



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE AMBIENTAL**

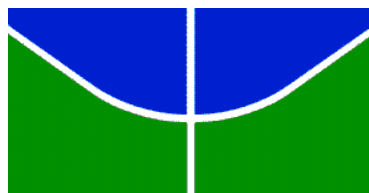
**ANÁLISE DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NA BACIA DO CÓRREGO  
RIACHO FUNDO, BRASÍLIA - DF.**

**Marcelo Ribeiro Ferreira Aguiar**

**Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig**

**Dissertação de Mestrado N° 98**

**Brasília - DF  
2015**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE AMBIENTAL

ANÁLISE DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NA BACIA DO CÓRREGO  
RIACHO FUNDO, BRASÍLIA - DF.

Marcelo Ribeiro Ferreira Aguiar

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig.

Brasília - DF  
2015

MARCELO RIBEIRO FERREIRA AGUIAR

ANÁLISE DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NA BACIA DO CÓRREGO  
RIACHO FUNDO, BRASÍLIA - DF.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig  
Professor Presidente

---

Prof. Dr. Marco Ianniruberto  
Professor Interno

---

Prof. Dr. Sérgio Koide  
Professor Externo

Brasília - DF  
2015

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a deus por todas as oportunidades que Ele tem me dado e sempre estar presente na minha vida.

Minha mãe Celina, meu pai em memória Antônio Pedro que sempre tiveram o discernimento e souberam me proporcionar as melhores coisas para o meu crescimento e evolução.

Ao meu mestre e orientador Prof. Dr. Henrique Llacer Roig pela confiança neste período e por toda a orientação e sabedoria passada.

Aos professores do IG por todo os ensinamentos, Paulo Meneses, tati de Almeida, Marco Iannirruberto, Rejane, Edilson, Brites e todos da equipe do laboratório de Sensoriamento Remoto do Instituto de Geociências. A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos concedida. A equipe da CAESB pelo apoio técnico e campo, Augustão, Maria do Carmo, Vanusa, Flávio, pessoal de campo e do laboratório.

Ao pessoal do PTARH pela auxilio em campo e técnico, Koide, Bruno, Júnior e do laboratório de águas.

Aos amigos feitos no IG de pós-graduação pela convivência e aprendizado juntos nessa jornada, Benini, Cássia, Ilanna, Carol, Emmanuel, Gilson, Khalil, Willen, PH, Hiago, Igor.

Em especial ao grande amigo Diogo Olivetti pela ajuda na reta final do trabalho, conclusão deste só foi possível com a sua ajuda irmão. Aos grandes amigos de longa data, Fernandinho, Tomás, Kardsley, Caio, Viny, Beto, Fabim, Fernando, Heráclito, Michelangelo, Marcão, Marco, Renato, Carlim, Henrique, Diego, Allyson, Mari, Patty.

## RESUMO

Devido ao grande crescimento populacional, o uso e ocupação desordenados do solo, vários problemas ambientais começam a ser diagnosticados, como problemas de quantidade e qualidade das águas em reservatórios. O Brasil, país com mais de 90% de energia elétrica provida por hidrelétricas além dos mananciais de abastecimento serem eminentemente superficiais, tem sofrido com evento de escassez hídrica, como no caso de São Paulo, que além da falta de chuvas, chuvas isoladas de alta intensidade têm causado transtorno a população. Outro fator importante associado ao ciclo hidrológico são os processos erosivos e o acúmulo de sedimentos que podem, entre outros problemas, causar a diminuição do volume útil dos reservatórios e influenciar na qualidade das suas águas. Neste contexto, o objetivo geral foi determinar a descarga sólida que aporta o Lago Paranoá, proveniente da Bacia do Riacho Fundo, uma das bacias mais degradadas do DF. O trabalho foi realizado na Estação Montante Zoológico, localizada próximo ao exutório da bacia do Riacho Fundo. Devido as condições hidrológicas da Bacia, o emprego da metodologia convencional recomendada pela Agência Nacional de Águas – ANA não permite a determinação da descarga sólida, durante o ciclo hidrológico, principalmente durante os eventos de cheia. Deste modo, métodos alternativos foram empregados, os quais foram: Uma vertical central por integração, pontual central superficial, turbidez e amostragem automática, coletados com amostrador automático ISCO 3700. Com o método alternativo de uma vertical central por integração foi obtido valores próximos do método clássico e tradicional, coeficiente de correlação de 91% e baixos valores de resíduo. Para o método pontual central da superfície o coeficiente de correlação foi de 93%, porém com altos valores de resíduos. Portanto, há uma subestimação dos valores quando relacionado ao método tradicional não sendo, a princípio, um método viável para monitoramento em rios. Neste trabalho foi possível obter uma boa relação cota, vazão e transporte de sedimentos. Foi estimada a produção de sedimentos para quatro anos hidrológicos que resultou uma produção expressiva, assim foram elaboradas curvas-chave significativas entre vazão e descarga sólida. Nas curvas-chave de sedimento para a estação estudada, correlação de 62% para vazões baixas e 85% para vazões altas.

**Palavras-chave:** Descarga Sólida, Produção de Sedimento, Córrego Riacho Fundo, Amostrador Automático, Método Pontual, Turbidez.

## ABSTRACT

Due to the large population growth and the disordered use and occupation of the soil, many environmental problems started to be diagnosed, such as problems of quantity and quality of the water in reservoirs. Brazil, a country with more than 90% of electricity provided by hydroelectric power plants in addition to an eminently shallow supply source, has suffered from water shortage events, as in the case of São Paulo where, besides the lack of rains, scattered rains of high intensity have caused inconvenience to the population. Other important factors associated with the hydrological cycle are the processes of erosion and the accumulation of sediments that can, among other problems, cause the decrease in the volume of reservoirs and influence the quality of its waters. In this context, the general objective was to determine the solid discharge provided by the Paranoá Lake, from the Riacho Fundo Basin, one of the most degraded basins of Distrito Federal. The work was carried out at the Montante Zoológico Station, located near the Riacho Fundo Basin mouth. Due to the hydrological conditions of the Basin, the use of conventional methodology recommended by the National Water Agency – ANA does not allow the determination of solid discharge during the hydrological cycle, particularly during the rising water level events. Thus, alternative methods were employed, such as: the midstream vertical integration, the punctual superficial midstream, turbidity and automatic sampling, collected with a ISCO 3700 automatic sampler. With the alternative method of central vertical integration, we obtained values close to the classic and traditional method, a correlation coefficient of 91% and low residue values. For the punctual method, the correlation coefficient was 93%, with high residue values, however. Therefore, there is an underestimation of the values when related to the traditional method, not being, at first, a viable method for monitoring in rivers. In this work it was possible to obtain a good river stage, flow and sediment transport ratio. Sediment production was estimated for four hydrological years, which resulted in a significant production. Thus, significant key curves were made between flow and solid discharge. On the sediment key curves for the studied station, there was a correlation of 62% for low flows and 85% for high flows.

**Keywords:** Solid Discharge, Sediment Production, Riacho Fundo Stream, Automatic Sampler, Punctual Method, Turbidity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapas do assoreamento temporal da borda limite do espelho d'água do Lago Paranoá no Braço do Riacho Fundo entre 1966 e 2009 .....	2
Figura 2 – Trajetória das partículas sólidas ao longo do ciclo hidrossedimentológico .....	7
Figura 3 – Gráficos ilustrativos dos três principais padrões de laços de histerese: A) laço horário; B) laço anti-horário; e C) laço com formato de oito .....	9
Figura 4 – Exemplo de hidrograma, sedimentograma e relação concentração de sedimentos em suspensão (CSS) X Vazão (Q) .....	10
Figura 5 – Diagrama da distribuição da velocidade, concentração de sedimentos e descarga sólida nos cursos d'água. Na figura, setas maiores indicam valores mais elevados.....	11
Figura 6 – Distribuições de concentração na vertical para materiais de tamanhos .....	12
Figura 7 – Representação da amostragem pelo método do Igual Incremento de Largura.....	16
Figura 8 – Amostrador convencional USDH-48 .....	17
Figura 9 – Amostrador DH-59 com guincho Hidrométrico.....	17
Figura 10 – Representação da amostragem pelo método do Igual Incremento de Descarga...	18
Figura 11 – Amostrador DH-49 Pontual.....	19
Figura 12 – Amostrador automático 6700 FR – ISCO .....	21
Figura 13 – Curva de ajuste aplicada aos dados (a) ajuste exponencial (b) correlação dos dados obtidos de turbidez verdadeira e calculada.....	22
Figura 14 – Representação do TSS (Sólidos em Suspensão Totais) com valores de backscattering (decibéis) .....	23
Figura 15 – Equipamento LISST-100X .....	25
Figura 16 – Equipamento LISST-100X em campo da ANA na Estação Fluviométrica São Bartolomeu .....	26
Figura 17 – Curva-chave anual de sedimentos da estação sedimentométrica Riacho Fundo Montante Zoológico na sub-bacia do Riacho Fundo .....	31
Figura 18 – Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá e Sub-bacia do Riacho Fundo ..	33
Figura 19 – Mapa de localização da Estação Fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico na Sub-bacia Riacho Fundo .....	35
Figura 20 – Seção da Estação Fluviométrica e Sedimentométrica Riacho Fundo Montante Zoológico.....	36
Figura 21 – Linígrafo Global Water .....	37

Figura 22 – Manilha do Amostrador Automático .....	38
Figura 23 A – Placa solar com bateria e controlador de carga. Figura 23 B – Segunda infraestrutura de aterramento da fiação da sonda .....	38
Figura 24 – Infraestrutura da sonda em 45° .....	39
Figura 25– Acúmulo de sedimento nos sensores da sonda .....	39
Figura 26 – Instalação da sonda multiparamétrica em 90° dentro do corpo hídrico .....	40
Figura 27 – USD-49 com guincho hidrométrico amostrando por teleférico na estação fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico.....	41
Figura 28 – Medição de Vazão na Estação Fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico .....	42
Figura 29 – Molinete Hidrométrico .....	43
Figura 30 – ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) .....	44
Figura 31 – ADC (Acoustic Digital Current meter) OTT Qliner2 .....	44
Figura 32 – Amostrador Automático ISCO 3700 SAMPLER.....	47
Figura 33 – Amostras coletadas pelo amostrador automático na estação Riacho Fundo Montante zoológico.....	49
Figura 34 – Método de Filtração das amostras de campo no Laboratório de Geoquímica – UnB .....	50
Figura 35 – Pesagem dos filtros em balança analítica .....	50
Figura 36 – Beckers dentro da estufa no Laboratório de Geoquímica – UnB .....	51
Figura 37 – Calibração da Sonda Multiparamétrica DS5X no Laboratório da ANA.....	52
Figura 38 – Gráfico de Dispersão das medições realizadas em campo pela CAESB .....	54
Figura 39 – Margem erodida a montante da estação Riacho Fundo Mont. Zoológico.....	58
Figura 40 – Gráfico do Perfil Transversal da estação Riacho Fundo Mont. Zoológico .....	59
Figura 41 – Gráfico de Dispersão das medições e Curvas-Chave CAESB/UnB/PTARH .....	60
Figura 42 – Média Histórica Anual de Vazão e Precipitação entre 1979-2014 .....	62
Figura 43: Gráfico de Correlação da Média Histórica Anual de Vazão e Precipitação entre 1979-2014.....	63
Figura 44 – Média Histórica Mensal de Vazão e Precipitação entre 1979-2014 .....	64
Figura 45: Correlação das Média Histórica Mensal de Vazão e Precipitação entre 1979-2014 .....	64
Figura 46: Gráficos dos Eventos Extremos na Estação de Monitoramento Riacho Fundo Mont. Zoológico .....	65



Figura 47 – Gráfico de correlação entre a concentração das amostras de uma Vertical Central por Integração (Vci) e a concentração média obtida pelo método Igual Incremento de Largura (IIL). Cr corresponde à concentração média da seção recalculada. A equação de correlação foi obtida pelo método dos mínimos quadrados .....	68
Figura 48– Gráfico de correlação entre a concentração das amostras de uma Pontual Central Superficial (Pcs) e a concentração média obtida pelo método Igual Incremento de Largura (IIL). A equação de correlação foi obtida pelo método dos mínimos quadrados	70
Figura 49 – Curva-chave de Sedimento para vazões baixas da estação Riacho Fundo Montante Zoológico.....	73
Figura 50: Curva-chave de Sedimento para vazões baixas da estação Riacho Fundo Montante Zoológico.....	73
Figura 51 – Correlação entre a Concentração de sólidos em Suspensão e a Turbidez para o evento do dia 18/12/2014 .....	75
Figura 52 – Comportamento dos dados de Concentração de sólidos em Suspensão e a Turbidez para o evento do dia 18/12/2014.....	76
Figura 53 – Laços de histerese para diferentes eventos na sub-bacia do Riacho Fundo .....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese dos métodos diretos e indiretos para amostragem de sedimentos segundo Vanoni, 1977; Morris e Fan, 1998. ....	14
Tabela 2 – Classificação das correlações de acordo com o valor de r.....	20
Tabela 3 – Volumes de amostras necessários para análise de concentração de sedimentos em suspensão.....	28
Tabela 4 – Valores das medições mensais realizadas pela equipe da CAESB na estação Riacho Fundo Montante Zoológico .....	53
Tabela 5 – Resumo dos eventos extremos na estação Riacho Fundo Montante Zoológico ....	66
Tabela 6 – Valores de vazão e de concentração obtidos pela comparação entre a vertical central por integração e média seção da estação Riacho Fundo Montante Zoológico. A coluna Cr representa a concentração corrigida (recalculada) pelo modelo apresentado na Figura 48. RVci/IIL representa a razão da concentração da Vertical pela concentração média da seção e o Resíduo é a diferença entre a concentração da seção (IIL) e a calculada (Cr). O Qss é a descarga sólida média (t/dia) utilizada a concentração calculada pelo modelo (Cr). ....	69
Tabela 7 – Valores de vazão e de concentração obtidos pela comparação entre a Pontual Central superficial e média seção da estação Riacho Fundo Montante Zoológico. A coluna Cr representa a concentração corrigida (recalculada) pelo modelo apresentado na Figura 49. O Resíduo é a diferença entre a concentração da seção (IIL) e a calculada (Cr). O Qss é a descarga sólida média (t/dia) utilizada a concentração calculada pelo modelo (Cr). ....	71
Tabela 8 – Valores das medições e Levantamentos de Sedimentos Mensais Realizadas na estação Riacho Fundo Montante Zoológico. Onde Qss (ton/dia) é a descarga sólida, Qss <sub>esp</sub> é a descarga sólida específica em (Ton/Km <sup>2</sup> .mês). ....	72
Tabela 9 – Valores de produção de sedimento.....	74
Tabela 10 – Valores dos resultados da Descarga Sólida em Suspensão Anual (ton/Km <sup>2</sup> .ano) obtidos na estação de monitoramento e situação anual referente à produção de sedimentos .....	74

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
3.1 DADOS HIDROLÓGICOS.....	4
3.2 HIDROSEDIMENTOLOGIA.....	5
3.2.1 Transporte de Sedimentos .....	6
3.2.2 Transporte de Material de Fundo .....	7
3.2.3 Transporte de Material em Suspensão .....	8
3.3 MÉTODOS DE MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO EM RIOS .....	12
3.3.1 Métodos Diretos.....	14
3.3.2 Métodos Indiretos.....	21
3.4 ANÁLISE LABORATORIAL .....	26
3.4.1 Curva Chave De Sedimento.....	29
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO .....	33
4.2 INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .....	36
4.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS EM CAMPO.....	41
4.3.1 Medição de descarga Líquida .....	41
4.3.2 Método de Levantamento Hidrossedimentométrico .....	45
4.3.3 Dados Hidrossedimentológicos.....	45
4.3.4 Dados de Qualidade de Água.....	47
4.4 LABORATÓRIO.....	48
4.4.1 Processamento das Amostras de Campo.....	48
4.4.2 Calibração da Sonda Multiparamétrica DS5S.....	52
4.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	52
4.5.1 Determinação da Curva-Chave de Vazão.....	52
4.5.2 Determinação da Curva-Chave de Descarga Sólida e Cálculo da Descarga Sólida Instantânea em Suspensão .....	54
4.5.3 Determinação da Descarga Sólida a Partir dos Dados Pontuais.....	56
4.5.4 Determinação da Descarga Sólida do Amostrador Automático .....	57
4.5.5 Correlação entre Turbidez da sonda e Concentração de Sedimento em Suspensão.....	57
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>58</b>

5.1 SITUAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA ESTAÇÃO.....	58
5.2 ANÁLISE DA VAZÃO .....	59
5.2.1 <i>Curva-Chave</i> .....	59
5.2.2 <i>Análise da Série Histórica de Vazão</i> .....	61
5.3 DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS .....	67
5.3.1 <i>Correlação dos métodos alternativos com o Método Clássico</i> .....	67
<i>Neste tópico discutiremos a relações do método clássico por Igual Incremento de Largura com os métodos alternativos e complementares como, Vertical Central por Integração e Pontual Central Superficial coletados em conjunto.</i> .....	67
5.3.2 <i>Curva-Chave de Descarga Sólida</i> .....	71
5.3.3 <i>Total de Sedimento Transportado</i> .....	74
5.3.4 <i>Correlação entre Turbidez e Concentração de Sedimentos em Suspensão</i> .....	75
5.3.5 <i>Dados do Amostrador Automático</i> .....	77
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>

## INTRODUÇÃO

Hoje, a preservação dos recursos hídricos é um tema central no Brasil e no mundo. Estudos indicam que a demanda por água para usos múltiplos está em situação crítica em várias partes do mundo (WWAP, 2015) devido, principalmente, ao crescimento demográfico acelerado e pela falta de gestão adequada para manutenção dos reservatórios e fontes naturais desse recurso. Como situação emblemática desse problema, pode-se citar a situação da cidade de São Paulo, a maior capital brasileira e a quinta maior do mundo em população, onde consolidou-se um cenário de escassez hídrica denominada “A crise Água” (ONU, 2014). Esta situação não se restringe somente a São Paulo, Belo Horizonte e Rio de Janeiro, por exemplo, também estão com essa situação crítica.

