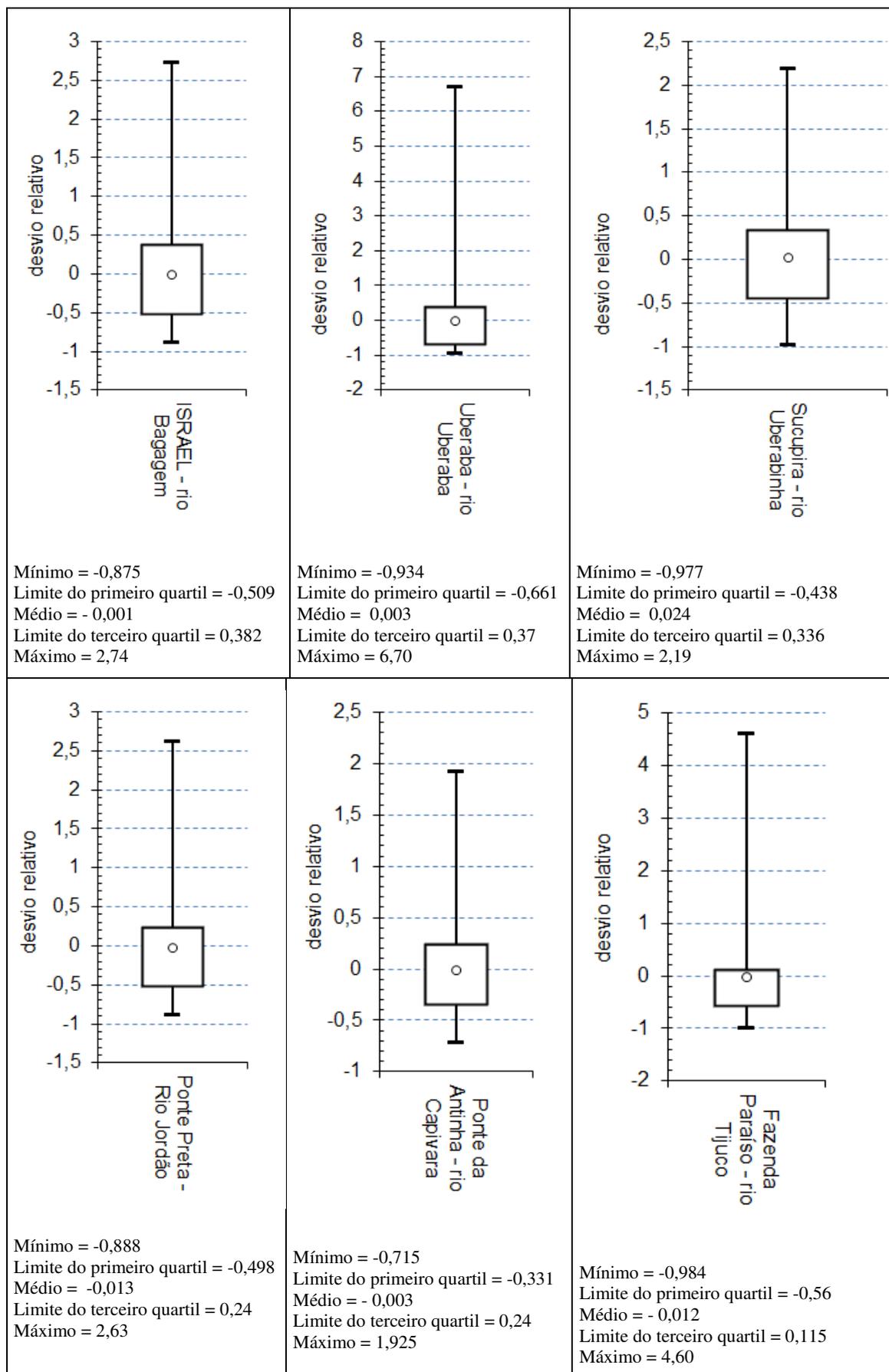
As correlações entre Q^* e P assumem intervalos variados. Os resultados indicam correlação forte (entre 0,7 e 0,9) para a estação COPASA ($r = 0,796$), no rio Bagagem. Há ainda correlações moderadas (entre 0,5 e 0,7) para as estações Pontilhão ($r = 0,56$ – rio Bagagem), Sucupira ($r = 0,64$ – rio Uberabinha), Ponte da Antinha ($r = 0,608$ – rio Capivara). As correlações encontradas são fracas (entre 0,3 e 0,5) para as estações Ponte Preta ($r = 0,44$ – rio Jordão) e Fazenda Paraíso ($r = 0,315$ – rio Tijuco). As correlações foram desprezíveis (entre 0 e 0,3) para as estações Ponte Velha ($r = 0,196$ – rio Bagagem), Israel ($r = 0,16$ – rio Bagagem), Uberaba ($r = 0,185$ – rio Uberaba). Quanto mais próximos de 1 forem os coeficientes de correlação, mais acentuada é a tendência de variação linear entre as variáveis. De todas as estações, a Sucupira, localizada no rio Uberabinha, é a mais próxima do reservatório do Bom Jardim. Nota-se que, para esta estação, a correlação $Q^* \times P$ é moderada, sugerindo que as retas de regressão podem funcionar como guias para embasar uma equação de regionalização. Neste caso, é preciso criar uma regra de flutuação dos pontos acima ou abaixo dessas retas. Esta regra baseou-se no cálculo das curvas de permanência e dos desvios relativos.

4.1.2. Desvios relativos e curvas de permanência dos desvios

Os desvios relativos correspondem a flutuações adimensionais em torno das retas de regressão de cada estação fluviométrica fonte. Assim, para que a reta de regressão represente adequadamente a relação $Q^* \times P$, é desejável que os grandes desvios relativos não apresentem resultados muito elevados. Para resumir estas informações, a Figura 14 ilustra os diagramas box-plot dos desvios relativos para as diversas estações fonte.

Figura 14 – Diagramas box-plot para os desvios relativos entre as vazões específicas e as precipitações mensais





Por uma breve análise geral dos diagramas plot-box, percebe-se que dos desvios relativos médios tendem a aproximar-se de zero em praticamente todas as estações fonte. Apesar dos desvios relativos máximos superarem em mais de 100% os valores preconizados pela reta de regressão, em 75% da amostra os desvios positivos não atingem 40% de flutuação. Ou seja, considerando cada estação, em apenas 25% dos dados há flutuações positivas acima de 40%. Por outro lado, os limites mínimos não chegam a atingir 100% de flutuação em torno da reta de tendência. De uma forma global, a despeito das flutuações mais extremas, que são a minoria dos casos, percebe-se que a linha de tendência linear pode atuar, senão como a função definitiva, pelo menos como uma função de base para a regionalização pretendida.

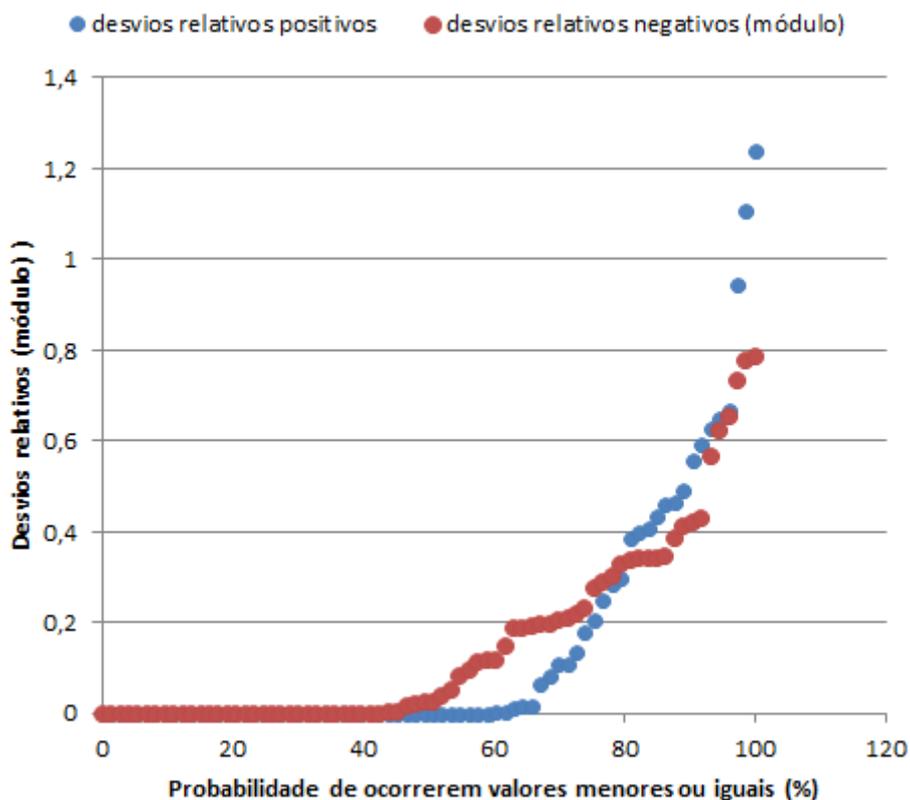
A regra de flutuação proposta neste trabalho baseia-se nos desvios relativos, positivos e negativos, com 80% de permanência. Ou seja, naqueles desvios que têm 80% de chance de serem, no mínimo, igualados. Para isto foram construídas as curvas de permanência destacadas na Figura 15.