No caso específico do Distrito Federal (DF), Gama (2002), em seu estudo sobre o perfil ambiental dos recursos hídricos do Centro-Oeste brasileiro, destacou a situação delicada do DF como unidade política:

[...] situa-se em uma área de limitada disponibilidade hídrica visto que é localizada nas regiões limítrofes (nascentes) das bacias dos rios Tocantins, São Francisco e Paraná. Aproximadamente 2,9 milhões de habitantes distribuem-se em uma área de 5.822 km<sup>2</sup> (+ 300 hab./km<sup>2</sup>).

Esse fato configura uma situação frágil na gestão de abastecimento das águas do DF. A CAESB (Companhia de Abastecimento e Saneamento de Brasília) já planeja novas fontes de abastecimento, como o Lago Paranoá apesar das dúvidas existentes sobre a gestão compartilhada do lago como uso múltiplo (GAMA, 2002).

Frequentemente o Lago Paranoá aparece na mídia em virtude das polêmicas acerca do seu estado de assoreamento e dos problemas decorrentes com: diminuição das áreas de pesca, cargas poluentes nos sedimentos e principalmente seus impactos com relação a recreação e lazer dos moradores destas áreas.

Apesar deste questionamento sobre a situação do lago, estudos visando a caracterização e quantificação do aporte de sedimentos no Lago Paranoá são recentes (MENEZES, 2010; GUIMARÃES, 2011). Os levantamentos sistemáticos dos principais afluentes do lago, foram iniciados pela CAESB, após a execução do projeto de pesquisa ÁGUA-DF (UnB/CAESB) a partir de 2011. Estes levantamentos são realizados mensalmente e os mesmos ainda não foram tratados adequadamente, visto a falta de aquisição de dados nos

períodos de cheias onde normalmente ocorrem os principais aportes de sedimentos para o lago.

Desta forma, há uma necessidade de se realizar estudos para um acompanhamento mais rigoroso e adequado, principalmente, dos eventos de cheias com vista à quantificação eficiente e precisa da descarga que aporta o lago Paranoá.

Dentre os afluentes do Lago Paranoá destaca-se o Braço do Riacho Fundo com estágio avançado de assoreamento. A Figura 01 demonstra a evolução do assoreamento no Lago Paranoá no Braço do Riacho Fundo entre 1966 e 2009 realizado por Menezes (2010). Estes estudos apontaram a necessidade de um melhor entendimento das descargas sólidas que aportam o Lago Paranoá.

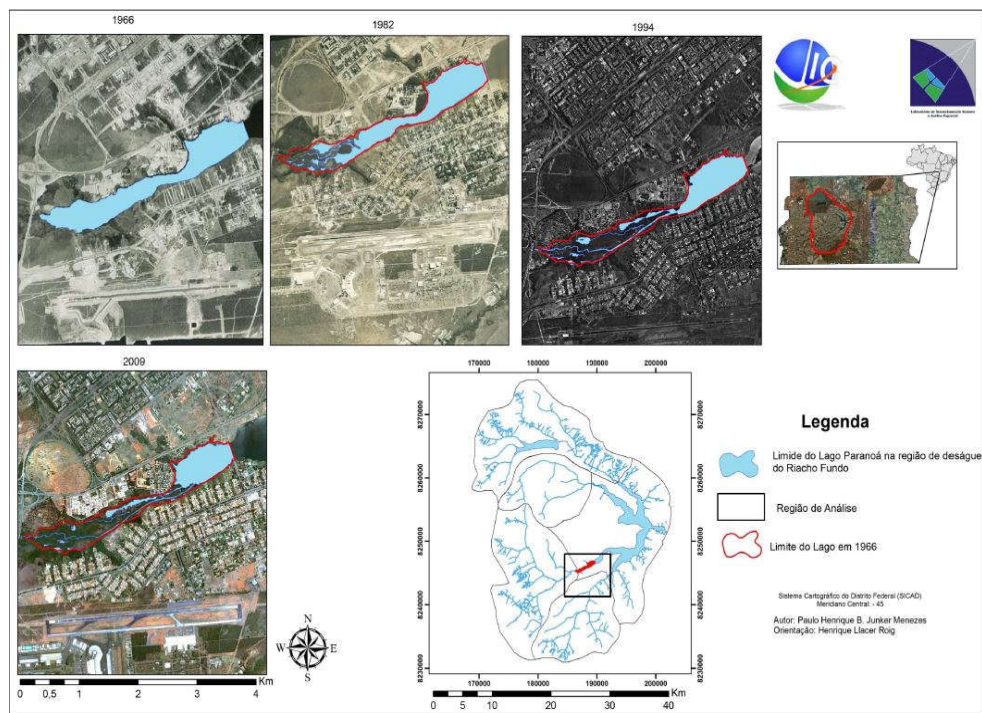


Figura 1 – Mapas do assoreamento temporal da borda limite do espelho d’água do Lago Paranoá no Braço do Riacho Fundo entre 1966 e 2009

Fonte: Menezes (2010)

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é determinar a descarga sólida em suspensão da sub-bacia do Riacho Fundo, um dos principais afluentes do Lago Paranoá – DF, visto que até o momento apesar do estágio de assoreamento do lago, pouco ou nada se sabe sobre a dinâmica hidrossedimentológica desta bacia.

Como objetivos específicos temos:

- Analisar e quantificar a produção de sedimentos na sub-bacia;
- Verificar a possibilidade de métodos de levantamento de sólidos em suspensão complementares as técnicas tradicionalmente empregadas pela CAESB e ANA, ou seja, igual incremento de largura (IIL).
- Analisar o comportamento hidrológico do Córrego Riacho Fundo na estação Riacho Fundo Montante Zoológico;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas sucintamente as informações necessárias para a caracterização da descarga sólida, pois estudos detalhados destes procedimentos podem ser encontrados em Carvalho et al. (2000) e nos manuais do USGS.

#### 3.1 DADOS HIDROLÓGICOS

A medição de vazão, apesar de conceitualmente bem fundamentada, é uma tarefa morosa e a depender do regime hidrológico (CHEVALLIER, 2004). Normalmente a caracterização do regime de vazão é determinada pela relação da altura do nível (cota) de um curso d'água versus a descarga líquida, onde a cota pode ser obtida pela leitura de réguas pelo observador ou por medições diretas com o uso de linígrafos (CARVALHO et. al., 2000). Associado a estas leituras, faz-se necessário a medição direta da descarga líquida diretamente, seja por uso de molinetes ou métodos acústicos como ADCP e ADV (SANTOS et. al., 2001; CHEVALLIER, 2004).

Deste modo, a partir da relação da medição dos valores de cota e vazão, determina-se a curva-chave ou curva cota x vazão (h/Q) (CHEVALLIER, 2004). Segundo esse autor, traçar uma curva-chave de vazão é determinar uma representação gráfica da relação cota-descarga a partir de algumas medições distribuídas no intervalo de cotas. É necessário ter um bom conhecimento do nivelamento do terreno, como a declividade, e uma compreensão exata do funcionamento hidráulico do canal onde está a régua, para obter uma interpretação correta das medições de descarga líquida.

O mesmo autor afirma que a representação gráfica da relação h/Q é a forma mais utilizada para elaboração da curva-chave, que é definida em campo com a medição da vazão para a sua determinada cota no momento. Suas formas mais frequentes são a exponencial e a polinomial.

A seguinte expressão exponencial é frequentemente citada na literatura para a elaboração da curva-chave de vazão (TUCCI, 2002):

$$Q = K_x (h - H_0)^n \quad (01)$$

Onde,  $Q(m^3 \times s^{-1})$  é a descarga líquida em um dado instante;  $h(m)$  é o nível do curso de água correspondente à Q;  $H_0(m)$  é o nível para o qual a vazão é nula; a e b são parâmetros adimensionais de ajuste, específicos da seção fluviométrica de interesse.



Para que uma determinada curva-chave seja confiável, é necessário que sejam feitas diversas medições em condições climáticas diferentes, estiagens e períodos de cheias. Também é importante que o acompanhamento das medições de vazão seja permanente ao longo dos anos, já que pode ocorrer modificações da seção transversal, por assoreamento ou erosão da seção transversal, no decorrer do tempo. A curva-chave se torna defasada em muitas seções devido à falta de um acompanhamento das medições de vazões (SANTOS et. al., 2001).

### 3.2 HIDROSSEDIMENTOLOGIA

A Hidrossedimentologia é o estudo da erosão hídrica, dos sedimentos fluviais e dos depósitos em rios e reservatórios (CARVALHO, 1994). Os estudos hidrossedimentológico são importantes pois o processo de erosão, transporte e depósitos de sedimentos são fortemente atuantes na dinâmica e no modelamento da paisagem. Frequentemente, o regime hidrossedimentométrico é modificado e ampliado pelas atividades antrópicas (TUCCI, 2002; CARVALHO, 2008).

O estudo hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica, além de ser uma ferramenta importante de apoio para análises sobre o estado de degradação de uma bacia, é fundamental para o planejamento dos recursos hídricos (SIVIEIRO & COIADO, 1999).

A produção de sedimentos pela erosão hídrica é influenciada pela capacidade de infiltração do solo, cobertura do solo e pelas características do transporte de sedimentos no curso d'água (TUCCI, 2002; 2007).

As atividades antrópicas, em geral, intensificam a produção de sedimentos por erosão hídrica. Esse problema encontra-se em escala mundial. De acordo com o relatório publicado pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO, 2011), 25% dos solos no mundo encontra-se em estágio avançado de degradação, colocando em risco os sistemas de produção agrícola e a qualidade dos recursos hídricos. A perda de camada do solo é o maior desafio para a sustentabilidade da agricultura no mundo. A erosão hídrica e o aumento da produção de sedimentos são as principais causas da degradação dos recursos hídricos em ambientes tropicais e subtropicais úmidos (ANTONIAZZI, 2008).

Portanto, quanto maior a impermeabilidade do solo, maior o volume escoado superficialmente, assim, maiores os riscos de degradação dos solos, arraste de sedimentos, alagamentos, destruição de estruturas urbanas e de habitats aquáticos e redução da capacidade

de armazenamento de reservatórios (RAUHOFFER et. al., 2001), que pode intensificar os problemas ambientais urbanos e rurais, tais como a escassez de recursos hídricos e a suscetibilidade do solo à erosão.

Em usinas hidrelétricas, uma parte do reservatório é destinada ao acúmulo de sedimentos, porém a maioria apresenta a taxa de sedimentação muito elevadas que podem diminuir a capacidade de armazenamento da água em até 5%, assim elevando o custo da obra (SILVA, SHULTZ; CAMARGO, 2004).

### *3.2.1 Transporte de Sedimentos*

A quantidade e a qualidade dos sedimentos transportados no curso d'água dependem de inúmeros fatores físicos e antrópicos que ocorrem na bacia hidrográfica e ao longo da rede de drenagem (VANONI, 1977; SHEN; JULIEN, 1992). Segundo Einstein (1944) há duas condições que controlam o transporte de sedimentos: a disponibilidade de material na bacia e a capacidade de transporte no curso d'água. Em outras palavras, o transporte de material depende de duas variáveis: (1) capacidade de transporte, como, geometria do canal (largura, profundidade, forma, perímetro molhado, declividade, etc), rugosidade do fundo, velocidade e turbulência do fluxo, entre outros; e (2) aquelas que refletem a qualidade e quantidade do material transportado, como a topografia da bacia, a geologia, a precipitação (magnitude, intensidade e duração) a cobertura vegetal, o uso da terra, o tipo de solo e as características das partículas (mineralogia, granulometria, forma, peso específico, coesão, etc).

Os tipos de transporte de sedimentos, que ocorrerão em função das variáveis descritas no parágrafo anterior, são caracterizados de dois modos: aquele relativo aos sedimentos mais leves que constituem a carga em suspensão, e o segundo é sobre o arraste de material de fundo, sendo que um material mais pesado se desloca sobre ou junto ao fundo, assim denominado de carga de fundo (EINSTEIN, 1944).

O tipo de transporte do sedimento no curso d'água ocorre em função das características da partícula do sedimento, como tamanho, peso e forma, e da magnitude da corrente (velocidade). O tipo de escoamento ocorre em função das características do leito, forma do canal, declividade do leito, entre outras (EINSTEIN, 1944; VANONI, 1977; SHEN; JULIEN, 1992; CARVALHO, 1994; MORRIS; FAN, 1998).

### 3.2.2 Transporte de Material de Fundo

No transporte de fundo as partículas saltam, rolam ou escorregam longitudinalmente sobre o fundo sem perderem o contato com ele. Shen e Julien (1992) classificam o transporte de fundo em duas partes:

- Carga de arraste: são partículas que rolam ou escorregam longitudinalmente ao longo do fundo, mantendo um contato substancialmente contínuo; e
- Carga de saltação: são as partículas que pulam ao longo do fundo, movendo-se pelo efeito da correnteza ou pelo impacto de outras partículas saltantes.

A Figura 2 ilustra os mecanismos de transporte das partículas sólidas no corpo hídrico.

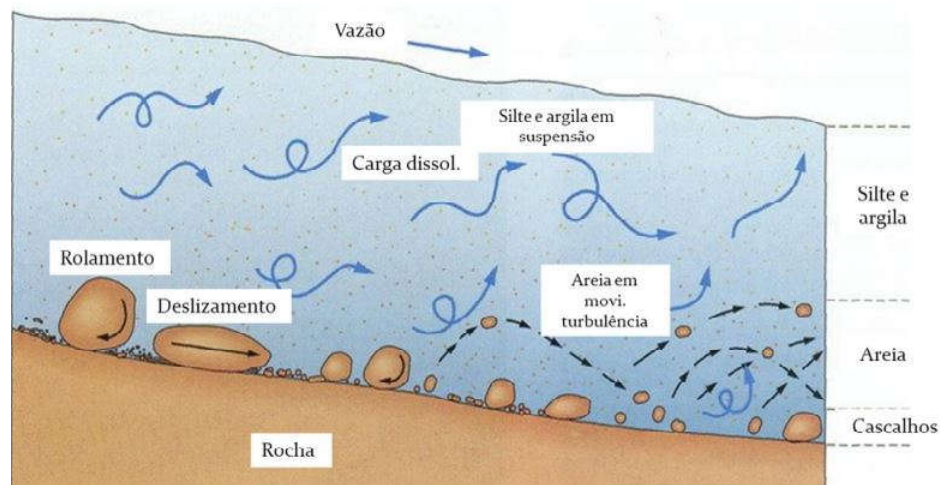


Figura 2 – Trajetória das partículas sólidas ao longo do ciclo hidrossedimentológico

Fonte: Marcondes (2008)

O impulso inicial que coloca a partícula na corrente pode ser o impacto de outra partícula, mas, normalmente, o que determina sua movimentação é a atuação do fluxo d'água sobre a superfície curva da partícula e as condições de fundo (EINSTEIN, 1944; JULIEN, 1998, MORRIS; FAN, 1998). O movimento dos sedimentos se dá de acordo com a magnitude da força do fluxo que supera a força de resistência da partícula ao movimento.

### 3.2.3 Transporte de Material em Suspensão

No transporte em suspensão as partículas se deslocam no meio da coluna d'água sem contato com o fundo, sustentadas pelas componentes verticais do fluxo turbulento (EINSTEIN, 1944, SHEN; JULIEN, 1992; CARVALHO, 1994; JULIEN, 1998, MORRIS; FAN, 1998). As partículas mais finas da carga de sedimentos são facilmente carregadas em quantidade pelo curso d'água de acordo com a disponibilidade de material erodido na bacia (EINSTEIN, 1944). Estes sedimentos são denominados de carga de lavagem (EINSTEIN, 1944; JULIEN, 1998). Segundo Einstein (1944) a carga de lavagem cobre uma faixa de granulometria menor que o material de fundo.

Pode se considerar que a concentração dos sedimentos transportados em suspensão ao longo da seção do rio é definida pelo jogo de forças físicas que atuam no componente vertical do deslocamento das partículas, onde atua a turbulência que tende a jogar a partícula para cima, a força gravitacional que tende a puxar as partículas para baixo, a densidade e a velocidades de sedimentação (ROIG, 2005).

#### 3.2.3.1 Distribuição de Sedimentos na Coluna D'água

A distribuição dos sedimentos em uma vertical, na seção transversal ao longo do curso d'água e em relação ao tempo é determinada pelas condições regionais e locais da bacia e pelas características da rede de drenagem.

Os efeitos do escoamento proveniente das precipitações máximas variam muito de acordo com as estações do ano e com as condições da superfície do solo e da forma da bacia (SILVA et. al., 2004).

Em regiões úmidas, as estações do ano têm um efeito predominante na produção de sedimentos. Durante a época das chuvas são carreados 70 a 90% da descarga de sedimentos da bacia hidrográfica (CARVALHO, 1994; JULIEN, 1998). A descarga de sedimentos acompanha a descarga líquida formando uma onda, denominada histerese (SHEN; JULIEN, 1992; CARVALHO, 1994).

A curva de histerese é influenciada pelo tamanho da bacia hidrográfica, quantidade de chuva, umidade do solo e das condições antecedentes do evento (SEEGER et al., 2004).

Minella et al (2011) comenta que há três tipos de curvas mais comuns de histerese que podem ser distinguidos em sentido horário, anti-horário e formato de oito. A partir de um

gráfico que relaciona vazão com concentração de sólidos em suspensão é possível analisar o comportamento hidrossedimentológico da bacia, de acordo com o sentido e formato do laço da histerese que sofre influência direta das características apresentadas pelo hidrograma e sedimentograma (WILLIAMS, 1989). Os principais tipos de laços fornecem características que refletem as diferenças entre os tempos de pico e da declividade dos ramos ascendente e descendente do hidrograma e sedimentograma. A Figura 03 ilustra as três classes de curvas.

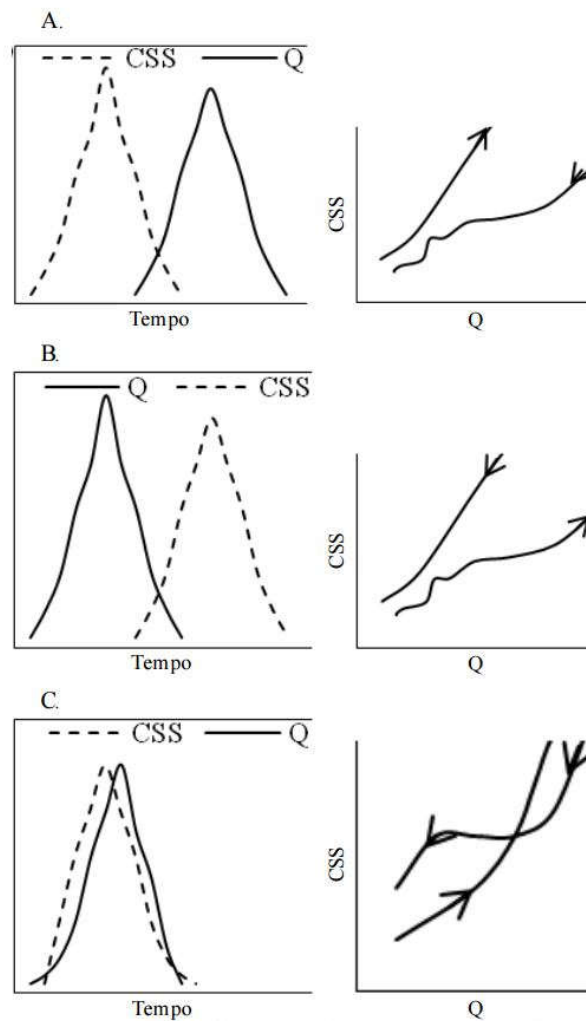


Figura 3 – Gráficos ilustrativos dos três principais padrões de laços de histerese: A) laço horário; B) laço anti-horário; e C) laço com formato de oito

Fonte: Minella et. al. (2011)

Em uma curva com sentido horário, a  $C_{ss}$  do ramo crescente é maior que a  $C_{ss}$  do ramo decrescente ou para uma mesma vazão. Segundo Seeger et al. (2004), este tipo de curva e comportamento ocorre quando os sedimentos são mobilizados, transportados e depositados rapidamente. Desta forma, acredita-se que a fonte principal de sedimentos é representado

pelos sedimentos que se encontram depositados na calha fluvial e que são carreados com a evolução do evento (LEFRANÇOIS et al., 2007).

Em uma curva no sentido anti-horário, a  $C_{ss}$  do ramo crescente é menor que a  $C_{ss}$  do ramo decrescente. Assim, ocorre um pico de  $C_{ss}$  depois do pico de vazão. Esta curva é interpretada como a chegada de sedimentos de fontes mais distantes, como aqueles sedimentos que são liberados dentro da bacia vertente e que são transferidos pelo escoamento superficial para o canal fluvial (BRASINGTON; RICHARD, 2000; GOODWIN et al., 2003).

Quando a curva apresenta tanto um comportamento horário quanto o anti-horário tem-se um laço com formato de oito. De acordo com Willians (1989) isso ocorre quando a vazão e a  $C_{ss}$  aumentam aproximadamente juntas, mas é a  $C_{ss}$  que atinge primeiro o pico, apresentando uma curva horária. Após o pico de  $C_{ss}$ , os valores de concentração são elevados havendo uma lenta descida do ramo decrescente enquanto que a vazão decresce rapidamente.

Minella et al. (2011) comenta que a representação da histerese mais comum é do “laço” tipo horário com o pico da  $C_{ss}$  antecedendo o pico da vazão (Figura 4), hidrograma com sedimentograma e a relação de concentração de sedimentos em suspensão com a vazão.

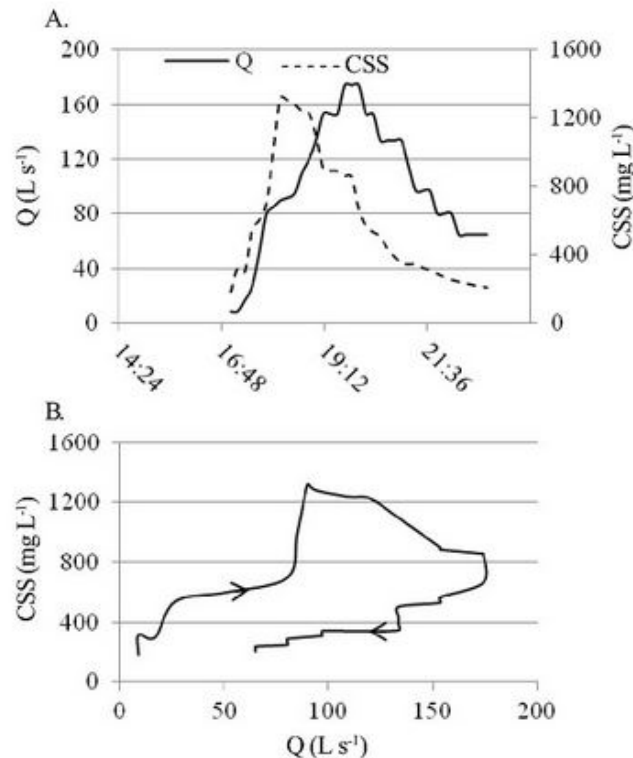


Figura 4 – Exemplo de hidrograma, sedimentograma e relação concentração de sedimentos em suspensão ( $C_{ss}$ ) X Vazão (Q)

Fonte: Minella et al. (2011)

Com relação ao transporte de sedimentos no rio principal, a carga em suspensão é predominantemente maior que a do fundo (90 a 95%) no alto curso. À medida que a erosão da bacia e a declividade do leito vão diminuindo, a proporção da carga de fundo vai aumentando, podendo variar de 10 a 35% da carga total (CARVALHO, 1994; SILVA, 2004).

De acordo com Carvalho (1994), uma propriedade importante dos sedimentos nos rios é a distribuição do tamanho das partículas ou granulometria. Uma partícula em suspensão está sujeita à ação de seu peso, que tende a deslocá-la para baixo e da velocidade e turbulência da corrente que tendem mantê-la em suspensão. Portanto, a distribuição da granulometria dos sedimentos ao longo da seção transversal é variável em função da velocidade de corrente, considerando que as velocidades são menores perto das margens, assim como ilustra a Figura 05.

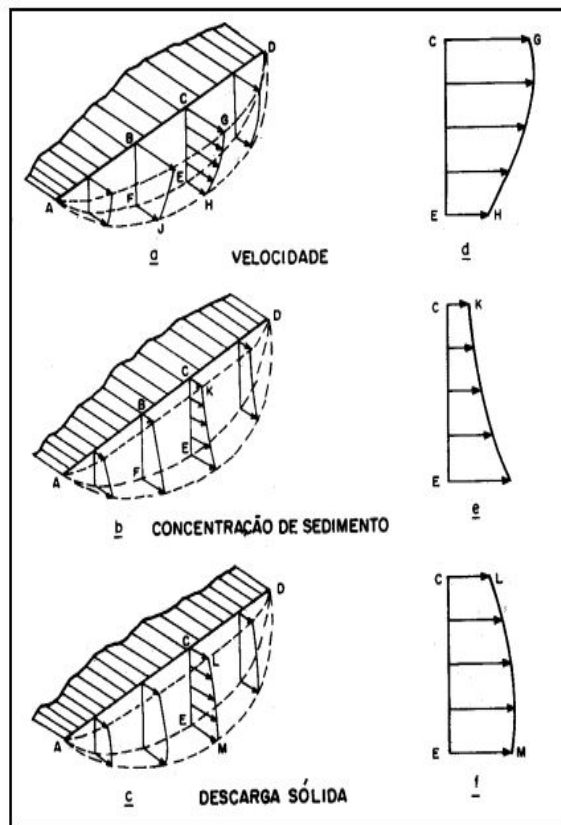


Figura 5 – Diagrama da distribuição da velocidade, concentração de sedimentos e descarga sólida nos cursos d'água. Na figura, setas maiores indicam valores mais elevados

Fonte: Carvalho (1994)

Na Figura 06 observa-se as diferentes distribuições de concentração de sedimentos, dependendo do tamanho da partícula. As areias apresentam uma distribuição heterogênea,

sendo de alta concentração no fundo e muito baixa na superfície. Os siltes e as argilas têm uma distribuição mais homogênea. Sabendo-se que a concentração de sedimentos é mais elevada no fundo do rio, deve-se levar em conta que a velocidade do fluxo é mais importante perto da superfície e muito fraca no fundo (CARVALHO, 1994).

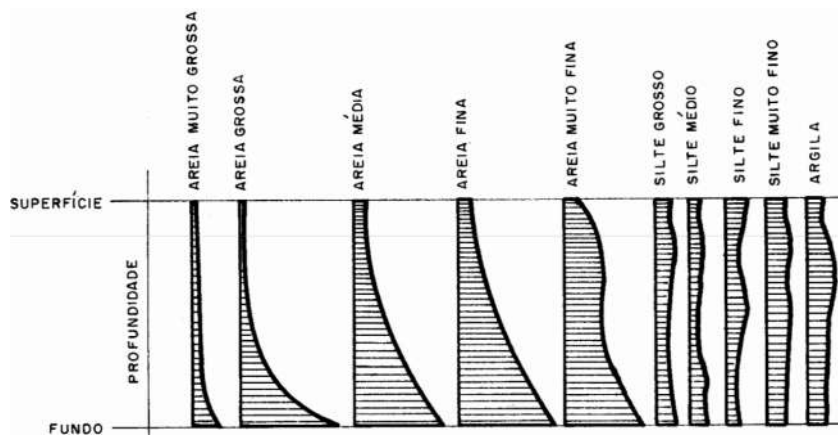


Figura 6 – Distribuições de concentração na vertical para materiais de tamanhos variados que podem ser encontrados num curso d'água

Fonte: Carvalho (1994)

### 3.3 MÉTODOS DE MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO EM RIOS

O transporte de sedimentos pelos rios é um fenômeno complexo que depende de processos erosivos ocorridos nas vertentes da bacia e no leito e margens dos rios e que fornecem material que, por sua vez, depende da energia do fluxo para ser transportado. A combinação dessas variáveis com fornecimento de material e energia do fluxo resulta em um fenômeno com grande variação no tempo e no espaço. O transporte de sedimentos é um processo natural e faz parte da evolução da paisagem originando formas geomorfológicas (SANTOS et al., 2001).

O total de sedimento transportado ou descarga sólida total pode ser determinado por diversos métodos diretos ou indiretos, dentre eles: dados medidos nos rios, levantamentos topo-batimétricos de reservatório, estimativa da erosão por modelos de perda de solo ou através de regionalização dos dados (CARVALHO, 1994). Correlacionar a descarga sólida com a turbidez também é uma forma de medição que vem sendo aplicada.



Existem duas maneiras de avaliar o transporte de sedimentos, utilizando fórmulas para o cálculo teórico de transporte ou por medição na seção do rio acompanhado de análise de séries históricas obtidas diretamente. Este segundo é denominado sedimentometria (CARVALHO, 1994).

Várias fórmulas permitem estimar a descarga sólida, porém nenhuma pode ser aplicada a todas as situações, segundo Figueiredo (1993). Estas formulações foram obtidas através de ensaios de laboratórios a partir de variáveis hidráulicas entre outros parâmetros. Os resultados alcançados por formulações matemáticas raramente coincidem com os resultados obtidos em campo, o que dificulta a sua implementação em outras regiões. No entanto, são úteis quando se deseja fazer uma avaliação preliminar da descarga sólida, servindo de subsídios para anteprojetos (SILVA, 2004).

Estas técnicas não serão abordadas nesse trabalho, em função das suas limitações. Em vista do exposto, faz-se necessário o desenvolvimento de práticas e técnicas que visem à mensuração dos processos de quantificação da descarga sólida. Essas práticas relacionam-se ao conceito de sedimentometria.

Segundo Carvalho et al. (2000), a sedimentometria se refere ao processo de quantificação do sedimento transportado pelos cursos d'água. A carga sólida medida é constituída de argila, silte e areia, que são as classes de tamanho em que se dividem as partículas do solo. No Brasil a sedimentometria tem sido realizada, tradicionalmente, por amostragem de sedimento, análise em laboratório e cálculos de obtenção da descarga sólida, seguindo os preceitos estabelecidos pelo USGS para os Estados Unidos da América.

Na tabela 01 apresentamos a síntese dos métodos diretos e indiretos para amostragem de sedimentos.

Tabela 1 – Síntese dos métodos diretos e indiretos para amostragem de sedimentos segundo Vanoni, 1977; Morris e Fan, 1998.

<b>Medição</b>	<b>Descrição</b>	<b>Equipamento ou metodologia de medida</b>
Direta	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água e sedimento, análise de concentração e granulometria e cálculos posteriores da descarga sólida.	Equipamentos: de bombeamento equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos, pontuais por integração e integradores na vertical (no Brasil usa-se principalmente a série norte-americana - U-59, UH-48, DH-59, D-49, P-61 e amostradores de saca).
	Por acumulação do sedimento num medidos (proveta graduada)	Garrafa Delft (medição pontual e concentração alta)
Indireta	Usa equipamentos que medem no curso d'água uma grandeza como a turbidez ou ultra-som para posteriormente relacionar com concentração de sedimentos.	Medidos nuclear (portátil ou fixo), Ultra-sônico ótico, Ultra-sônico Doppler de dispersão, Turbidímetro e ADCP (Doppler).
Indireta	Uso de imagens de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem, em grandes rios.	São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das imagens com as concentrações medidas.

Fonte: VANONI (1977); MORRIS & FAN (1998)

### 3.3.1 Métodos Diretos

Os métodos diretos são aqueles que necessitam de coleta de sedimentos por amostragem da mistura água-sedimentos, análise da concentração em laboratório, da granulometria e de cálculos posteriores (CARVALHO, 2000). A finalidade da amostragem é definir a tipologia e a concentração do material transportado no momento da medição, de forma a se obter amostras representativas na seção transversal do curso d'água (SANTOS et al., 2001). A técnica de amostragem dos sedimentos a ser utilizada durante um estudo poderá variar de acordo com a disponibilidade de equipamentos e/ou objetivos a serem atingidos (POLETO; MERTEN, 2006).

As técnicas de amostragem de material em suspensão são: pontual instantâneo, pontual por integração e integração nas verticais. Em todos esses métodos deve-se sempre obedecer

aos limites de profundidade máxima e os limites mínimos e máximos de velocidade do fluxo para cada amostrador de sedimentos utilizado nas medições conforme ANA (2012).

As metodologias de levantamento de material em suspensão consagradas nas literaturas e usadas como padrões de referência pelas principais instituições são Igual Incremento de Largura - IL e Igual Incremento de Descarga – IID de acordo com ANA (2012) e WMO (2009).

De acordo com as orientações para operação de amostragem da ANA, a amostragem mais rotineira e clássica é por integração na vertical, pois permite a obtenção da concentração e da granulometria média na vertical. A amostragem é feita em várias verticais para permitir a obtenção de valores médios em toda a seção, sendo que a distribuição de sedimento é variável em toda a largura e profundidade do rio (ANA, 2012).