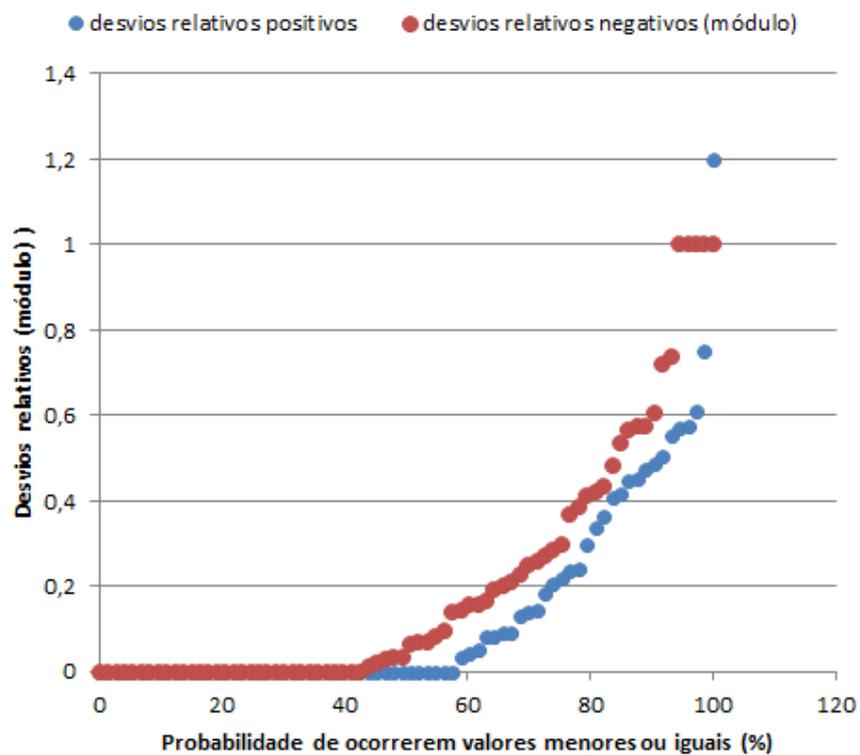
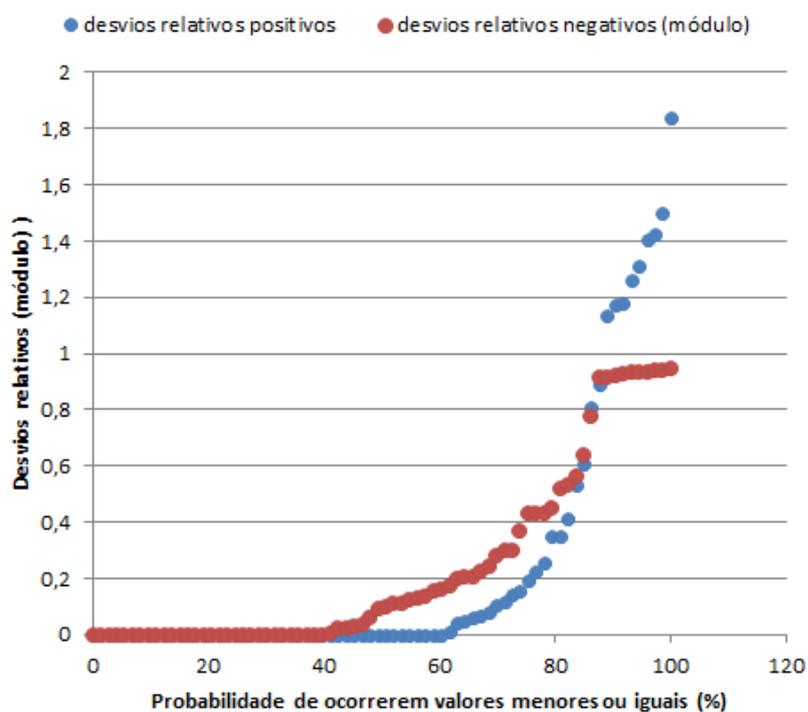
Figura 15 – Curvas de permanência dos desvios relativos

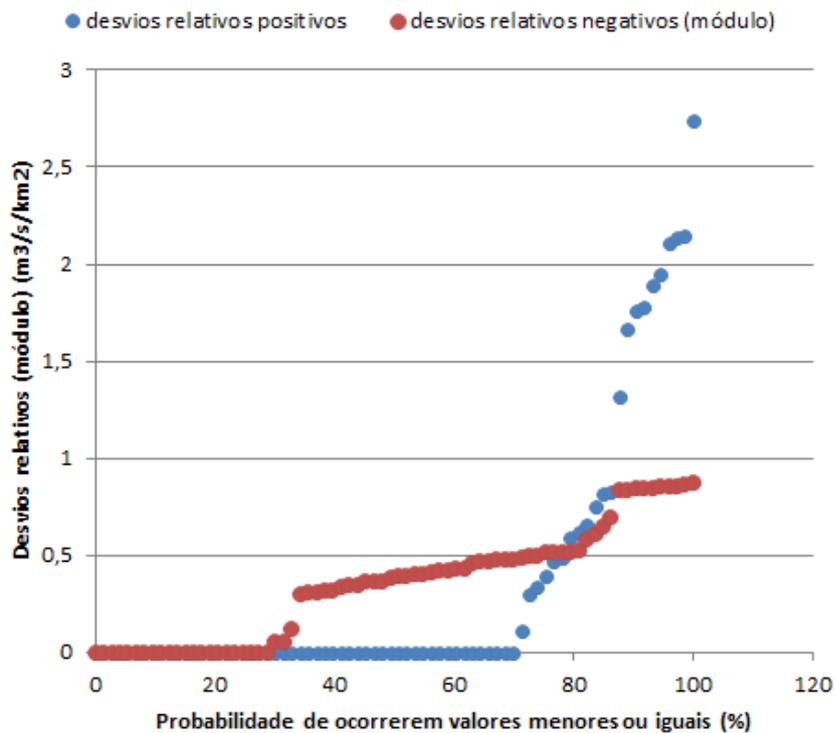
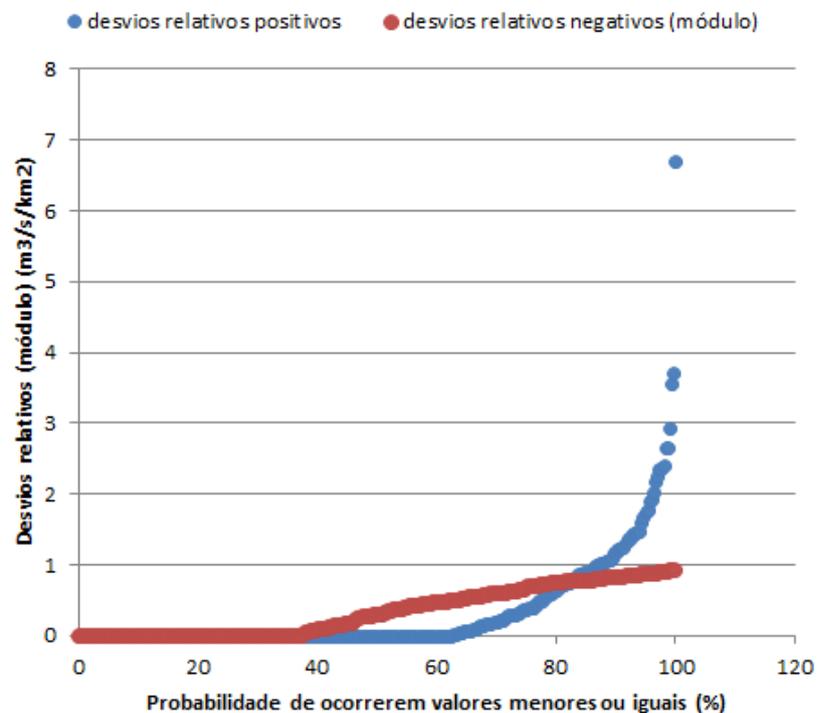
(a) Estação Pontilhão – rio Bagagem (A = 17,52 km²)