#### 3.3.1.1 Método por Igual Incremento de Largura

O princípio básico do método por Igual Incremento de Largura (Figura 07) baseia-se na divisão de uma seção transversal de um rio em segmentos igualmente espaçados, sendo a amostragem realizada em uma vertical, localizada na posição central de cada segmento. Procura-se entre as verticais escolhidas a que apresenta o maior valor entre o produto velocidade x profundidade, de onde se obtém a primeira amostra e encontra-se o tempo mínimo de amostragem. As outras amostras são coletadas na mesma velocidade de trânsito e, assim, terão volumes diferentes que poderão ser reunidos em uma amostra única para que seja feito apenas uma análise ou poderá continuar separado e a análise ser individual (CARVALHO, 1994; SANTOS et al., 2001; BICALHO, 2006).

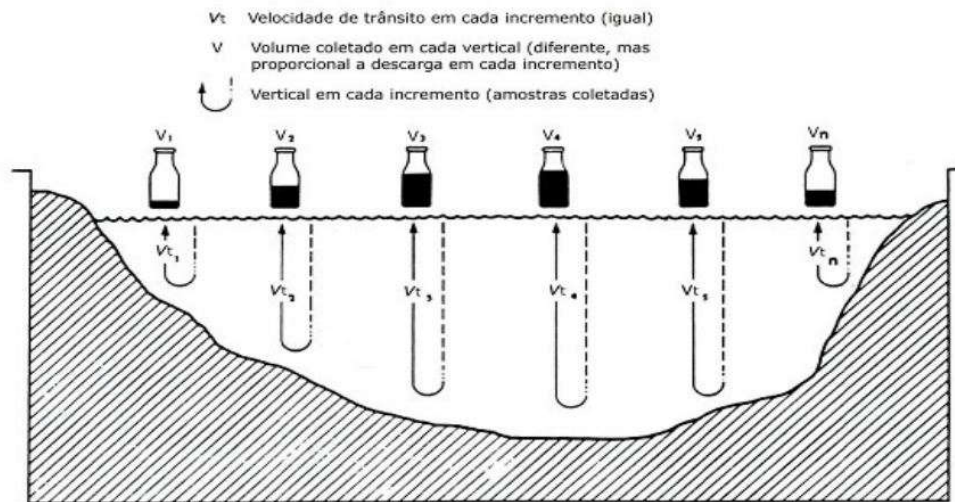


Figura 7 – Representação da amostragem pelo método do Igual Incremento de Largura

Fonte: Carvalho et al. (2000)

Poleto e Merten (2006) afirmam também que, a depender do propósito da pesquisa, pode-se utilizar um determinado tipo de amostrador, como por exemplo, o do tipo acumulativo para caracterização geoquímica dos sedimentos, o do tipo instantâneo para identificação de fontes de sedimentos, o do tipo automático para estudos mais completos. Pode-se citar também o integrador vertical que é o equipamento mais utilizado, segundo Carvalho (1994).

Os equipamentos mais utilizados para amostragem de sedimento em suspensão são o DH-48 (Figura 08), DH59 (Figura 09), D-49, sendo todos do tipo integrador vertical (ANA, 2012).



Figura 8 – Amostrador convencional USDH-48

Fonte: Lopes (2010)



Figura 9 – Amostrador DH-59 com guincho Hidrométrico

Fonte: ANA (2012)

### 3.3.1.2 Método por Igual Incremento de Descarga

O método IID exige o conhecimento prévio da velocidade e das vazões em cada subamostra. Consiste em subdividir a vazão total em partes iguais de acordo com o número de verticais escolhidas para amostragem da mistura de água e sedimento. Cada amostra representa uma parte igual da vazão e o volume amostrado será igual (BACK, 2006).

A Figura 10 apresenta o exemplo de amostragem pelo método de IID, onde pode se observar o mesmo volume em todas as garrafas e em espaçamentos diferentes.

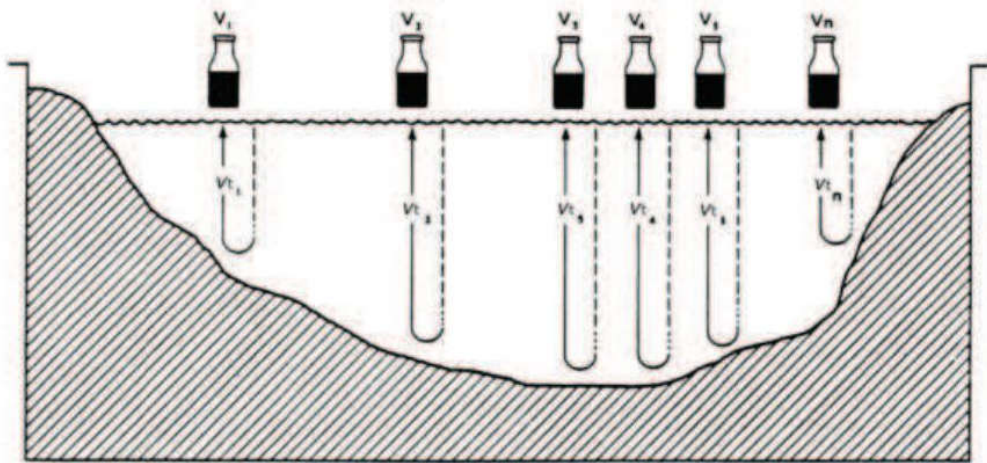


Figura 10 – Representação da amostragem pelo método do Igual Incremento de Descarga

Fonte: Back (2006)

Para a amostragem por IID utiliza-se os mesmos equipamentos vistos no método IIL.

### 3.3.1.3 Método Pontual

A amostragem pontual consiste em pegar um volume de água a uma profundidade do rio e a uma distância específica da margem. Para a seleção dos pontos de coleta divide-se a secção do rio em várias verticais. Existem dois tipos de amostradores pontuais: os instantâneos e os integradores, segundo Carvalho (2000):

- amostragem pontual instantâneo: são usados amostradores do tipo de cilindro horizontal que é mergulhado com as válvulas laterais abertas, até a profundidade desejada. Esse tipo de aparelho opera com um mensageiro que dispara duas válvulas especiais de borracha que fecham o cilindro, nas extremidades. Também há o amostrador com mecanismo elétrico, (USDH-49, Figura 11) que é um equipamento que só começa a realizar a coleta após ser acionado a uma determinada profundidade.



Figura 11 – Amostrador DH-49 Pontual

Fonte: <<http://www.hidromechc.com.br/hidrometria>>

– amostragem pontual integrada: este amostrador é aberto no local desejado e coleta a amostra em um determinado tempo (normalmente superior a 10 s). (CARVALHO et al., 2000).

Filizola e Guyot (2011) também comentam que no trabalho realizado na Amazônia foi utilizada a técnica pontual de alta frequência amostral com frequência de 10 dias com tomada de água na superfície, sendo que já havia sido feita uma calibração relacionando as amostras da superfície com as da seção total, que foram realizadas em maior detalhe e em diversas profundidades, e ainda segundo o autor, estudos de maior detalhe estão sendo realizados pela equipe The Environmental Research Observatory on the Rivers of the Amazon Basin - ORE/HYBAM.

O método pontual de amostragem corresponde a uma amostragem pontual de alta frequência, no qual era utilizado inicialmente apenas em trabalhos científicos (CALHOUN; FLETCHER III, 1999). No entanto, cada vez mais esse procedimento tem sido incorporado aos levantamentos rotineiros, principalmente em regiões de difícil acesso, pois trata-se de um método simples e barato (PICOUET et al, 2000; WALLING et al., 2000; ROIG, 2005.)

O método pontual foi amostrado simultaneamente ao levantamento por IIL, visando o estabelecimento da correlação da concentração entre os dois métodos (ROIG 2005). De acordo com esse autor que fez um trabalho na porção média do rio Paraíba do Sul, no estado de São Paulo, a análise da distribuição da concentração dos pontos obtidos simultaneamente pelos métodos de amostragem pontual e por IIL revelou a existência de uma correlação positiva marcada por um espalhamento linear, na qual o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,9917, indicando 99% de correlação entre os métodos e um resíduo médio de 8,7%.

Roig (2005) ainda comenta que para os objetivos do trabalho foi considerado um resultado satisfatório. De acordo com os critérios apresentados na tabela 02, foi observada uma correlação muito forte.

Tabela 2 – Classificação das correlações de acordo com o valor de r

Coeficiente de Correlação (r)	Correlação
0,00 - 0,19	Muito fraca
0,20 - 0,39	Fraca
0,40 - 0,69	Moderada
0,70 - 0,89	Forte
0,90 - 1,00	Muito Forte

Fonte: SHIMAKURA (2006)

#### 2.3.1.4 Método Amostrador Automático

Para facilitar o monitoramento de recursos hídricos em bacias hidrográficas com dificuldades econômicas decorrentes de grandes distâncias a serem percorridas e em locais de difícil acesso, pode-se utilizar o recurso de amostragens automáticas através de equipamentos programáveis, tais com os amostradores automáticos (GRUTKA, 2013).

Poleto e Merten (2006) explicam que se equipamentos automáticos de coleta, como o ISCO, forem utilizados é necessário realizar um procedimento de calibração para a validação das amostras obtidas por esses equipamentos, já que o ISCO realiza coletas pontuais de amostras, o que pode não expressar a condição real das concentrações de sedimentos.

Coiado (2001) afirma que coletas realizadas com amostradores convencionais (USDH-48, USDH-59 e USDH-49) são inviáveis quando se tem o objetivo de coletar amostras em um período sequencial de várias horas. Por esse motivo, o autor fez teste com amostrador automático do tipo ISCO (Figura 12), que permite programar a coleta das amostras sem a presença de um técnico e verificou que os valores de concentração obtidos eram bem próximos dos encontrados do modo convencional.





Figura 12 – Amostrador automático 6700 FR – ISCO

Fonte: Coiado (2001)

A rapidez de ocorrência e a dificuldade em acertar o horário foram os motivos apresentados por Lobo et al. (1999) para questionar a amostragem manual para sedimentos durante eventos chuvosos. Os autores sugerem, também, a instalação de amostrador automático.

Os procedimentos para a medição contínua da concentração de sedimentos em suspensão permitem a obtenção de dados para pequenos intervalos de tempo, favorecendo a compreensão da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica (VESTENA et. al., 2007). Assim, quando se utiliza amostradores automáticos ou turbidímetros a coleta é feita em apenas um ponto da seção transversal, sendo importante o conhecimento da variabilidade espacial da concentração de sedimentos para a transformação desses valores pontuais em médias globais na seção (LIMA et. al., 2010).

### 3.3.2 Métodos Indiretos

Os métodos indiretos são realizados no campo, *in situ*, com equipamentos que obtém a concentração através de relações como a turbidez ou ondas acústicas (ADCP).

### 3.3.2.1 Métodos Acústicos

Uma possibilidade de medição é o uso do ADCP (FILLIZOLA et. al., 1999). Este equipamento é interessante, visto que, além de obter a concentração média, fornece a variação da concentração na seção transversal e sua correlação com a velocidade, sendo possível construir modelos 2D e até 4D para a região em estudo, no qual o método faz uma relação entre o backscattering e a quantidade de sedimentos que atravessa a seção.

Estudo realizado na bacia hidrográfica do rio Vacanaí-Mirim no estado do Rio Grande do Sul - RS, utilizou os métodos alternativos ADCP e turbidímetro para correlacionar sedimento em suspensão com turbidez a partir do eco medido pelo ADCP onde a correlação chegou a 67% entre as faixas restritivas, sendo que a turbidez calculada a partir do eco não ultrapassava 2 vezes o valor da turbidez medida (Figura 13), indicando uma relação consistente entre os dados de acordo com os autores (SCHUCK, 2013).

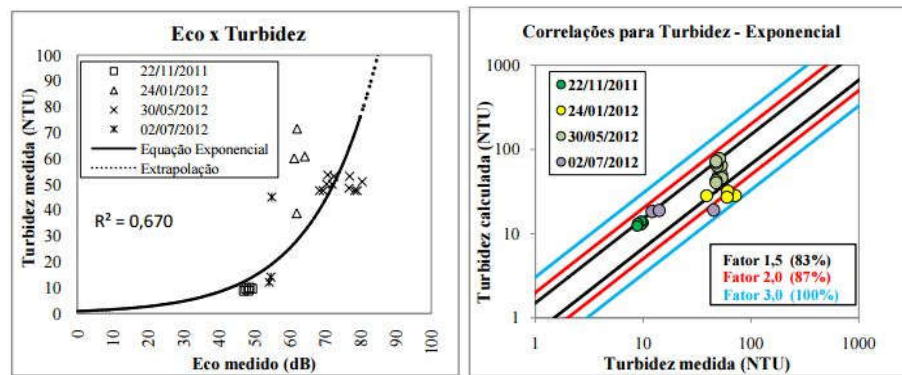


Figura 13 – Curva de ajuste aplicada aos dados (a) ajuste exponencial (b) correlação dos dados obtidos de turbidez verdadeira e calculada.

Fonte: Schuck (2013)

Outro exemplo para a correlação do uso do ADCP com sólidos em suspensão foi o estudo da bacia do rio Amazonas no município de Óbidos – AM, onde utilizaram três diferentes métodos para descarga de sedimentos, sendo um deles o ADCP que chegaram a um coeficiente de variação médio de 13% para profundidades de até 20m entre os valores de backscattering e sólidos em suspensão para o método de Igual Incremento de Largura. Para toda a seção foi feito uma correlação de 64% entre os dois métodos (Figura 14) (FILLIZOLA; GUYOT, 2004).

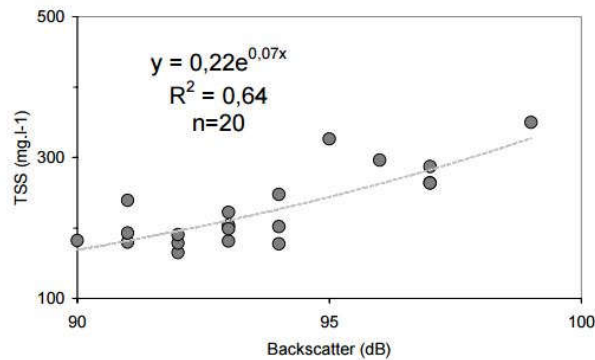


Figura 14 – Representação do TSS (Sólidos em Suspensão Totais) com valores de backscattering (decibéis)

Fonte: Filizola & Guyot (2004)

### 3.3.2.2 Método Turbidez

Um método que vem sendo bastante utilizado e difundido é a utilização de monitoramento automático da turbidez da água, como forma de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão.

Para obter a quantidade de sedimentos transportados é necessário dispor de uma longa e contínua série temporal de descarga sólida. Esta série, tradicionalmente é obtida pelo método da curva-chave de sedimentos, que relaciona a vazão líquida com a vazão sólida, medida eventualmente na estação quando da visita da equipe de hidrometria (CARVALHO, 1994).

De acordo com Fill e Santos (2001), o método da curva-chave demonstrou pouco preciso e com um gradiente de dispersão acentuado devido aos inúmeros fatores que contribuem para o aumento da concentração de sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>), no qual apresenta restrições decorrentes do elevado custo das medições que são executadas por um pessoal qualificado e treinado (hidrometristas) que não fica permanentemente no local da estação).

Devido a estas restrições, a utilização da turbidez da água, como forma de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão, tem apresentado resultados satisfatórios, não apenas por prover dados hidrossedimentológicos ininterruptos como também por apresentar um investimento relativamente atrativo a longo prazo (LEWIS, 1996; LEWIS; EADS, 1998).

Segundo Fill (2001), a Concentração de Sólidos em Suspensão (CSS) tem considerável influência no aumento da turbidez da água impedindo a penetração da luz, sendo

que Morris e Fan (1998) afirmam que “a turbidez é em geral um previsor muito melhor que a vazão para a concentração de sedimentos suspensos fluviais.

Estudos realizados na sub-bacia do capão Comprido, afluente do Lago Descoberto demonstrou e utilizou a metodologia pontual e obteve uma relação turbidez x concentração de até 92% de correlação para baixas vazões e 90% para altas vazões, sendo utilizado uma sonda fixa no corpo hídrico (LOPES, 2010).

Minella et al. (2008) utilizaram duas metodologias diferentes para calibração de equação para correlacionar turbidez e concentração de sedimento para uma pequena bacia rural no sul do Brasil. Nas primeiras foram utilizadas medidas de turbidez feitas no campo e nas segundas a medição foi feita em laboratório. Os autores buscaram observar qual metodologia apresentaria um menor erro e a verificação da turbidez diretamente em campo obteve os melhores resultados.

### 3.3.2.3 Método de Sensoriamento Remoto

Outro método que vem ganhando força, que está entre os métodos denominados de métodos alternativos, é a utilização de técnicas de processamento digital de imagens de sensores remotos na determinação da descarga sólida em suspensão para reservatórios e grandes rios (NELLSIS et al., 1998). Porém, este apresenta algumas limitações, pois está restrito as partes superficiais da lâmina d'água.

Um dos principais interesses no uso de imagens de satélite em ambientes aquáticos é verificar a variação espacial e temporal da composição da água, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água (MENEZES, 2013).