$D^+_{80} = 0,38$

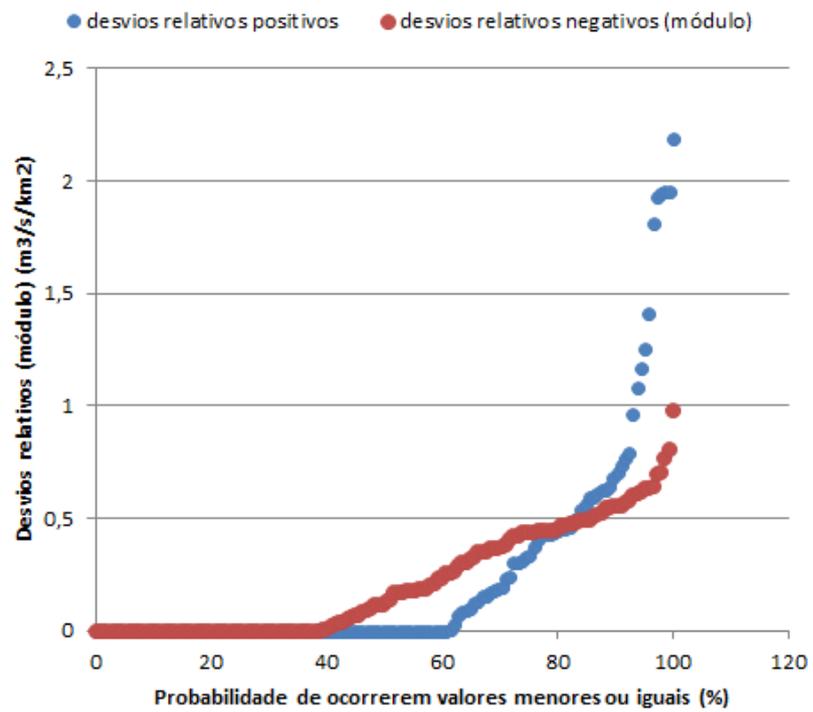
$D^-_{80} = 0,34$ (valor absoluto)



(b) Estação COPASA, na cidade de Iraí de Minas – rio Bagagem (A = 91 km²) $D_{80}^+ = 0,34$ $D_{80}^- = 0,42$ (valor absoluto)**(c)****(c) Estação Ponte Velha, Romaria – rio Bagagem (A = 262,42 km²)** $D_{80}^+ = 0,35$ $D_{80}^- = 0,52$ (valor absoluto)

(d) Estação Israel – rio Bagagem (A = 289,95 km²) $D_{80}^+ = 0,62$ $D_{80}^- = 0,52$ (valor absoluto)**(e) Estação Uberaba – rio Uberaba (A = 566 km²)** $D_{80}^+ = 0,64$ $D_{80}^- = 0,74$ (valor absoluto)**(f) Estação Sucupira – rio Uberabinha (A = 716 km²)** $D_{80}^+ = 0,45$

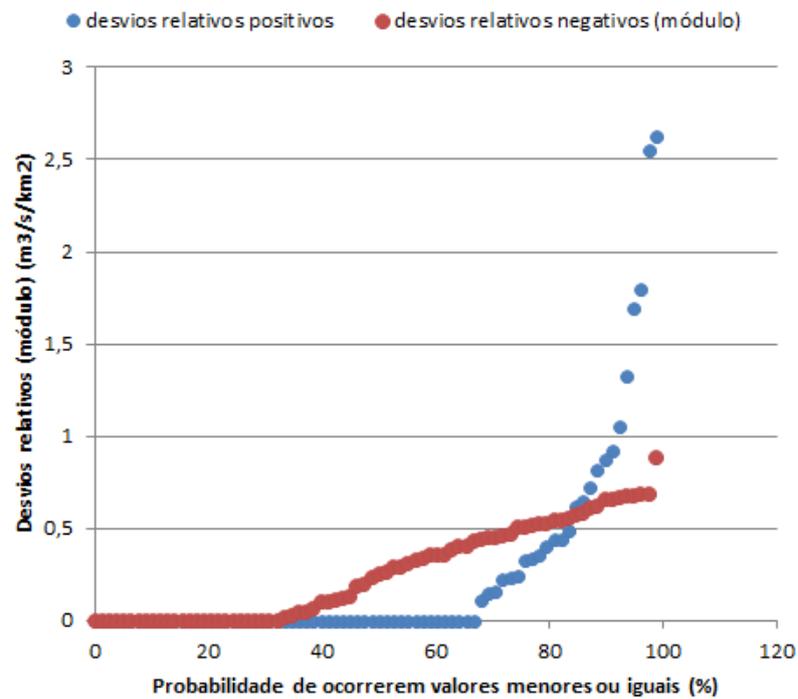
$D^-_{80} = 0,45$ (valor absoluto)

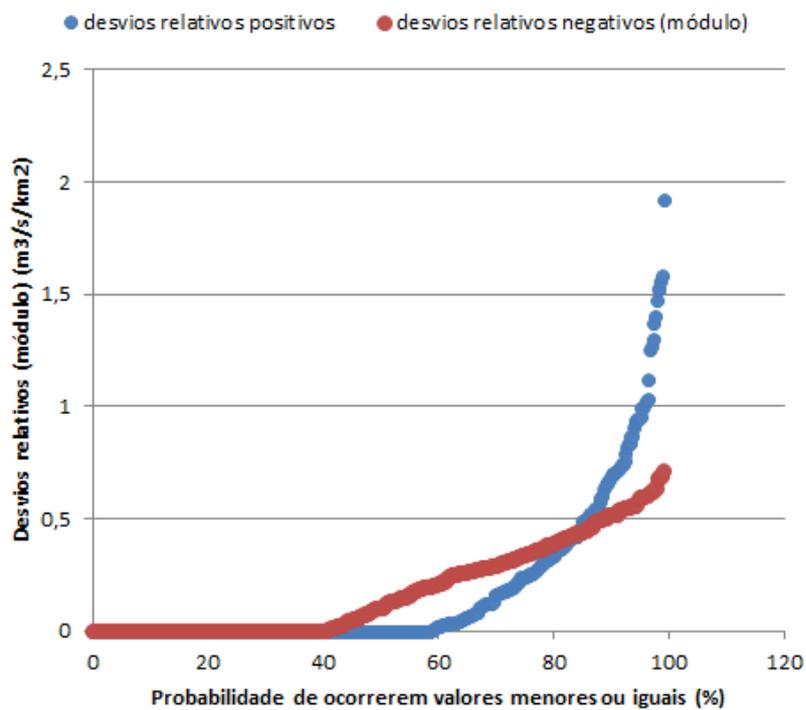
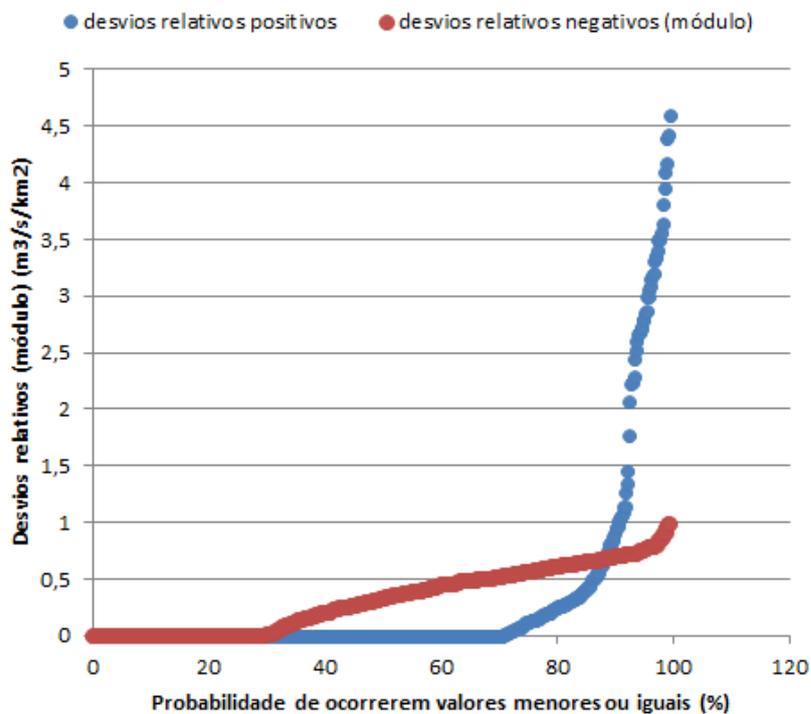