Sistemas de sensoriamento remoto disponíveis atualmente fornecem dados repetitivos e consistentes da superfície terrestre, os quais são de grande utilidade para diversas áreas de aplicação, com destaque para: urbanas, agrícolas, geológicas, ecológicas, florestais, cartográficas, oceanográficas, hidrológicas, limnológicas, dentre outras (NOVO, 2008).

Os fenômenos hidrológicos diferenciam-se espacial e temporalmente. Com isso, técnicas convencionais de coleta de dados se esbarram na limitação da representação espacial, pois permitem a geração apenas de informações pontuais. Nesse contexto, os dados de sensoriamento remoto orbital podem ser de grande utilidade, uma vez que permitem estender informações pontuais para um contexto espacial mais amplo e fornecer subsídios para uma

distribuição racional de postos de coleta de dados hidrológicos (SANTOS, 2004; NOVO, 1998).

Para monitoramento em área do tipo Amazônia, é inviável o método tradicional, devido ao alto custo operacional, à ausência de pessoal capacitado, à manutenção das estações e à dimensão geográfica da bacia. A utilização do sensoriamento remoto representa uma possibilidade de monitoramento e, conseqüentemente, contribui para uma melhor compreensão da dinâmica hidrológica na bacia como um todo (MARINHO, 2014).

#### 3.3.2.4 Método LISST's

Há também os mais novos equipamentos no mercado, que são os mais tecnológicos, como os LISST's, uma ferramenta baseada na análise da difusão de um feixe de laser em uma determinada amostra, sendo capazes de medir o tamanho das partículas e concentrações de sedimentos em suspensão, fabricados atualmente pela empresa norte americana Sequoia Inc, ([www.sequoiasci.com](http://www.sequoiasci.com)).

Encontram-se disponíveis diversos modelos desses equipamentos tanto submergíveis como não submergíveis como, por exemplo, o LISST-100x (Figura 15), que é um equipamento multi-parâmetro de difração laser mais utilizado atualmente em campo para análise da dimensão das partículas, distribuição e concentração, sendo também capaz de armazenar dados referentes à pressão e temperatura do volume amostrado. Esse equipamento é capaz de analisar 32 variações de classes de sedimentos.



Figura 15 – Equipamento LISST-100X

Fonte: Próprio autor (2015)

O LISST-100x pode simular tanto os métodos de IIL, IID ou pontual por integração, sendo que ele também gera resultados de granulometria.

O LISST-100x foi utilizado intensivamente após o acidente de vazamento de óleo com a explosão da plataforma da Deepwater Horizon em abril de 2010, para detectar gotículas, também o tamanho e a concentração de óleo nas águas do Golfo do México, nos Estados Unidos (SEQUOIA, 2015).

A Agência Nacional de Águas com intuito de comprar o equipamento LISST-100X organizou um campo teste em conjunto com representantes da empresa fabricante SEQUOIA. Para esse campo foram convidados a UnB, CAESB e foi realizado na Estação Fluviométrica São Bartolomeu – GO (Figura 16) com finalidade de comparar os resultados do equipamento com a amostragem tradicional. Os dados ainda estão em processamento para geração de um artigo em conjunto de todos os participantes.



Figura 16 – Equipamento LISST-100X em campo da ANA na Estação Fluviométrica São Bartolomeu

Fonte: Próprio autor (2015)

### 3.4 ANÁLISE LABORATORIAL

A escolha do método depende das análises que serão efetuadas, da quantidade de sedimentos na amostra e da qualidade dos sedimentos. Para amostras com baixas concentrações o método da filtração é o mais indicado, já para altas concentrações ou quando o teor de argila na amostra for grande, dificultando a filtração, indica-se utilizar o método da evaporação. Se o intuito for realizar apenas análise de concentração pode-se utilizar a

metodologia da filtração ou a da evaporação. Além disso, se houver interesse de fazer uma análise granulométrica, é indicado a utilização do método do tubo retirado pelo fundo (CARVALHO, 1994).

Após a coleta, as amostras são analisadas em laboratório para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão no instante da medida ( $C_{ss}$ ), dada em  $mg \cdot L^{-1}$ . A concentração de sedimentos multiplicada pela vazão instantânea fornece a estimativa da descarga de sedimentos ( $Q_{ss}$ ), que, integrada no tempo, fornece a estimativa da produção de sedimentos ( $ton \cdot dia^{-1}$ ). As análises são feitas utilizando a relação entre a quantidade de sedimentos presentes na amostra, em massa, dividido pelo volume da amostra coletado. Para amostras com baixa concentração é recomendado o método da filtração e para amostras com alta concentração deve ser utilizado o método de evaporação (WMO, 2009).

O método da filtração é o mais utilizado para análise de concentração e é recomendado pela rapidez de operação e simplicidade de equipamento apresentando uma relativa precisão (CARVALHO, 1994). Para a aplicação do método da filtração, o procedimento inicial deve ser a determinação do volume de amostra a ser utilizado. Em seguida, deve-se utilizar um béquer para transferir todo o composto (líquido+sedimentos) para um recipiente que funciona com uma bomba a vácuo succionando o material através de um papel filtro com malha de 0,47 mm ou inferior, que deve ser pesado antes da filtragem.

O resíduo da filtragem presente no papel filtro é levado à estufa, onde permanece cerca de 24 horas a uma temperatura em torno de  $100^{\circ}C$ , depois o material é levado para dessecadores a vácuo até atingir a temperatura ambiente, para em seguida, ser pesado na balança de precisão e o valor obtido deve ser subtraído do peso inicial do filtro. A concentração  $C_s$  é determinada pela razão entre o peso seco do sedimento ( $P$ ) contido na amostra e o volume total utilizado ( $V$ ), de acordo com a equação 02.

$$C_s = \frac{P}{V} \quad (02)$$

Para encontrar o valor da descarga sólida basta multiplicar a concentração de sedimentos pela vazão medida no momento da amostragem (SANTOS et al., 2001).

Para o método de evaporação, usa-se a redução da amostra pelo repouso da mistura por 24 horas e depois retirar o excesso de líquido isento de sedimento. Importante e necessária a determinação da quantidade de sais solúveis, o que é feito pela retirada de três pipetagens de 50ml da parte isenta de sedimento (água sobrenadante após 24 horas de repouso) para

secagem em estufa e obtenção do valor médio. Caso essas porções tenham coloração amarelada, isso deve-se à presença de colóides ou argila fina, devendo ser passadas por um filtro de pequena porosidade. Se a água estiver com coloração após o repouso de um ou dois dias, convém que a retirada do excesso seja feita em banho-maria.

A amostra água-sedimento agora reduzida na sua quantidade de água é, então, colocada em recipiente adequado à evaporação e levada à estufa para secagem. Depois de alguns instantes ou horas, quando o sedimento estiver visualmente seco, deixar-se por mais duas horas na estufa, remove-se, então, para o dessecador e depois pesagem (CARVALHO, 2000).

Cada um desses métodos tem suas restrições próprias, exigindo quantidades adequadas de sedimento contido na amostra. O método de filtração é utilizado para amostras de baixa concentração, menores que 200mg/l, e pequeno volume, para não entupir o filtro. O método de evaporação é utilizado em amostras com maiores concentrações e mais volumes. Os dois métodos exigem que se reduza o volume da amostra por processo de decantação ou em banho-maria de forma a manter todas as partículas no processo. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1981) os volumes necessários a uma correta análise com precisão adequada, são aqueles apresentados na Tabela 03.

Tabela 3 – Volumes de amostras necessários para análise de concentração de sedimentos em suspensão

<b>Concentração esperada de sedimento em suspensão</b>	<b>Volume da amostra</b>
<b>(g/m<sup>3</sup>, mg/l, ppm)</b>	<b>(litros)</b>
> 100	1
50 a 100	2
20 a 30	5
< 20	10

Fonte: WMO (1981)

Os dados necessários para o cálculo da descarga sólida são obtidos a partir da medição de descarga líquida e amostragem de sedimentos, da concentração de sedimentos, da distribuição granulométrica e outros. Para cálculo da descarga do leito por meio de fórmulas, alguns outros valores têm de ser obtidos, como a temperatura da água, a declividade da linha energética, e outros como tensão de cisalhamento, viscosidade cinemática, velocidade de queda de partículas, sendo estes últimos geralmente incluídos nos programas de cálculos disponíveis (WMO, 1981).



Espera-se um erro máximo de 10% nas determinações de descarga sólida, mesmo incluindo a obtenção da descarga do leito que é muito imprecisa. A descarga em suspensão é normalmente a parte predominante da descarga total, representando na maior parte das medições mais que 90% (CARVALHO, 2000). No entanto, a descarga do leito pode apresentar valores de 10 a 150% em relação a descarga em suspensão, segundo ICOLD (1989). Por outro lado, a análise de consistência de dados sedimentométricos é muito difícil devido aos muitos processos por que passam a sua determinação e, principalmente, à complexidade do fenômeno. Assim é que se torna muito importante que todos os erros procurem ser eliminados durante a medição e no trabalho do laboratório. Isto impõe que a medida da descarga sólida seja feita da forma mais correta possível no campo, sendo realizada por um bom hidrometrista, com equipamento adequado, tecnologia adequada, e que a análise seja feita por um químico/técnico experiente. Isto permitirá a repetição dos cálculos, se for necessário. Caso os serviços do campo e do laboratório apresentem erros, fica impossível uma correção do valor da descarga sólida.

#### *3.4.1 Curva Chave De Sedimento*

Traçar uma curva chave de sedimentos é estabelecer uma relação entre vazão e concentração de sedimentos instantânea para, então, estimar o fluxo de sedimentos (PHILLIPS et al., 1999). A descarga sólida em suspensão é, por definição, o produto da concentração de sedimentos em suspensão pela vazão líquida medida no momento da amostragem. Essa curva é gerada a partir do monitoramento de eventos de diferentes magnitudes. Com o estabelecimento da curva-chave, a descarga sólida é estimada a partir dos dados monitorados de vazão líquida (CARVALHO, 2014).

Glysson (1987) e Cobaner et al. (2009) afirmam que a curva-chave de sedimentos relaciona valores de vazão e descarga sólida e é um procedimento utilizado para extrapolar informações de concentração de sedimentos medidas de forma esporádica para informações de concentração de sedimentos não medidas. A maior representatividade da curva está diretamente ligada ao maior número de pontos medidos e a maior variação de vazão alcançada entre os valores máximos e mínimos (CARVALHO, 1994).

O uso de curvas-chave é necessário quando os dados diários de vazão são disponíveis e os de sedimento não. A existência da curva-chave permite, assim, um cálculo aproximado de dados diários de sedimentos e da descarga sólida média anual. A extrapolação dos dados para anos não observados é pouco aceitável, mas usual, segundo Carvalho (1994). Poletto e Merten (2006) indicam que a frequência mínima de medições é de uma por mês, sendo que boa parte das medições deveria ser realizada durante o período de cheias.

Como destacam Minella et al. (2008), a medição da concentração de sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>) deve estar vinculada às mudanças de nível do rio, especialmente durante eventos de cheias, pois é exatamente neste momento que ocorre o maior fluxo de sedimentos. Em realidade, cerca de 70% a 90% dos sedimentos transportados em um rio ocorrem no período de precipitações, principalmente durante eventos intensos (CARVALHO, 2008).

Carvalho (1994) afirma que entre os métodos mais utilizados para traçar a curva destacam-se o do traçado visual e a da regressão linear. A Curva-chave de sedimento pode ter os pares de dados transformados em logaritmos, devido à dispersão dos pontos, e as equações de ajustes serem linear ou polinomial (POLETO; MERTEN, 2006).

Walszon et. al. (2005), em trabalho sobre a análise do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do Iguaçu, para ajuste da curva aos dados medidos da vazão sólida de sedimentos em suspensão em função da vazão líquida, adotaram dois critérios para a aceitação ou não da curva. O primeiro estabeleceu que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtido a partir da curva, deveria ser superior a 0,60. O segundo, que a curva obtida deveria apresentar um bom ajuste visual aos dados medidos.

Há vários estudos sedimentológicos no Brasil que fazem avaliações sobre a construção e utilização da curva-chave de sedimentos.

Lopes (2010), ao realizar diversos estudos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do Córrego Capão Comprido no Distrito Federal, levantou uma curva-chave de sedimentos com base em 220 amostras coletadas em três campanhas no período de novembro de 2008 até abril de 2009. Nesse estudo, ele fez uma comparação de vazão e descarga de sedimento com um trabalho anterior na mesma bacia, em que as curvas foram estimadas com base em dados que, apesar de medidos no período chuvoso, não conseguiram valores altos de vazão e carga de sedimento. Essa comparação mostrou que curvas obtidas sem valores altos levaram a uma grande subestimativa (70%) de carga de sedimentos em suspensão.

Guimarães (2011) realizou um estudo na sub-bacia do Riacho Fundo Distrito Federal, mesmo local e estação analisada do presente trabalho e obteve uma curva-chave de

sedimentos anual com coeficiente de correlação  $R^2$  de 65% (Figura 17), utilizando-se dados do monitoramento da CAESB de vazão líquida e descarga sólida de 2004 a 2010. O estudo concluiu que o processo de assoreamento no Lago Paranoá é crítico, devido à alta produção de sedimento.

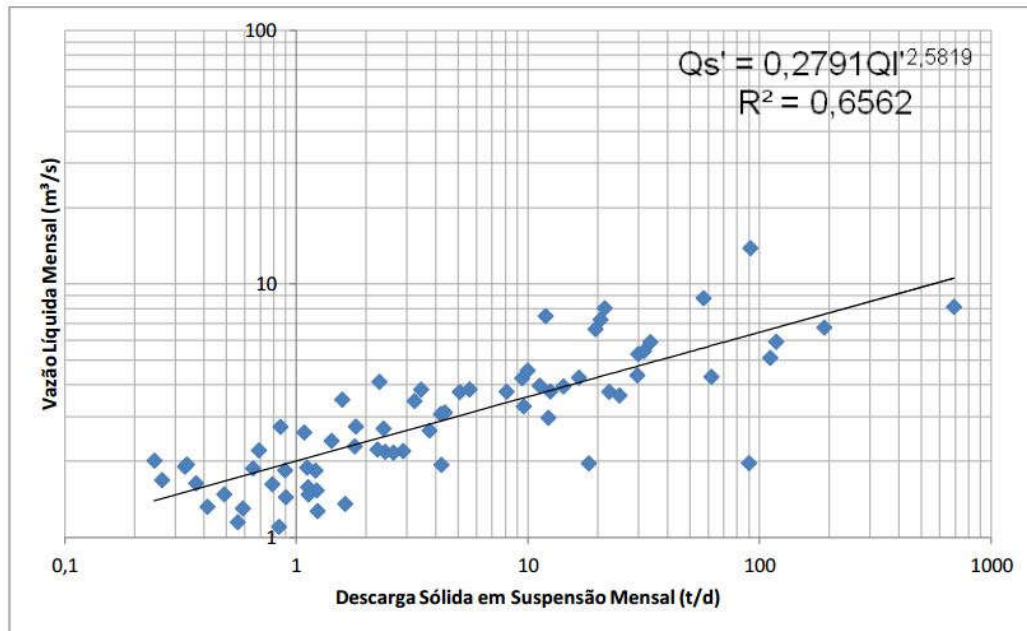


Figura 17 – Curva-chave anual de sedimentos da estação sedimentométrica Riacho Fundo Montante Zoológico na sub-bacia do Riacho Fundo

Fonte: Guimarães (2011)

Na mesma linha, Merten et al. (2006) realizaram estudo sobre a utilização da curva-chave para determinação de fluxo de sedimentos em oito postos hidrossedimentométricos no Brasil, além de um posto nos Estados Unidos. Em relação às incertezas dos valores de  $Q_{ss}$  estimados, uma simulação foi realizada para um posto que dispõe de medidas diárias de  $C_{ss}$ : foram verificadas diferenças da ordem de 50% entre os valores de  $Q_{ss}$  totais estimados e medidos.

Para o estudo de Cardoso et al. (2012), avaliou-se os problemas na estimativa da concentração de sedimentos em suspensão ( $C_{ss}$ ) associados à elaboração e extrapolação da curva-chave de sedimentos com base em dados monitorados. Em uma bacia hidrográfica de Santa Catarina, os autores plotaram pares de pontos correlacionando turbidez com concentração de sólidos em suspensão. A partir dessas amostras foram criadas duas equações de curva-chave por meio dos métodos de regressão, modificando a linha de tendência no software Excel, obteve-se uma linear ( $R^2=0,97$ ) e outra potencial ( $R^2=0,85$ ) para os mesmos

pares de dados. As equações geraram resultados parecidos para baixos valores de turbidez, porém, a partir de 20 NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez) as estimativas começaram a divergir, gerando resultados extremamente discrepantes para altos valores de turbidez. Os autores concluem que, para diminuir o erro nos resultados é necessária a coleta de amostras que representem toda a variação de C<sub>ss</sub> que ocorre no exutório da bacia.