(g) Estação Ponte Preta – rio Jordão ($A = 762 km^2$)

$D^+_{80} = 0,44$

$D^-_{80} = 0,54$ (valor absoluto)



(h) Estação Ponte da Antinha – rio Capivara (A = 1270 km²) $D_{80}^+ = 0,35$ $D_{80}^- = 0,39$ (valor absoluto)**(i) Estação Fazenda Paraíso – rio Tijuco (A = 1510 km²)** $D_{80}^+ = 0,26$ $D_{80}^- = 0,61$ (valor absoluto)

Com esta análise de permanência, foi possível admitir duas hipóteses estatísticas, relativas a 80% de probabilidade de ocorrência: com máximos desvios e com médios. Nessas análises, foram retirados valores médios e máximos a serem utilizados para a construção da equação regional para as vazões específicas mensais. Os valores desses parâmetros são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Valores máximos e médios de desvios relativos a 80% de probabilidade de ocorrência

D^+_{80}	D^-_{80}
DESVIO RELATIVO MÉDIO +	DESVIO RELATIVO MÉDIO -
0,424935308	0,5042592
MAIOR DESVIO RELATIVO +	MAIOR DESVIO RELATIVO -
0,638494733	0,744480858

Fonte: Autor (2018)

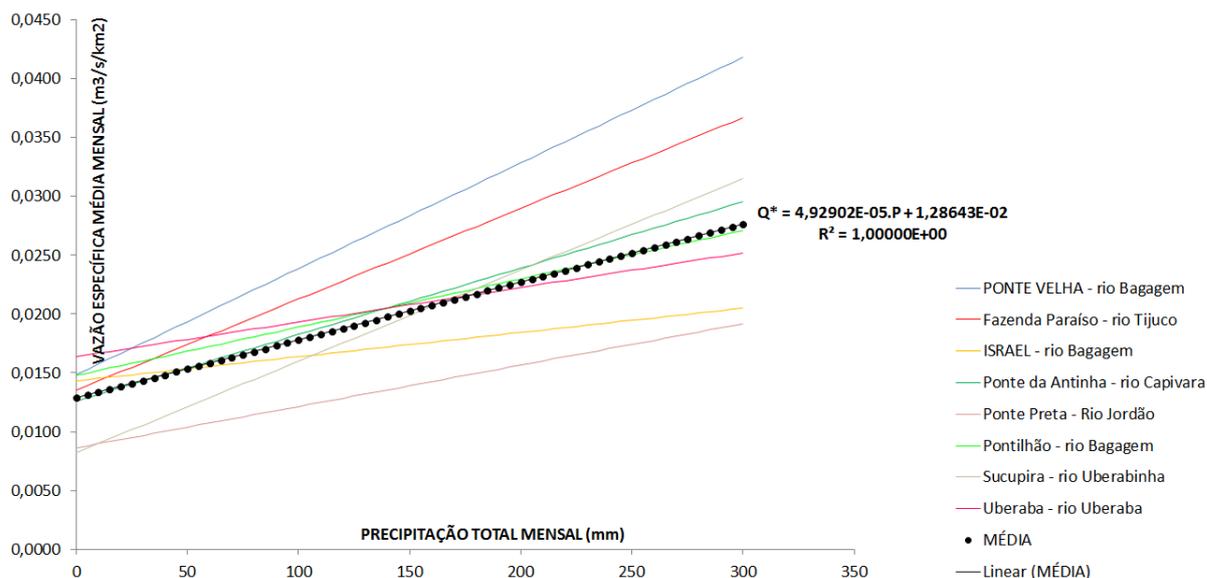
4.2. Análises das bacias alvo

Neste item serão apresentados os dados de vazões regionalizadas e de descargas de sedimentos a partir das 5 sub-bacias contribuintes diretamente para o reservatório do Bom Jardim. Na parte final, serão apresentados os resultados da evolução do assoreamento nesse corpo de água.

4.2.1. Equação regional para a vazão específica

A equação regionalizada que expressa a variação de Q^* versus P possui a reta de regressão como função de base, mas introduz os desvios relativos máximos e médios, com 80% de permanência, como a amplitude máxima das flutuações em torno dessa reta. Como foram analisadas 9 estações fluviométricas, optou-se por utilizar uma reta de regressão média entre essas estações. A Figura 16 ilustra as retas de regressão, bem como a reta média para as nove estações.

Figura 16 – Reta de regressão média para as nove estações fluviométricas analisadas



Evidenciados esses valores, foi calculada a vazão específica (Q^*), em $m^3/s/km^2$, pela reta média de regressão linear, com introdução de números aleatórios que regulam as flutuações. As equações para esse cálculo são evidenciadas a seguir. Para os máximos desvios relativos com 80% de probabilidade de ocorrência, são usados os valores da Tabela 6 e da função Fre (equação 23).

$$Q^* = Fre + [(D_{80}^+, máx) * Fre * (aleatório)] - [(D_{80}^-, máx) * Fre * (aleatório)] \quad (21)$$

Da mesma forma, para os médios desvios, são utilizados os mesmos parâmetros.

$$Q^* = Fre + [(D_{80}^+, méd) * Fre * (aleatório)] - [(D_{80}^-, méd) * Fre * (aleatório)] \quad (22)$$