Chow et al. (1988) lembra que todas as curvas de correlação precisam ser checadas periodicamente, devido a diferenças que podem ocorrer com a transformação do perfil de escoamento ou de características da bacia hidrográfica. A deposição de sedimentos, por exemplo, pode gerar leituras de vazões diferentes para uma mesma cota.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado nas seguintes etapas:

- Realização dos trabalhos de campo para coleta de amostras, nos meses de fevereiro/2013 a abril/2015;
- Realização de análises em laboratório das amostras coletadas para determinação dos valores de concentração;
- Análise e avaliação dos dados obtidos.

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Lago Paranoá é composta pelas sub-bacias do Bananal, Riacho Fundo, Ribeirão do Gama e Santa Maria/Torto (Figura 18). A unidade aqui estudada refere-se é a sub-bacia do Riacho Fundo.

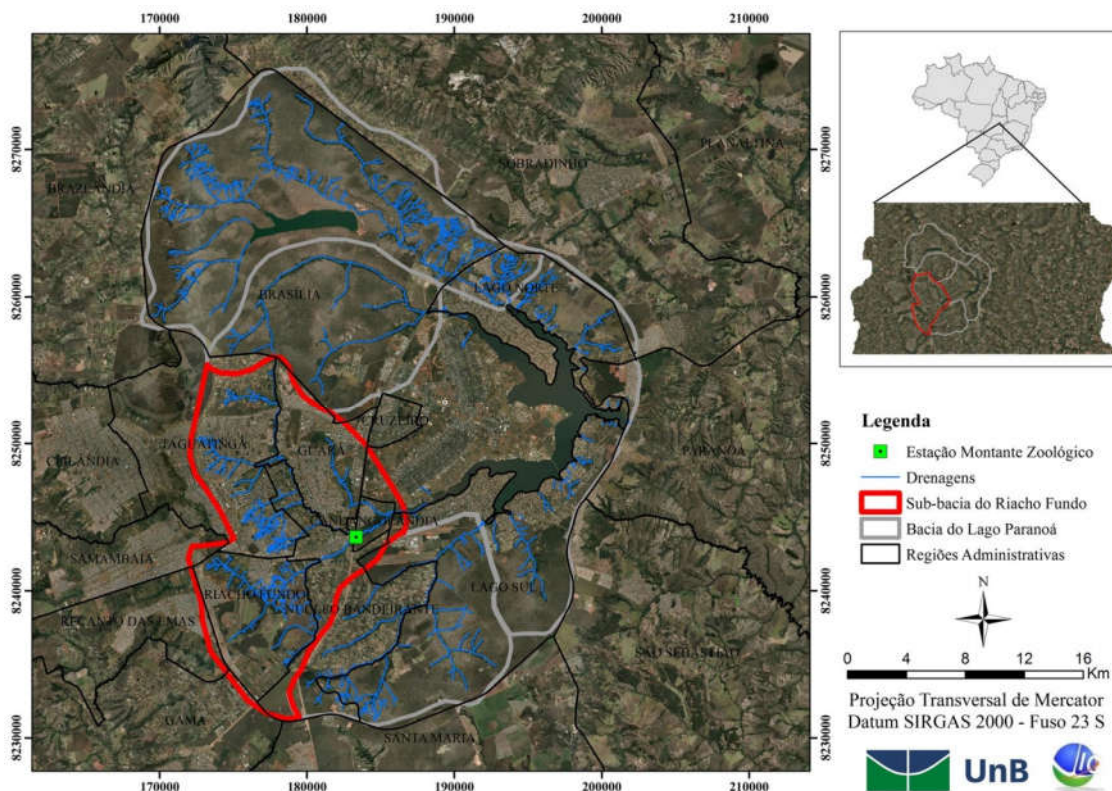


Figura 18 – Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá e Sub-bacia do Riacho Fundo

Fonte: CAESB e ESRI (2015).

A Sub-bacia do Riacho Fundo é contribuinte do Lago Paranoá e os seus principais afluentes são os córregos Vicente Pires e Guará, pela margem esquerda, e o Córrego Ipê, pela margem direita. É a área que apresenta a maior densidade e diversidade de ocupação da terra no Distrito Federal, decorrente dos desmatamentos ocorridos, acompanhados da exploração de cascalheiras, exposição e degradação do solo, movimentações de terra e forte urbanização, algumas desprovidas das redes de infra-estrutura adequadas. Esses fatores são agravados pela topografia movimentada da Sub-bacia, que acarreta o aporte substancial de sedimentos, comprovado pelo grave assoreamento do braço do Lago Paranoá que recebe a contribuição da Sub-bacia (NETTO, 2001).

Para Netto (2001), o Riacho Fundo apresenta a pior qualidade de água entre os tributários do Lago Paranoá, não apenas pela concentração elevada de fósforo (sempre acima de 48 Kg P/d), mas também devido ao assoreamento (MENESES, 2010).

O presente trabalho foi realizado no Posto Fluviométrico Riacho Fundo Montante Zoológico – EPIA 003, Código ANA: 60478200, curso d'água Riacho Fundo, localizada nas coordenadas 15° 51' 52" (S) – 47° 57' 26" (W Gr), de altitude 1005 metros, com área de drenagem de 171,26 Km<sup>2</sup>, operado pela CAESB (Figura 19). A escolha deste posto fluviométrico baseou-se na afirmativa de ser o pior tributário do Lago Paranoá em qualidade de água de acordo Menezes (2010) e trabalhos anteriores.

A sub-bacia do Riacho Fundo com os principais córregos é ilustrada na Figura 19.

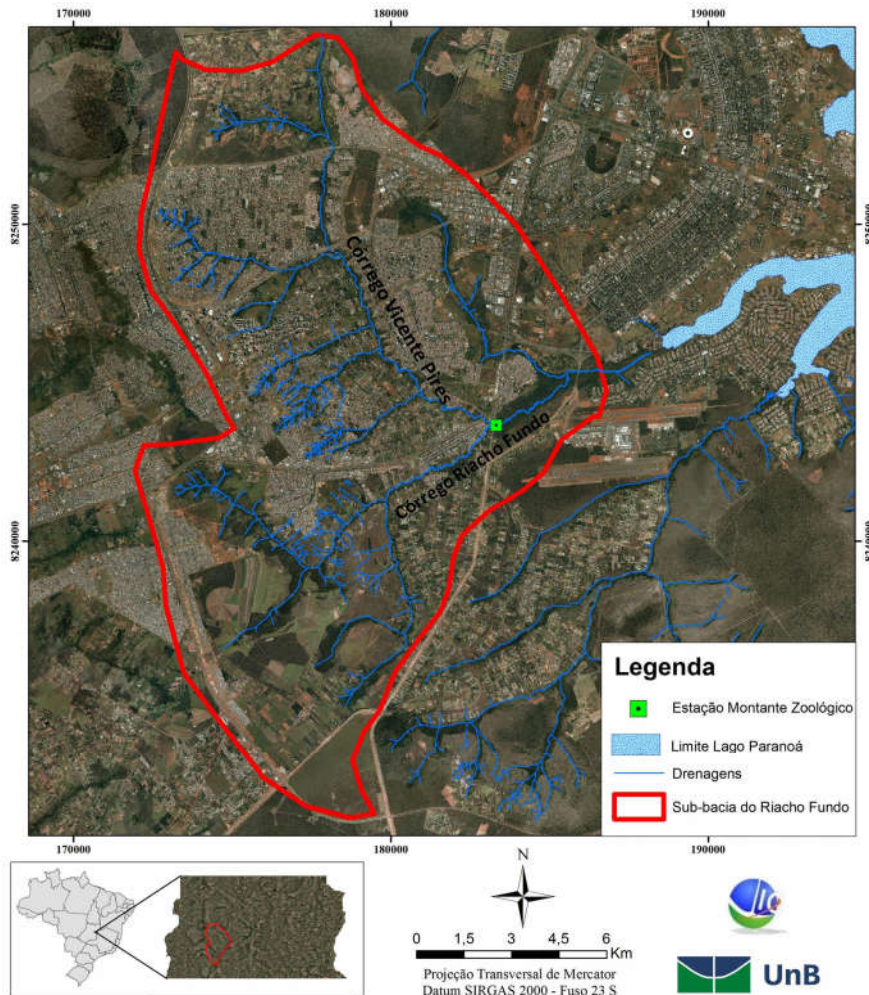


Figura 19 – Mapa de localização da Estação Fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico na Sub-bacia Riacho Fundo

Fonte: CAESB e ESRI (2015).

O posto de monitoramento hidrossedimentométrico inicialmente constituía de uma série de régua e um linígrafo.

Quando se iniciou a trabalhar na estação foi necessária a instalação de equipamentos e suas devidas infraestruturas, no qual iremos detalhar na parte de instalação dos equipamentos, desta forma a estação Riacho Fundo Montante Zoológico (Figura 20) se tornou modelo e referência de infraestrutura para as estações existentes e possíveis novas estações da CAESB.



Figura 20 – Seção da Estação Fluviométrica e Sedimentométrica Riacho Fundo Montante Zoológico

Fonte: Próprio autor (2015)

#### 4.2 INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Para realização deste trabalho foi necessário a instalação dos seguintes equipamentos:

- Linígrafo;
- Instalação do amostrador automático;
- Instalação da sonda multiparamétrica;
- Instalação do Teleférico.

O Linígrafo da estação é da marca Global Water Com Data Logger, com cabo de 9 metros, pertencente a CAESB (Figura 21), empresa que monitora os corpos hídricos do Distrito Federal.

O equipamento foi instalado em 25 de outubro de 2012, e desde então vêm gravando os dados de cota do corpo hídrico.





Figura 21 – Linígrafo Global Water

Fonte: CAESB (2014)

Por ser uma bacia pequena e com uma resposta rápida de subida de nível foi solicitado ao operador a mudança do intervalo de registros de 30min para 15 minutos, para melhor representar os eventos de cheia. Este intervalo de tempo também foi definido para o amostrador automático.

Além dos dados do linígrafo, existe a leitura da régua pelo observador que faz essa verificação às 7:00 e às 17:00. A estação Riacho Fundo Montante Zoológico conta com uma série histórica de acompanhamento de cotas desde 1978, sendo a estação mais antiga no Distrito Federal.

Para o amostrador automático, foi fixada em campo uma manilha com tampa de concreto acorrentada na margem do corpo hídrico, devido à preocupação com a segurança dos equipamentos no local, como mostra a Figura 22. Anteriormente, quando não se acorrentava a tampa, houve uma tentativa de furto do equipamento, sendo que foi furtada apenas a tampa plástica do amostrador automático.



Figura 22 – Manilha do Amostrador Automático

Fonte: Próprio autor (2015)

Para o funcionamento da sonda montou-se uma estrutura com placa solar, uma bateria de 12 volts e 18 A e um controlador Total Control 80 da marca Unitron (Figura 23 A), no qual situava-se dentro de uma caixa impermeável protegida por uma cerca com grades. Em conjunto com esta estrutura também se aterrou o cabeamento de energia da cerva até o rio. No qual houve troca de local do aterramento, devido a problemas encontrados de acúmulo de sedimentos nos sensores (Figura 23 B).



Figura 23 A – Placa solar com bateria e controlador de carga. Figura 23 B – Segunda infraestrutura de aterramento da fiação da sonda

Fonte: Próprio autor (2015)

A primeira estrutura foi construída com angulação de 45° (Figura 24), onde a sonda se situava dentro de um cano PVC de 150mm furado.



Figura 24 – Infraestrutura da sonda em 45°

Fonte: Próprio autor (2015)

No entanto, observou-se que nesta inclinação a sonda acumulava muito sedimento dentro da proteção dos sensores, pois há uma carga de sedimentos muito alta nos eventos de cheia, ocasionando problemas de superestimação dos dados como mostra a Figura 25.



Figura 25– Acúmulo de sedimento nos sensores da sonda

Fonte: Próprio autor (2015)

Posteriormente foi realizada outra instalação com a sonda em 90° dentro do corpo hídrico como ilustra a Figura 26, com o cano PVC elevado a 10cm do leito, assim, observou-se que a sonda não acumulava sedimento entre os seus sensores, além de ser prático a retirada do sedimento depositado na base do cano PVC.



Figura 26 – Instalação da sonda multiparamétrica em 90° dentro do corpo hídrico

Fonte: Próprio autor (2015)

Com a preocupação de segurança para eventos de cheia no rio, instalou-se em campo um teleférico com guincho hidrométrico que, desta forma, não haveria a necessidade do técnico entrar no rio para realizar as medições ou colocar barco no rio. Em épocas de cheias do rio, ele se torna turbulento, devido a existência de pedregulhos a montante da seção de medição, assim, dificultando as medições e coletas de sedimento em suspensão.

O levantamento fluviométrico por teleférico consta de cabo de aço movível transversal ao rio com roldanas fixas e uma mesa de apoio ao guincho hidrométrico (Figura 27).



Figura 27 – USD-49 com guincho hidrométrico amostrando por teleférico na estação fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico

Fonte: Próprio autor (2015)

### 4.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS EM CAMPO

Ao somar os novos equipamentos instalados com os já existentes, a estação Riacho Fundo Montante Zoológico passou a ter uma rede de monitoramento hidrológico e hidrossedimentológica satisfatória, tornando-se a Estação modelo de monitoramento do Distrito Federal.

Durante o intervalo compreendido entre os meses de janeiro de 2013 e abril de 2015 buscou-se obter o maior número possível de dados para dar embasamento ao estudo.

No estudo, foram obtidos, em campo, dados hidrossedimentológicos, fluviométricos e de qualidade da água.

#### 4.3.1 Medição de descarga Líquida

A CAESB realiza medições de vazão mensal em cada estação por ela opera. Para determinação da descarga líquida foram utilizados três equipamentos:

- Molinete Hidrométrico SEBA da marca OTT;
- ADC (Acoustic Digital Current meter) OTT Qliner2;
- ADV (Acoustic Doppler Velocimeter).

As medições de vazão realizadas pela CAESB são executadas com apenas o molinete hidrométrico. Para as campanhas realizadas pela UnB, foram utilizados os equipamentos acústicos de acordo com a disponibilidade dos mesmos.

Na Figura 28 observa-se a medição de vazão realizada pelo equipamento acústico ADV.



Figura 28 – Medição de Vazão na Estação Fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico  
Fonte: Sousa (2015)

#### — Molinete Hidrométrico

A CAESB realiza as medições de vazão pelo método do molinete comercial do tipo SEBA (Figura 29), da marca OTT na seção Riacho Fundo Montante Zoológico. As medições são realizadas a vau dentro do rio ou utilizando um barco quando o nível está alto. Para o cálculo das vazões utiliza-se o método da seção média, seguindo as normas estabelecidas pela ANA e CAESB.



Figura 29 – Molinete Hidrométrico

Fonte: <http://aguaesolo.com/Servicos/Hidrometria>, (2015)

— ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)

Para a obtenção da vazão utilizou-se um *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) (Figura 30), o qual é ideal para medições de fluxo em cursos d'água de pequeno e médio porte. O sensor de pressão acoplado no molinete capta a profundidade do local, permitindo assim o perfilamento da seção do córrego.

Entretanto, as etapas do processo de medição do instrumento constam de dividir a seção molhada em várias verticais, o número de verticais dependerá do tamanho da seção molhada, após estabelecer as várias pequenas seções inicia-se a medição das velocidades.

As velocidades são tomadas em dois pontos para cada vertical, a 20 e 80% na coluna d'água. Após a tomada das duas velocidades, faz-se a soma das velocidades médias e apresenta a vazão do curso hídrico.



Figura 30 – ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)

Fonte: Próprio autor (2015)

— ADC (Acoustic Digital Current meter) OTT Qliner2

O aparelho faz a medição da velocidade através da emissão de um pulso acústico cuja reflexão em partículas em suspensão na água é captada por três sensores (Figura 31). A velocidade das partículas faz com que esses pulsos sofram alterações de frequência que são proporcionais à velocidade. A vazão é calculada por integração do produto área-velocidade. A realização da medição da vazão em uma seção com 15 verticais pode ser feita cerca de 1 hora.



Figura 31 – ADC (Acoustic Digital Current meter) OTT Qliner2

Fonte: Távora (2015)



#### 4.3.2 Método de Levantamento Hidrossedimentométrico

Para a caracterização da descarga sólida, além do método tradicional usado pela CAESB, IIL, foram utilizados outros métodos visando complementar a série de dados.

O método padrão estabelecido pela ANA, IIL, foi executado com os equipamentos DH-48 ou DH49, de acordo com o nível do rio, para cotas baixas é utilizado o DH-48 e cotas altas o DH-49 com guincho hidrométrico. Todo levantamento por IIL foi realizado em conjunto todos os métodos propostos e com os mesmos equipamentos, com exceção da sonda multiparamétrica que são:

- Amostragem Pontual Central Superficial seguindo a proposta de Roig (2005);
- Amostragem na Vertical Central por Integração seguindo a proposta de Roig (2005);
- Amostragem da Turbidez seguindo a proposta de Lopes (2010).

#### 4.3.3 Dados Hidrossedimentológicos

Para os métodos clássicos e pontuais de levantamento de sólidos em suspensão foi compreendido entre o mês de janeiro de 2012 e abril de 2015.

Para o método de IIL, a área da seção transversal da estação foi dividida em doze verticais igualmente espaçadas, ( $\approx 0,5 \approx 1,5, 2,5m, \dots, \approx 11,5m$ ), de acordo com a largura de 12m em média do corpo hídrico.