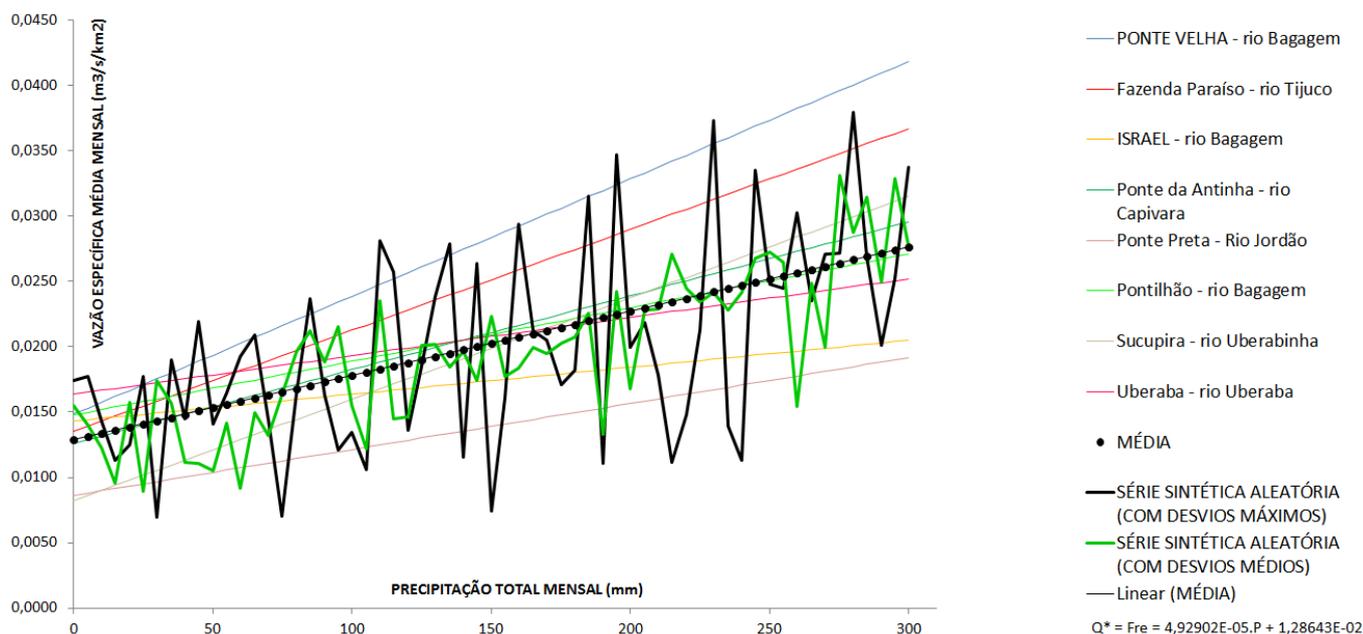
Nas equações, o dado (aleatório) se refere à um número aleatório entre 0 e 1, conforme função do Excel. Este valor confere a relatividade dos desvios por conta das estatísticas realizadas. O uso dessa função requer cautela e atenção, pois a cada modificação realizada no arquivo trabalhado, todas as células que contém valores aleatórios são editadas. Sendo assim, para cada edição, salvamento ou correção, todos os valores serão automaticamente editados. Finalmente, Fre refere-se à reta média de regressão, expressa como:

$$Fre, i = 0,0000492902 * P, i + 0,0128643 \quad (23)$$

P, i = precipitação total no mês i . O cálculo de Fre resultam em valores de unidade $m^3/s/km^2$.

Os resultados dessas equações regionais fornecem padrões conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Variações Q^* x P decorrente da aplicação das funções regionais para desvios relativos máximos e médios, com 80% de permanência.



Nota-se que as funções de regionalização que utilizam os desvios máximos apresentam flutuações de maior amplitude, gerando vazões específicas que, em alguns casos, chegam a superar as envoltórias das linhas de tendência individuais das estações. As funções de regionalização que utilizam as médias dos desvios de cada estação fornecem variações mais contidas. Na análise de assoreamento do reservatório, estas duas opções serão verificadas e aplicadas para as 5 sub-bacias alvo.

Para o ribeirão Bom Jardim, o referencial pluviométrico utilizado para imposição da série de chuvas foi a estação Fazenda Letreiro, já utilizada nos cálculos anteriores, por ser a mais próxima a cidade de Uberlândia com dados já conhecidos. Foram utilizados os dados de 600 meses, os mesmos já trabalhados no estudo de regionalização.

O referencial pluviométrico Fazenda Letreiro foi utilizado para o cálculo da função regionalização (Fre) apresentada neste item.

4.2.2. Equação regional para as descargas de sedimentos

O próximo cálculo refere-se à carga específica de sedimentos afluentes ao reservatório (Q^*s), em t/dia/km². A equação realizada para Q^*s foi retirada do estudo individual de

cada uma das 5 sub-bacias alvo, onde foram realizados gráficos relacionando as vazões com as cargas específicas, que nada mais são que as curvas-chave de carga específica de sedimentos. Da sub-bacia geral do reservatório, extraída do trabalho de Martins (2018), foi retirada a linha de tendência polinomial, de ordem 2.

$$Q_s^* = 0,6767849 * (Q^*)^2 + 7,000224 * (Q^*) \quad (24)$$

Q^* = vazão específica em $m^3/s/km^2$.

4.2.3. Granulometria dos sedimentos depositados

No estudo do reservatório Bom Jardim, Martins (2018) coletou sedimentos de fundo afluentes e pontuais, realizando o estudo granulométrico que mostrou que havia grande abundância de partes de areia nas amostras, sendo que os valores somados de silte e argila não chegavam a 10% do total do sedimento. Desta forma, foram estimadas frações médias dos grãos para as posteriores construções de curvas-chave. Neste trabalho serão utilizadas as mesmas frações médias para os cálculos do peso específico, assim, as frações de areia, silte e argila são, respectivamente:

$$P_s = 96,71\% \quad P_m = 2,23\% \quad P_c = 1,06\%$$

4.2.4. Assoreamento do reservatório do Bom Jardim segundo os métodos de Churchill e de Brune

Para o cálculo da eficiência de retenção por Churchill, havia necessidade de ter em mãos o volume e o comprimento do reservatório, a vazão efluente no reservatório e o índice de sedimentação. Seguindo a mesma linha de raciocínio, para o método de Brune são necessários o volume do reservatório e o volume afluente do reservatório (V_{afl}). Como o valor deste volume é variável mensalmente, esta é a variável principal para o cálculo da capacidade de afluência.

Martins (2018) levantou curvas cota-volume e cota-área inundada e comparou os resultados com o contorno do reservatório, obtido a partir de imagens aéreas. Admitindo-se o nível d'água máximo na cota 804m, o volume obtido foi de 7,30 hm^3 . Além disso, o comprimento do reservatório foi estimado em 3 km, da crista da

barragem até o último ponto de divisor de águas relativo ao alcance da sub-bacia do Bom Jardim.

Nas Figuras 18 e 19 ilustram-se os gráficos de eficiência de retenção calculados por Churchill e Brune. Comparando-os com as figuras 1 e 2, é possível observar que o cálculo de E foi realizado de forma satisfatória.

Figura 18 – Curva E x IS calculados via método de Churchill

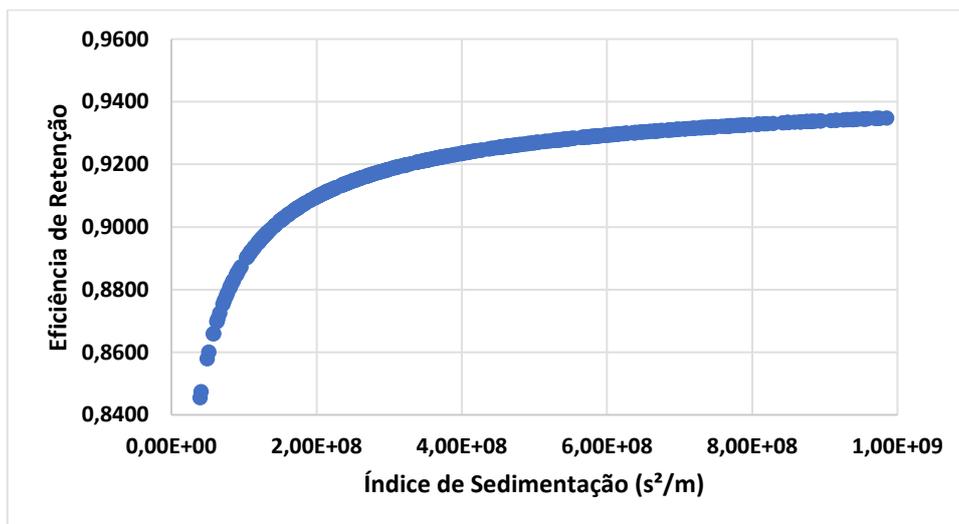
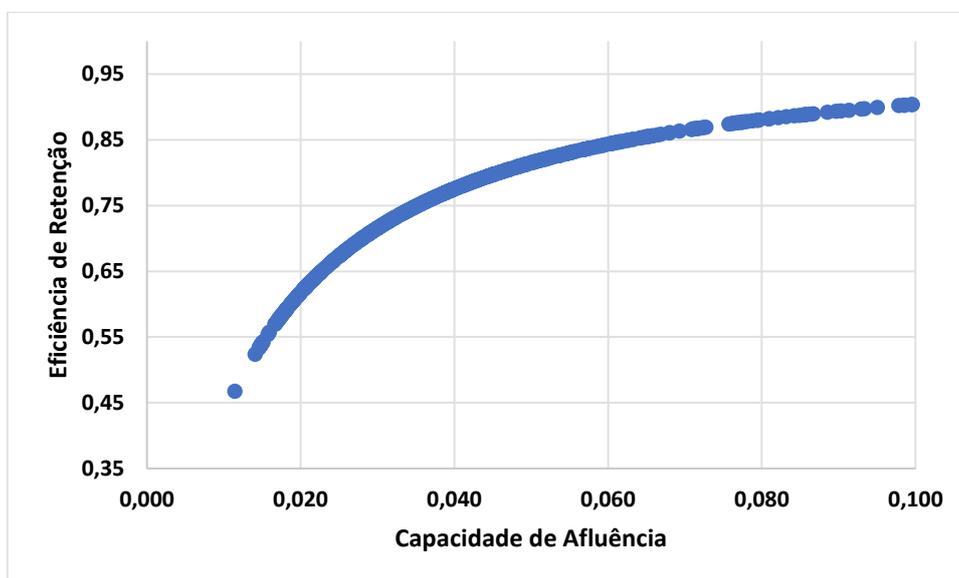