As campanhas de amostragem por IIL foram precedidas da medição da descarga líquida utilizando-se o método convencional de molinete, ADC ou ADV como visto anteriormente.

Para cada uma das verticais foram determinadas as profundidades e velocidades, em seguida buscava-se determinar a vertical com maior produto profundidade x velocidade, denominada vertical padrão. Nessa vertical era determinada a velocidade de trânsito, que é calculada baseado no tempo máximo de amostragem, na velocidade média encontrada para a vertical padrão e também se baseia na largura do bico a ser utilizado. Para o bico de 1/8" o tempo máximo de amostragem utilizado equivale a 20% da velocidade média na vertical padrão e para o bico de 3/16, considera-se 40% da velocidade média da vertical padrão. Também é determinado o tempo de amostragem por tentativa e erro no enchimento da garrafa. O tempo inicialmente adotado era estimado e cronometrado juntamente com o operador do equipamento. O procedimento era repetido até que a amostra coletada tivesse o

volume adequado e, em seguida, o tempo de amostragem era utilizado para efetuar-se o cálculo da velocidade de trânsito.

A velocidade de trânsito aplicou-se às outras verticais da seção através do tempo de amostragem, dividindo-se a o dobro de cada vertical (subida e descida) pela velocidade obtida, descontando-se na profundidade os últimos 10 cm que não são amostrados. Portanto, através da aplicação do tempo de amostragem foi possível garantir que a velocidade de amostragem pré-determinada estaria sendo aplicada nas outras verticais.

Sempre que se executou um levantamento por IIL, uma amostra Pontual Central Superficial e Vertical Central por Integração foram coletadas simultaneamente visando o estabelecimento da correlação da concentração entre os métodos.

O método Pontual Central Superficial trata-se de manter o amostrador manual no meio do corpo hídrico, geralmente a 6 metros da margem, e fazer a coleta na superfície até o enchimento da garrafa.

O método Vertical Central por Integração é apenas uma vertical no meio do rio onde se desloca verticalmente o amostrador, geralmente a 6 metros da margem, com tempo de amostragem igual a vertical padrão.

Utilizando o amostrador ISCO 3700 (Figura 32), foi possível realizar 21 campanhas entre os meses de fevereiro de 2014 e abril de 2015. Todas as campanhas em eventos chuvosos, que segundo Poletto e Merten (2006) representam 90% do fluxo de sedimento transportado, com resultados satisfatórios. O equipamento foi configurado para fazer coletas em intervalos de 15 minutos, devido a rápida elevação do nível do rio observada previamente. O equipamento consta com um sensor de nível que atingindo certo nível o equipamento é disparado e inicia-se as coletas. Estabeleceu uma cota de 1,00 para a fixação do sensor de nível, pois o nível do rio só ultrapassa 1 metro quando ocorre evento de cheia. Essas campanhas geraram aproximadamente 380 amostras, que também foram levadas ao laboratório.



Figura 32 – Amostrador Automático ISCO 3700 SAMPLER

Fonte: Próprio autor (2015)

#### 4.3.4 Dados de Qualidade de Água

Para os dados de qualidade de água, utilizou-se uma sonda multiparamétrica DS5X da marca Hydrolab. A sonda monitora os seguintes parâmetros (turbidez, pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica), onde analisou-se apenas os dados do parâmetro de turbidez para as coletas em campo e em laboratório. A sonda, que foi cedida pela Ana (Agência Nacional de Águas), ficou em campo por um período de seis meses entre o mês de novembro de 2014 e abril de 2015.

Durante o monitoramento com a sonda, foi observado que o sensor de turbidez apresentou problemas de oscilação nos valores, onde a mesma foi substituída por outra sonda DS5X. Porém, esta segunda sonda também apresentou problemas técnicos de leitura dos valores, mantendo no limite do *range de 3000 NTU*. Este problema foi verificado em laboratório, devido a vibração exercida na sonda dentro da tubulação por estar içada a um cabo de aço a 10 cm do leito do rio. Desta forma, foi devolvida à ANA para verificação.

Com o monitoramento da turbidez em campo obtivemos 2.447 registros gravados com intervalo de 15 minutos entre eles.

## 4.4 LABORATÓRIO

### *4.4.1 Processamento das Amostras de Campo*

As análises laboratoriais foram realizadas segundo o procedimento padrão estabelecido pela ANA e descrito em detalhe por Carvalho et al. (2000). Esta também é a metodologia utilizada pela CAESB na manipulação das amostras da mistura água-sedimento.

As análises laboratoriais foram executadas 40% no Laboratório de Águas da CAESB, para aprendizado do método e 60% no Laboratório de Geoquímica da UnB, que conta com toda a infra-estrutura necessária para o processamento das amostras.

É importante que o procedimento adotado seja o mesmo que o utilizado no laboratório da CAESB para evitar a introdução de novos erros provocados por diferentes metodologias. A mesma metodologia foi utilizada para as amostras do método clássico de IIL e dos métodos alternativos como Pontual Superficial Central, Vertical Central por Integração, Pontual do Amostrador Automático e as coletas feitas pelo amostrador automático, com exceção da análise de turbidez realizada no laboratório da CAESB, devido a problemas técnicos.

Na Figura 33 é possível observar a variação da concentração de sólidos em cada amostra, na medida em que foram sendo coletadas. Estas amostras foram coletadas durante evento de chuva específico que ocorreu no dia 13/02/2014, sendo que as amostras foram bem representativas na variação da quantidade de sedimento no momento de uma chuva e da variação do rio.



Figura 33 – Amostras coletadas pelo amostrador automático na estação Riacho Fundo Montante zoológico

Fonte: Próprio autor (2015)

Para o processamento das amostras foram utilizados os métodos de filtração e evaporação, devido à concentração visual de sedimentos muito elevada.

Para a determinação de concentração por filtração foram utilizadas membranas com porosidade de  $0,45\mu\text{m}$  e uma “rampa” de filtragem com três recipientes com capacidade de 250ml cada, ligados a uma bomba a vácuo (Figura 34).

Primeiramente, as membranas foram aquecidas a uma temperatura de  $100^\circ$  durante 15 min na estufa, e posteriormente resfriada em dissecadores (15 min). Ao atingirem a temperatura ambiente, as membranas serão pesadas para determinação dos pesos iniciais ( $P_i$ ). Em seguida, as amostras de cada seção serão homogêneas em um único recipiente para determinação do seu volume (em litros), denominada de amostra unificada, para posterior filtragem. Após as filtrações as membranas foram novamente aquecidas a  $100^\circ$  por cerca de 1h e resfriadas a temperatura ambiente para serem pesadas para a determinação do peso final ( $P_f$ ) (Figura 35).

A concentração (mg/L) foi obtida dividindo-se a diferença do peso final ( $P_f$ ) e iniciais ( $P_i$ ) das membranas pelo volume da amostra. O resultado obtido descreve a razão entre a massa de sedimento e o volume da mistura água-sedimento, de acordo com a seguinte equação (03):

$$\text{Concentração (mg/L)} = \frac{P_f \text{ (mg)} - P_i \text{ (mg)}}{\text{Vol (L)}} \quad (03)$$



Figura 34 – Método de Filtração das amostras de campo no Laboratório de Geoquímica – UnB

Fonte: Sousa (2015)



Figura 35 – Pesagem dos filtros em balança analítica

Fonte: Próprio autor (2015)

No método de evaporação, primeiramente foi verificado o volume inicial de cada amostra em proveta de 2000 ml e anotado na mesma. A amostra foi deixada em repouso por, pelo menos, 4 dias, em local protegido da luz.

Foram utilizados 1 becker de 250 ml e dois beckers de 50 ml para cada amostra, esses beckers foram levados a estufa por duas horas e após esse tempo permaneceram 1 hora em dissecadores para chegar a temperatura ambiente, depois pesados em balança analítica para determinação do peso inicial dos beckers.

Com cuidado, para não movimentar a amostra em descanso, foi retirado o líquido sobrenadante, com pipeta volumétrica, sendo duas porções de 50 ml para cada Becker (para análise dos sólidos dissolvidos).

Caso o líquido sobrenadante resultante do processo de decantação do sedimento apresentasse coloração, foi realizado a filtração (com filtro já pesado inicialmente) para retenção do sedimento em suspensão, a fim que seja computado no cálculo final como sólidos suspensos. O filtro foi levado à estufa por uma hora e pesado em balança analítica, a amostra filtrada foi devolvida para os beckers de 50 ml tomando o cuidado de lavar completamente o recipiente onde continha a amostra, com água destilada acrescentando a água destilada ao Becker.

Em seguida retirou o líquido sobrenadante restante de forma a deixar com aproximadamente 200 ml da amostra inicial por sifonagem com mangueira com cuidado para não movimentar o sedimento depositado no fundo, assim o restante da amostra foi transferido para o Becker de 250 ml, já pesado, tomando cuidado de lavar completamente o recipiente onde continha a amostra com água destilada e acrescentar no Becker.

Transferir os dois beckers de 50 ml e o de 250 ml para estufa com temperatura entre 103 a 105° C até que todo o líquido evapore (Figura 36). Após todos os procedimentos resfriar em dissecadores até a temperatura ambiente e pesar os beckers em balança analítica.



Figura 36 – Beckers dentro da estufa no Laboratório de Geoquímica – UnB

Fonte: Próprio autor (2015)

#### 4.4.2 Calibração da Sonda Multiparamétrica DS5S

Para a calibração, a sonda era encaminhada mensalmente para a ANA, onde foram feitas as calibrações (Figura 37) dos sensores de pH, Condutividade, OD e turbidez. Para a calibração do sensor de pH foram utilizadas soluções padrões de 4 e 7. Para condutividade foi utilizado solução padrão de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para o sensor de Oxigênio Dissolvido foi necessário entrar com o valor de pressão atmosférica em mmHg e ser feita a calibração com água da torneira. Para a calibração do sensor de turbidez, o ponto zero foi feito com água da torneira e o segundo ponto com solução de 100NTU de acordo com as normas técnicas do equipamento.



Figura 37 – Calibração da Sonda Multiparamétrica DS5X no Laboratório da ANA

Fonte: Próprio autor (2015)

#### 4.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Foi necessário analisar-se os dados de vazão, cota, turbidez coletados em campo, bem como os dados obtidos no laboratório pelas análises de sólidos.

##### 4.5.1 Determinação da Curva-Chave de Vazão

A partir dos dados brutos de medições de vazão realizados pela CAESB entre janeiro de 2012 e junho de 2015 procedeu-se uma comparação entre três curvas-chave. A primeira elaborada e utilizada pela CAESB, uma segunda elaborada neste estudo, designada por “UnB” e uma curva-chave elaborada pelo Programa de Pós-Graduação em tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH), onde chamaremos de “PTARH”.



Para a elaboração das curva-chaves foram utilizados os mesmos valores de cota-vazão do ponto de monitoramento em questão, como é observado na tabela 04. Foram analisados os erros residuais associados a cada uma das curvas-chave analisadas.

Tabela 4 – Valores das medições mensais realizadas pela equipe da CAESB na estação Riacho Fundo Montante Zoológico

Data da Medição	Cota (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Data da Medição	Cota (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
05/01/2012	1,14	4,51	16/09/2013	0,75	1,39
08/02/2012	0,97	3,3	08/10/2013	0,9	2,05
08/03/2012	0,9	2,82	18/11/2013	0,94	2,57
10/04/2012	1,03	3,71	16/12/2013	0,99	3,59
09/05/2012	0,93	2,71	09/01/2014	0,92	3
11/06/2012	0,88	2,24	13/02/2014	0,86	2,66
09/07/2012	0,85	1,97	14/03/2014	0,98	3,49
15/08/2012	0,82	1,59	09/04/2014	1,13	5,89
14/09/2012	0,8	1,42	14/05/2014	0,96	2,95
08/10/2012	0,82	1,03	16/07/2014	0,85	2,37
13/11/2012	1,06	4,03	21/08/2014	0,815	1,93
10/12/2012	0,99	3,41	21/09/2014	0,8	1,88
09/01/2013	0,99	3,4	06/10/2014	0,78	1,65
08/02/2013	0,96	3,67	11/11/2014	0,86	2,67
08/03/2013	0,92	3,21	11/12/2014	1,03	4,3
11/04/2013	1,19	6,72	13/01/2015	0,86	2,52
28/05/2013	0,86	2,48	09/02/2015	0,95	3,51
11/06/2013	0,85	2,41	11/03/2015	0,96	3,6
19/07/2013	0,79	1,79	14/04/2015	1,06	4,35
14/08/2013	0,77	1,54	13/05/2015	1	3,92

A partir dos dados da tabela, plotam-se os pontos medidos num eixo retangular h/Q gerando um gráfico de dispersão, conforme apresentado na Figura 38.

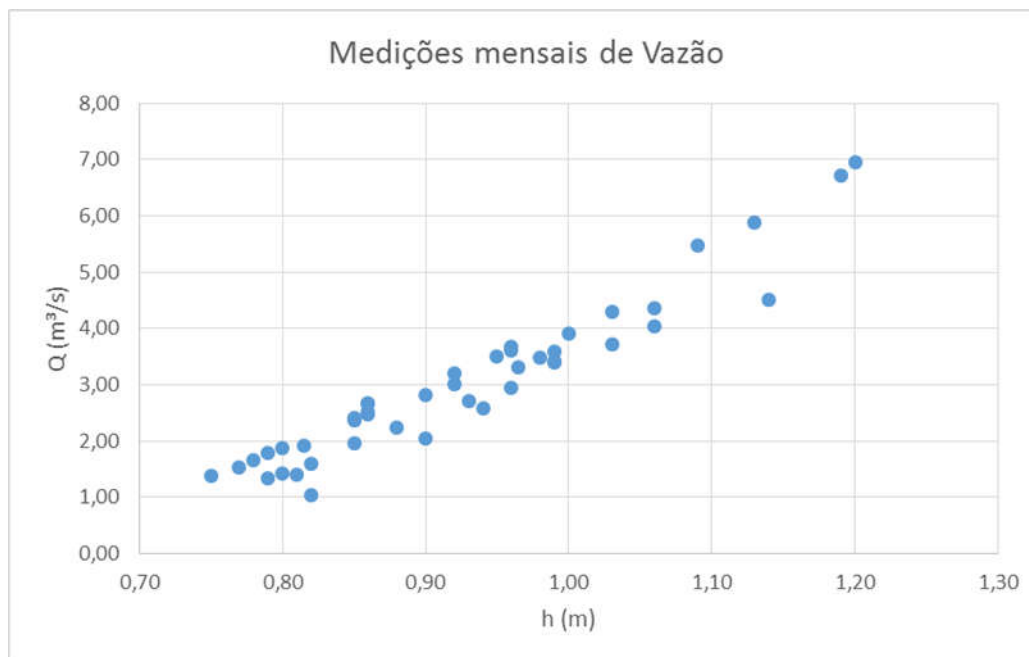


Figura 38 – Gráfico de Dispersão das medições realizadas em campo pela CAESB

Observando a tendência de dispersão dos pontos, traça-se uma curva, que pode ser manual ou com uso de algum aplicativo (regressão ou linha de tendência) que melhor represente as condições encontradas.

Para elaboração das curva-chaves ambas foram obtidas pela equação do tipo potencial com ó observado pela equação 04 que representa a relação cota-descarga, obtida através das medições.

$$Q = K \times (h - H_0)^n \quad (04)$$

Onde,  $Q(m^3 \times s^{-1})$  é a descarga líquida em um dado instante;  $h(m)$  é o nível do curso de água correspondente à  $Q$ ;  $H_0(m)$  é o nível para o qual a vazão é nula;  $K$  e  $n$  são parâmetros adimensionais de ajuste, específicos da seção fluviométrica de interesse.

#### 4.5.2 Determinação da Curva-Chave de Descarga Sólida e Cálculo da Descarga Sólida Instantânea em Suspensão

A curva-chave de sedimentos relaciona a descarga de sólidos em suspensão unicamente à vazão líquida

A formulação matemática resulta da multiplicação da descarga líquida pela concentração de sedimentos e por uma constante de transformação de unidades (Carvalho 1994, Carvalho et al. 2000). Para o sistema métrico utiliza-se a seguinte equação para expressar esta relação:

$$Q_{ss} = 0,0864 \times Q \times C_s \text{ (ton/dia)} \quad (05)$$

Onde,  $Q_{ss}$  = Descarga Sólida em Suspensão (t/dia);  $Q$  = Vazão Líquida ( $m^3/s$ );  $C_s$  = Concentração de Sedimentos em Suspensão (mg/L). A constante 0,0864 refere-se ao fator de transformação de unidade.

Esta equação foi empregada para os levantamentos executados neste trabalho e para as medições existentes na rede da CAESB onde a concentração média da seção foi obtida pela análise da amostra unificada (união de todas as amostras das verticais levantadas em um único recipiente).

A equação (05) foi utilizada para o desenvolvimento da curva-chave de descarga sólida em (ton/dia).