Figura 19 – Curva E x Cafl calculados via método de Brune



Nota-se que, na faixa de vazões afluentes simuladas, há variações nas eficiências de retenção para ambos os métodos. Nesse sentido, enquanto o método de Churchill fornece eficiências de retenção de sedimentos na faixa de 85% a 94%, o método de Brune apresenta a mesma variável na faixa de 45% a 90%. Isto indica que o método de

Churchill tende a prever cenários de assoreamento mais severos em relação ao método de Brune.

As precipitações mensais influenciam diretamente nas vazões e nas descargas de sedimentos que são injetadas no reservatório. Esta influência é matematicamente amarrada nas equações de regionalização de Q^* e Q_s^* , podendo ser observada nas Figuras 20 e 21. Neste trabalho, foram simulados 600 meses (50 anos), com entradas de precipitações mensais segundo os dados da estação Fazenda Letreiro, próxima do reservatório do Bom Jardim.

Figura 20 – Variações de chuva e de vazões afluentes ao reservatório

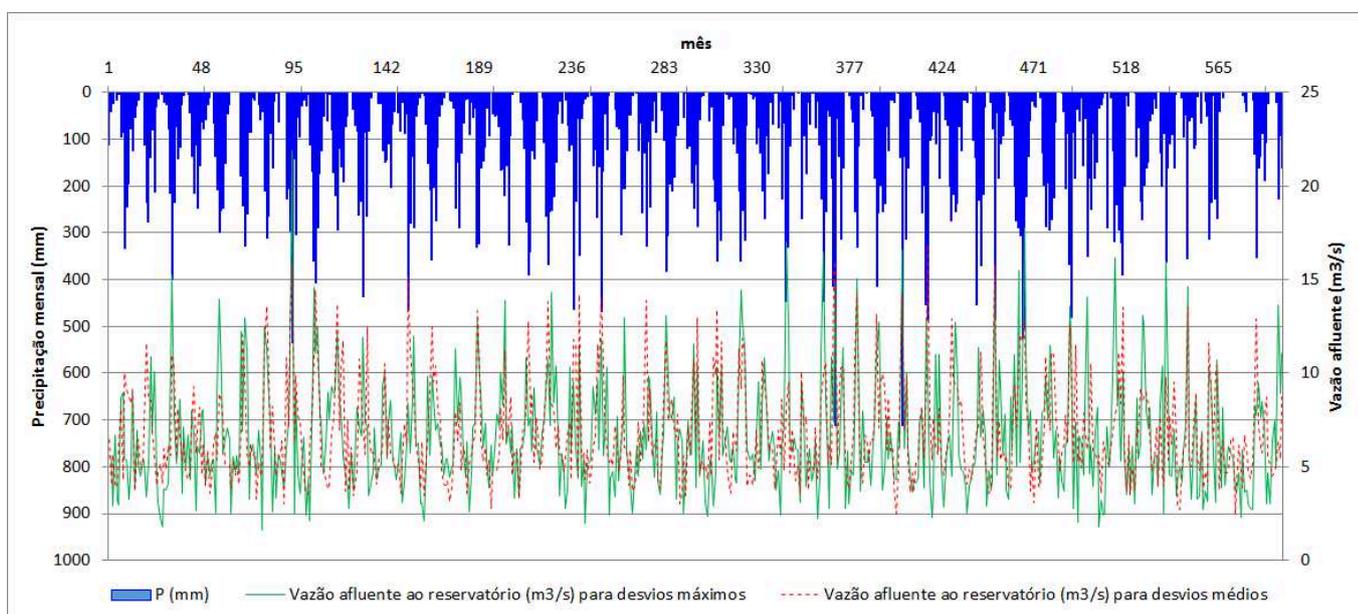
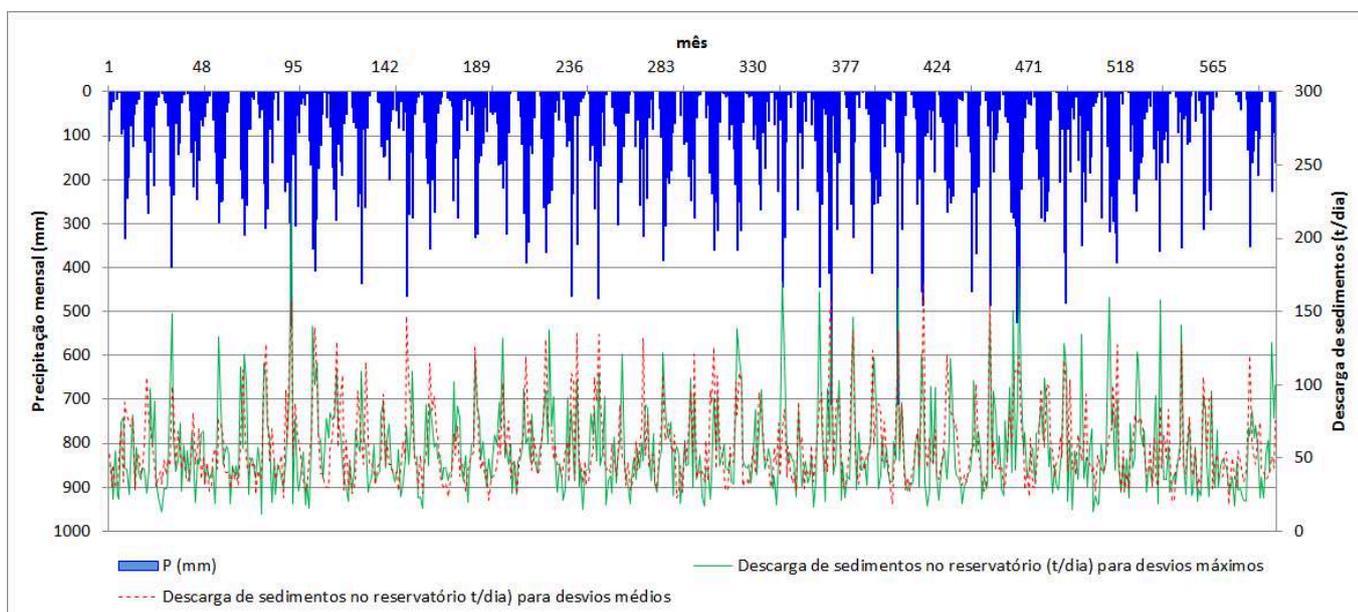


Figura 21 – Variações de chuva e de descargas de sedimentos afluentes ao reservatório



Nos gráficos de vazões e de descargas de sedimentos afluentes, é interessante notar que os picos de chuva induzem aos picos dessas variáveis. Note-se ainda que, ao considerar os desvios relativos máximos ou os desvios relativos médios, embora haja diferenças, não há muita discrepância na ordem de grandeza das vazões e das descargas sólidas. Isto indica a tendência de que as duas equações de regionalização deverão fornecer valores próximos de assoreamento.

Finalmente, os gráficos que mostram a evolução estimada do assoreamento são apresentados nas Figuras 22 e 23.

Vale lembrar que a função de regionalização de vazões utiliza uma reta de regressão e as flutuações em torno dessa reta. A magnitude dessas flutuações é definida por números aleatórios (de 0 a 1) que multiplicam os desvios relativos com 80% de probabilidade de ocorrência. Dependendo do valor desses números aleatórios, os quais são recalculados mensalmente, maiores ou menores deverão ser as amplitudes das flutuações de vazão específica. Isto reflete diretamente nas vazões e nas descargas de sólidos transportados para o reservatório. Por isso, diferentes simulações deverão gerar volumes depositados distintos. Neste trabalho, foram realizadas 15 simulações, tanto para o método de Churchill quanto para o método de Brune. As curvas de assoreamento ilustradas referem-se às médias dessas 15 simulações

Figura 22 – Evolução do assoreamento do reservatório do Bom Jardim segundo método de Churchill

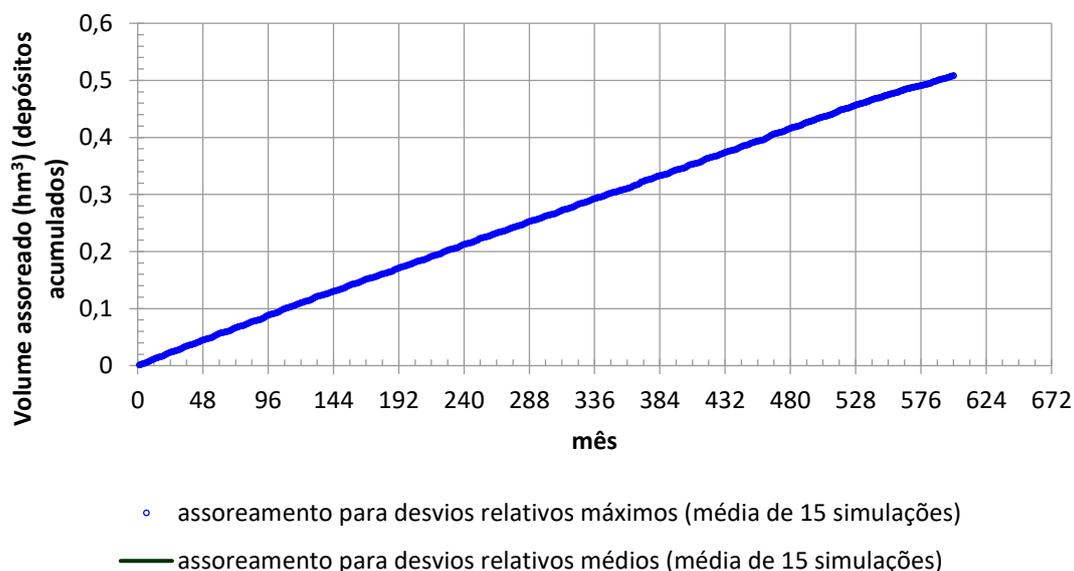
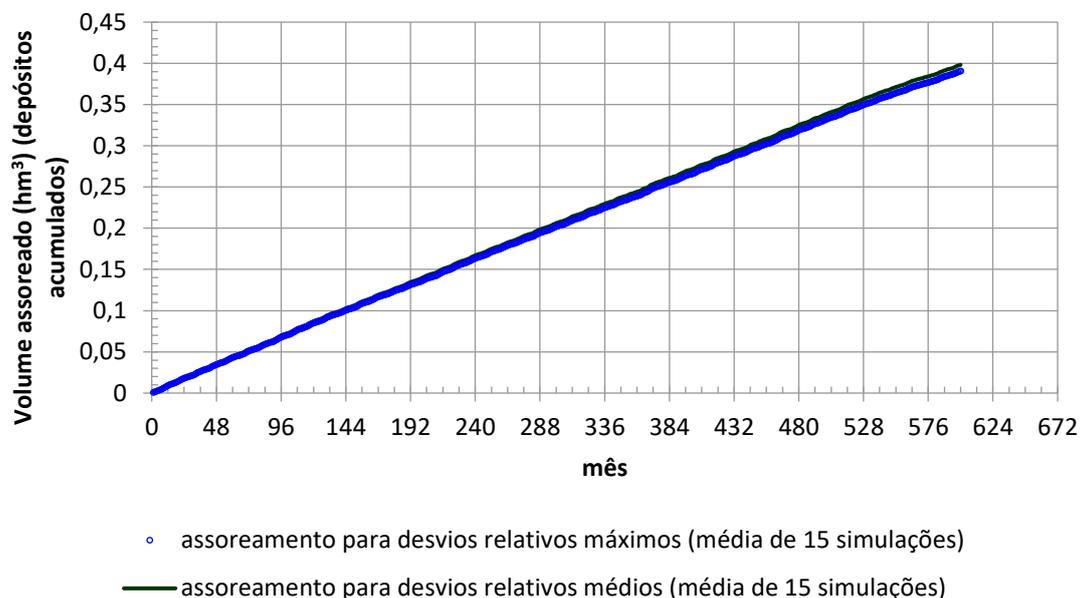


Figura 23 – Evolução do assoreamento do reservatório do Bom Jardim segundo método de Brune



Segundo estes resultados estimados, percebe-se que, no decorrer de 50 anos, o reservatório do Bom Jardim deverá perder aproximadamente $0,51 \text{ hm}^3$ de volume (segundo o método de Churchill). Todavia, as previsões por Brune são mais brandas e indicam perda de $0,40 \text{ hm}^3$ para o mesmo período. Apesar das diferenças, ambos os métodos fornecem uma faixa provável de assoreamento: entre $0,40$ e $0,51 \text{ hm}^3$ em 50 anos, ou taxas de $0,008 \text{ hm}^3/\text{ano}$ a $0,0102 \text{ hm}^3/\text{ano}$.

Martins (2018), ao apresentar a curva cota-volume do reservatório indicou o nível de água mínimo operacional na cota altimétrica 801 m. Na borda esquerda da barragem há um canal de derivação com 2m de profundidade, que veicula água para a casa de máquinas responsável pela adução até a estação de tratamento. Abaixo deste nível, o canal de derivação não mais conseguiria captar a água. Segundo a curva cota-volume do reservatório apresentada por Martins (2018), o volume morto, referente a quantidades abaixo da cota 801 m, é cerca de $1,9 \text{ hm}^3$.

Ao serem mantidas as taxas de assoreamento aqui estimadas, a previsão é que o reservatório possa ter seu volume útil afetado em horizontes de 186 a 237 anos. Segundo as simulações, somente após este longo intervalo, os volumes depositados de sedimentos poderiam atingir a base do canal de derivação. Isto se nenhuma operação de dragagem for realizada. Enfim, o reservatório do Bom Jardim deve operar com segurança em relação ao assoreamento. Todavia, a remoção de vegetação nativa por

pastagens e zonas agrícolas tende a amplificar as taxas de assoreamento (sugere-se leitura de MARTINS, 2018). Além disto, juntamente com partículas de sedimentos, as cargas de lavagem da bacia poderão conter nutrientes e outros poluentes, os quais poderão prejudicar a qualidade da água com influências mais danosas que o assoreamento.

5. Conclusão

Nos dias cotidianos, a importância dos cursos d'água estão cada vez mais em evidência. O mundo vem se conscientizando sobre a utilização e manutenção da saúde dos mesmos, por questões ambientais e de sobrevivência. Nenhuma população é passível de desenvolvimento caso não haja disponibilidade de água em suas proximidades, panorama social que ocorre desde os primórdios da humanidade.

Com tal importância em pauta e a sustentabilidade sendo cada vez mais abrangida no planeta, um grande auxílio para a manutenção de mares, rios, lagos e represas são estudos que viabilizam compreender seu comportamento e estabelecer metas mediante a utilização do corpo hídrico, mesmo que grande parte dessa manutenção é realizada por culpa de atos humanos que poluem e prejudicam a natureza propriamente dita.

Uma maneira para o estudo e compreensão do comportamento dos cursos d'água com bastante bagagem na literatura é apresentado neste trabalho, com o cálculo e análise do assoreamento sedimentado. Os fenômenos relacionados ao assoreamento podem causar perdas de volume útil nos reservatórios, que podem ser agravados com atividades antrópicas. O assoreamento também preocupa no setor energético, por conta da perda de vida útil e sua consequência sobre a utilização de turbinas em hidrelétricas.

Desta forma, para o cálculo do assoreamento, tornam-se importantes os ensaios de campo, como batimetria e coleta de vazões, pois com eles é possível aferir com mais precisão os dados referentes ao manejo do funcionamento operacional do reservatório. Sem esse tipo de dados, pode tornar-se inviável realizar maioria dos cálculos necessários.

Com os cálculos aqui realizados, pôde ser inferida a interferência do assoreamento no reservatório em quantitativos, de forma que o córrego do Bom Jardim depositará, conforme os métodos de Churchill e Brune, cerca de 90% e 70% respectivamente, de forma a prejudicar a vida útil do reservatório em um intervalo de até 237 anos.

Desta forma, o estudo dos fenômenos do assoreamento é importante por conta da previsão que o mesmo pode acarretar em prevenção do mesmo e otimização de vida útil do reservatório em questão. A utilização de ferramentas computacionais, como o Excel e o sistema Hidroweb, facilita esse estudo e apresenta a tendência atual da Engenharia Civil de aliar o uso das mesmas para facilitar a criação de projetos com maior precisão e de forma mais rápida.

Referências

1. BELLINASSO, T. B.; PAIVA, J. B. D. **Avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica semi-urbana de encosta**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n. 4, p. 169-181, outubro, 2007.
2. BEVILACQUA, J. E. **Estudos sobre a caracterização e a estabilidade de amostras de sedimentos do Rio Tietê, S.P.** 1996. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-17112008-140830/pt-br.php> >. Acesso em 14 agosto 2018.
3. BRUNI, J. C. **A água e a vida**. Tempo Social; Rev. Sociol. USP, São Paulo, 5 (1-2): 53-65, 1993 (editado em nov. 1994).
4. CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL. 2000. 140 p.
5. DPI. **Calculadora geográfica**. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/calcula/> >. Acesso em 28 agosto 2018.
6. FARIA, S. **Cálculo de áreas de polígonos irregulares através de método prático com base no método de Gauss – Planilha Excel**. Quintal da Engenharia. 2013. Disponível em: < <https://www.quintaldaengenharia.com/products/calculo-de-areas-de-poligonos-irregulares-atraves-de-metodo-pratico-com-base-no-metodo-de-gauss-planilha-excel/> >. Acesso em 22 outubro 2018.
7. GUIMARÃES, Y. S. **Análise do potencial hidroenergético da bacia do córrego Lageado**. Uberlândia, Minas Gerais. 2017. 74 p.
8. HEINEMARM, H. G. **A new sediment trap efficiency curve for small reservoirs**. Journal of the American Water Reseourves Associantion. Vol. 17, n. 5, p. 825-830. 1981. Disponível em: < <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.1981.tb01304.x> >. Acesso em 24 agosto 2018.
9. HIDROWEB. **Séries históricas de estações**. Disponível em: < http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf >. Acesso em 28 agosto 2018.

10. JACCON, G.; CUDO, K. J. **Curva-chave: análise e traçado**. Brasília, DNAEE, 1989. 273 P, 1v.
11. LOUREIRO, D. D. T. **Métodos atuais e novas tecnologias para o monitoramento do transporte de sedimentos em rios: necessidade de dados e incertezas envolvidas**. 2008. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-17112008-140830/pt-br.php> >. Acesso em 14 agosto 2018.
12. MAMA, C.; OKAFOR, F. O. **Siltation in reservoirs**. Department of Civil Engineering, University of Nigeria. 2015. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/266350972_SILTATION_IN_RESERVOIRS >. Acesso em 23 agosto 2018.
13. MARTINS, C. S. **Influência do tipo de uso e ocupação do solo no assoreamento do reservatório Bom Jardim, Uberlândia-MG**. 2018. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21419> >. Acesso em 14 agosto 2018.
14. MAZZINI, T. E. F.; DONCATO, K. B.; NUNES, P. A., PERAZZO, G. X. **Erosão e assoreamento**. Disponível em: < <http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/view/2588> >. Acesso em 16 junho 2018.
15. MERTEN, G. H.; HOROWITZ, A.; CLARKE, R.; MINELLA, J.; PICKBRENNER, K.; PINTO, M. **Considerações sobre a utilização da curva-chave para determinação de fluxo de sedimentos**. Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Porto Alegre, 7 (20-24), 2006.
16. SALGADO, J. C. M.; SILVA, ALVES, L. F. S.; PEREIRA, N. C. R.; ROSS, J. **Estudo sedimentológico para o AHE JIRAU, Rio Madeira**. Disponível em: < http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/Mad/Documentos%20Oficiais/Madeira-_ompl/Rel%20atendimento%20Of%20115-2005%20SAE-ANA-Jul%202006/atendimento%20ao%20oficio%20115-2005-SOC-ANA.doc >. Acesso em 14 agosto 2018.
17. SANTOS, A. C. **Aporte de nutrientes na sub-bacia do Ribeirão Bom Jardim (Triângulo Mineiro) e proposição de diretrizes para programas de pagamento por serviços ambientais**. 2018. Disponível em: <

- <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21278>>. Acesso em 14 agosto 2018.
18. SANTOS, E. S.; CUNHA, A.C. **Análise de cenários hidrossedimentológicos para estimar taxas de assoreamento e vida útil do reservatório da UHE Cachoeira Caldeirão no Rio Araguari/AP-Brasil.** BIOTA Amazônica. V.5, n. 3, p. 88-97. 2015. Disponível em: < <https://periodicos.unifap.br/index.php/biota/article/view/1723/v5n3p88-97.pdf> >. Acesso em 14 agosto 2018.
 19. SCHELLENBERG, G.; DONNELLY, C. R.; HOLDER, C.; AHSAN, R. **Dealing with sediment: effects on dams and hydropowder generation.** Hydroworld. 2017. Disponível em: < <https://www.hydroworld.com/articles/print/volume-25/issue-1/features/dealing-with-sediment-effects-on-dams-and-hydropower-generation.html> >. Acesso em 23 agosto 2018.
 20. SILVA JR, V. P. *et al.* **Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v. 15, n. 10, p. 1073-1081, 2011.
 21. TASCA, F. A.; MIRANDA, N.; SCHUCK, A.; CAPRARIO, J. **Comparação de estudos hidrossedimentológicos em projetos básicos de pequenas centrais hidrelétricas.** 2018. Disponível em : < https://www.researchgate.net/profile/Fabiane_Tasca/publication/325473454_COMPARACAO_DE_ESTUDOS_HIDROSSEDIMENTOLOGICOS_EM_PROJETOS_BASICOS_DE_PEQUENAS_CENTRAIS_HIDRELETRICAS/links/5b1015b1aca2723d9977c9a1/COMPARACAO-DE-ESTUDOS-HIDROSSEDIMENTOLOGICOS-EM-PROJETOS-BASICOS-DE-PEQUENAS-CENTRAIS-HIDRELETRICAS.pdf?origin=publication_list >. Acesso em 14 agosto 2018.
 22. TRAININI, D. R. **A influência da neotectônica no assoreamento de bacias.** XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.
 23. VAN RIJN, L. C. **Sedimentation of sand and mud in reservoirs in rivers.** 2013. Disponível em: < <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Reservoirsiltation2013.pdf> >. Acesso em 14 agosto 2018

24. VENÂNCIO, S. S. **Simulação numérica aplicada ao assoreamento do Reservatório Represa Velha.** 2009. Disponível em: <
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-02092009-144848/publico/teseSteniodeSousaVenancio.pdf> >. Acesso em 07 dezembro 2018.

Anexo A