Com os dados de vazões e da descarga sólida de sedimentos em suspensão foram elaboradas as curvas-chaves de sedimentos. As equações fornecidas pelas curvas foram utilizadas para obtenção das descargas sólidas em suspensão diárias. Finalmente, com as descargas sólidas em suspensão diárias puderam-se obter os valores mensais e anual de descarga sólida de sedimentos em suspensão para as sub-bacias em questão. A produção de sedimentos foi calculada pela equação 06, descrita em Carvalho (1994):

$$Q_{ss_{esp}} = Q_{ss} / A \quad (06)$$

Onde,  $Q_{ss_{esp}}$  = Produção de sedimentos em suspensão ( $Ton/km^2 \times ano$ );  $Q_{ss}$  = descarga sólida em sedimentos em suspensão (ton/ano);  $A$  = Área da bacia contribuinte ( $km^2$ )

Para o dado da área da bacia contribuinte, utilizou-se o trabalho de Menezes et. al. (2012), no qual definiu-se os limites das sub-bacias do lago Paranoá e para a sub-bacia do Riacho Fundo foi utilizado o valor de 217,9  $km^2$ .

Para as medições pontuais ou por integração em uma vertical, Roig (2005) comenta que, o cálculo da descarga sólida instantânea depende da correção da concentração medida (parcial –  $C_i$ ) em função da concentração média ( $C_m$ ) da seção obtida pelo método IIL. Só

após esta correção é possível utilizar a equação 05 para o cálculo da descarga sólida. Para tanto, utilizou-se uma função de correlação, frequentemente denominada de equação da curva de transferência, que pode ser expressa de forma genérica pela equação 07 apresentada abaixo.

$$C_m = f [C_i] \quad (07)$$

Onde,  $C_i$  é a concentração instantânea pontual ou da vertical e  $C_m$  é a concentração média calculada.

Para cada método utilizado, várias equações foram utilizadas visando determinar a que melhor representa a relação  $C_i$  x  $C_m$ . A escolha da equação foi definida pelo seu valor de  $R^2$ .

Com base nas informações de concentração e/ou descarga sólida é possível determinar a produção de sedimentos para um determinado intervalo de tempo (dia, mês, ano ou média histórica) que normalmente é expresso em termos absolutos (t/dia ou t/ano). A descarga sólida também pode ser determinada em relação à área da bacia que foi drenada (t/km<sup>2</sup>.ano), denominada de produção de sedimento específica, (CARVALHO et. al, 2000).

#### *4.5.3 Determinação da Descarga Sólida a Partir dos Dados Pontuais*

Para estabelecer a determinação da Descarga Sólida dos métodos propostos foi necessário relacionar o método tradicional de IIL ( $C_m$ ) com cada método pontual e vertical proposto como:

IIL x Vertical Central por Integração ( $V_{ci}$ );

IIL x Pontual Central Superficial ( $P_{cs}$ );

Para fazer essa correlação foram plotados os conjuntos de dados levantados simultaneamente dos dois métodos relacionados, traçado uma curva de tendência e um Coeficiente de Correlação.

Para a análise estatística das concentrações dos métodos alternativos foi feito uma análise dos dados observados com os dados das suas respectivas linhas de tendência, equações e  $R^2$ , onde foi verificado o Erro Residual variável e em porcentagem.

#### *4.5.4 Determinação da Descarga Sólida do Amostrador Automático*

Buscando avaliar uma forma automática de coletar informações acerca do transporte de sedimentos na bacia, utilizou-se o amostrador automático ISCO 3700 para tentar condensar as coletas tradicionais com os eventos de cheia coletados pelo amostrador automático.

Outra forma de análise é qualificar os hidrogramas e sedimentogramas dos eventos e analisar a partir do sentido e do formato do laço de histerese o comportamento hidrossedimentológico.

Para a avaliação da vazão com os dados do amostrador automático, utilizou-se a curva-chave de vazão elaborada pela CAESB para os dados de cota do linígrafo.

Desde o início das campanhas foram possíveis obter coletas de 21 eventos de cheia, com um total de aproximadamente 370 amostras de mistura de água e sedimento.

#### *4.5.5 Correlação entre Turbidez da sonda e Concentração de Sedimento em Suspensão*

Buscando avaliar outra forma automática de coletar informações acerca do transporte de sedimentos na bacia, tentou-se elaborar uma curva que correlacione a turbidez, medida desde novembro de 2014 com Sonda Multiparamétrica DS5X, e a concentração de sedimentos em suspensão seguindo a proposta de Lopes (2010). Este último procedimento foi realizado com 67 amostras coletadas, após a instalação da sonda, pelo amostrador automático ISCO-3700 e analisadas em laboratório.

Para fazer a correlação entre os dados de turbidez e de concentração de sólidos suspensos, plotou-se os conjuntos de dados levantados, assim traçado uma curva de tendência e um Coeficiente de Correlação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização deste trabalho foram feitas análises dos dados de vazão líquida, descarga sólida pelos os métodos de IIL, Vci e Pcs, das amostras coletados pelo amostrador automático e dos dados de turbidez coletados pela sonda multiparamétrica.

### 5.1 SITUAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA ESTAÇÃO

A seção de medição da estação de monitoramento Riacho Fundo Montante Zoológico apresenta algumas particularidades, como uma erosão na margem 10 metros a montante da seção transversal. Neste ponto estava instalado a sonda multiparamétrica que foi realocada devido ao processo erosivo da margem. A Figura 39 apresenta uma visão geral da seção hidrossedimentológica destacado em vermelho.



Figura 39 – Margem erodida a montante da estação Riacho Fundo Mont. Zoológico  
Fonte: Próprio autor (2015)

Foi obtido o histórico dos perfis transversais da Estação em estudo realizado pela CAESB, onde temos a evolução do perfil desde 2007 até 2014.

É possível observar no histórico do Perfil Transversal uma leve erosão da margem da seção e um possível desassoreamento do leito, onde pode ser explicado devido a diferença da metodologia no levantamento do perfil, todos os anos diferem na padronização da distância dos pontos aferidos.

Na Figura 40 é possível observar a variação do Perfil Transversal desde 2007 até 2014.

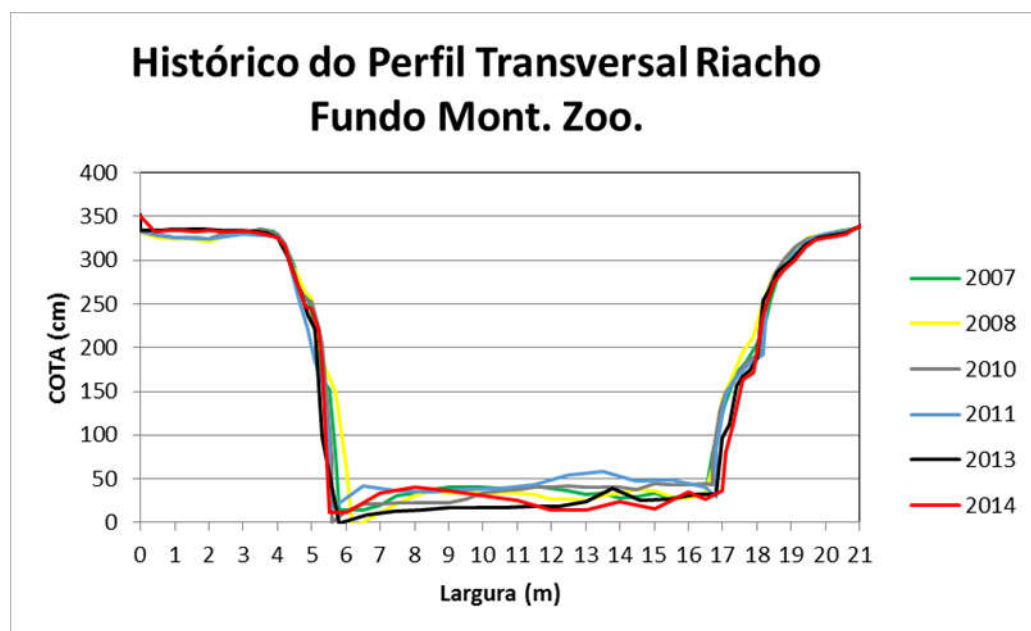


Figura 40 – Gráfico do Perfil Transversal da estação Riacho Fundo Mont. Zoológico  
Fonte: Dados do monitoramento da CAESB

## 5.2 ANÁLISE DA VAZÃO

### 5.2.1 Curva-Chave

A CAESB utiliza formulações matemáticas para relacionar cota x vazão. Através de dados de vazões e de cotas mínimas e máximas, é possível determinar os parâmetros K, Ho e n, onde K e n são parâmetros adimensionais de ajuste e Ho é a cota para a qual a vazão é nula.

Após este passo ocorre um processo de calibração da equação, observando o erro entre as vazões medidas e vazões calculadas, denominado de erro residual (Equação 08).

$$Er = \Sigma (Q_{calc} - Q_{med})^2 \quad (08)$$

Onde, Er = Erro Residual; Qcalc = vazão calculada; Qmed = vazão medida.

Neste trabalho, a elaboração da curva-chave (denominada de UnB) foi feita pelo software Excel e a ferramenta Solver, buscando resultados robustos para os parâmetros K, Ho e n.

Uma outra curva chave foi construída utilizando o algoritmo desenvolvido para ajuste dos parâmetros da curva baseado no Método dos Mínimos Quadrados Não Lineares (denominada aqui de curva-chave PTARH). Esse algoritmo promove uma busca de um conjunto ótimo de parâmetros após uma estimativa inicial dos parâmetros K, Ho e n.

A partir dos métodos apresentados foram construídas as três curvas chaves (Figura 41) com as suas respectivas equações (eq. 09, 10 e 11) onde os erros residuais foram 0,23 e 0,13 e 0,13 respectivamente, de acordo com a equação 06. Como conclusão, observa-se uma boa aproximação das curvas UnB e PTARH. Estas, se diferem discretamente da curva da CAESB, que gera valores maiores nas águas baixas e menores nas águas altas.

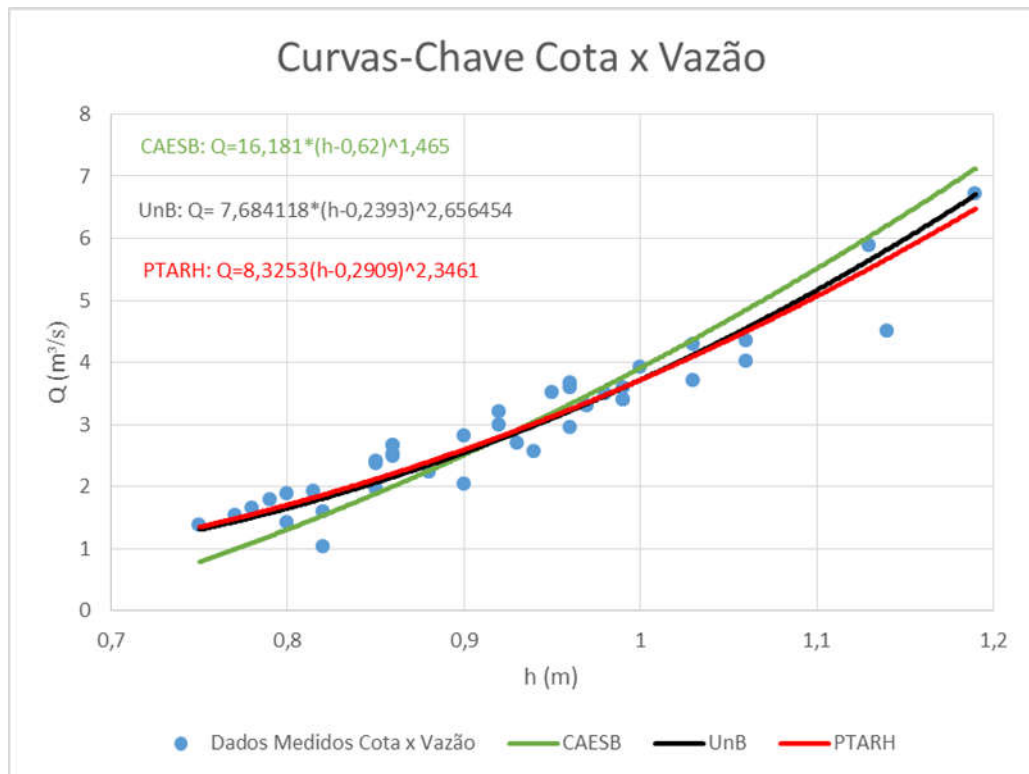


Figura 41 – Gráfico de Dispersão das medições e Curvas-Chave CAESB/UnB/PTARH



$$\text{CAESB: } Q = 16,181 \times (h - 0,62)^{1,465} \quad (09)$$

$$\text{UnB: } Q = 7,684118 \times (h - 0,2393)^{2,656454} \quad (10)$$

$$\text{PTARH: } Q = 8,3253 \times (h - 0,2909)^{2,3461} \quad (11)$$

Onde, Q = Vazão Líquida (m<sup>3</sup>/s) e h = cota (m)

A despeito das novas curvas geradas e do menor erro residual, optou-se, aplicar a curva-chave em utilização pela CAESB, de modo a possibilitar comparação com futuros trabalhos de monitoramento desta companhia.

### *5.2.2 Análise da Série Histórica de Vazão*

Para a análise das médias anuais e mensais de vazão, foi necessário, a partir das curvas chaves para cada período, analisar a série histórica de vazão referente aos dados de cota registrados pelo observador.

Na Figura 42 é apresentado gráfico com dados da série histórica anual de vazões na estação Riacho Fundo Montante Zoológico de 1979 a 2014 em conjunto com dados da série histórica de precipitação da estação Jockey Club de 1979 a 2014, sendo que entre o período de 2002 a 2005 a estação Riacho Fundo Montante Zoológico encontrava-se desativada.

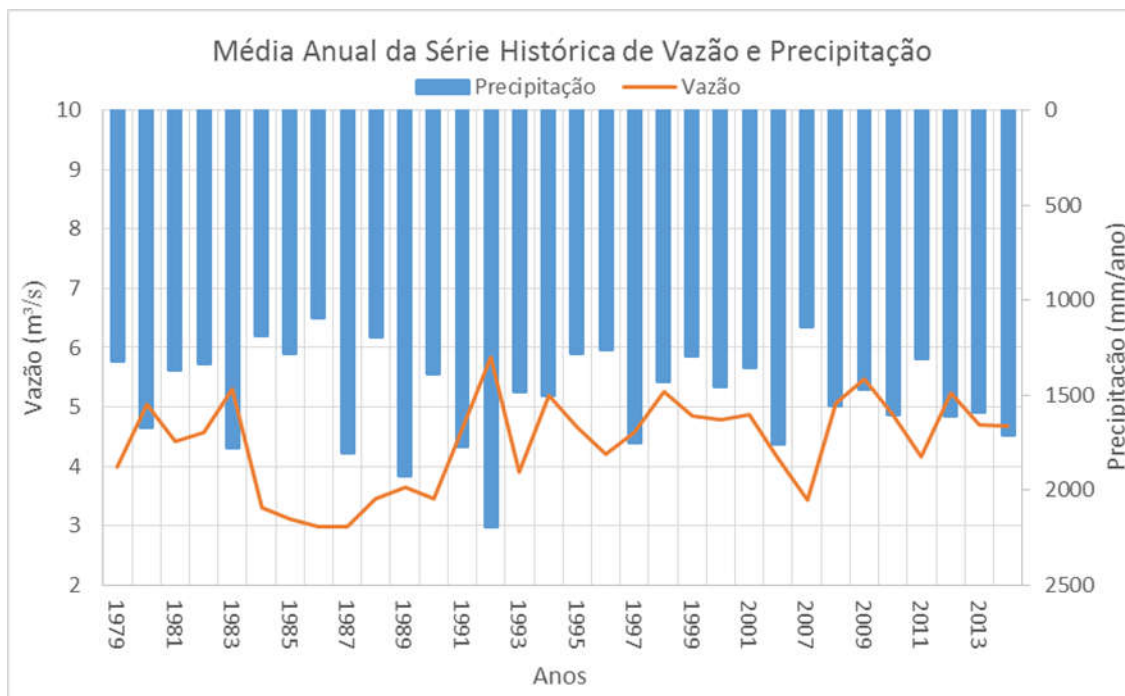


Figura 42 – Média Histórica Anual de Vazão e Precipitação entre 1979-2014

Fonte: Dados do monitoramento da CAESB

Embora esse trabalho não tenha feito relação detalhada da variabilidade interanual, observa-se que existe uma tendência de aumento médio da vazão para os últimos anos sem que se observe um aumento médio dos índices de precipitação. Em uma comparação rápida com as taxas de expansão urbana (Meneses, 2010) observa-se um ajuste entre os dois aumentos a partir da década de 90, intensificando-se a partir de 1997. Esse fato parece estar associado a implantação da cidade de Aguas Claras, mas principalmente pela ocupação de Vicente Pires.

Outro período que chama atenção é entre 1987 e 1990, onde, apesar das chuvas estarem dentro da normalidade, a vazão este consideravelmente abaixo da média.

Com estas análises preliminares e com gráfico de correlação entre os dados de precipitação e vazão, visualizado na Figura 43, observa-se uma baixa relação dos dados, atingindo 19% de relação, assim evidenciando uma baixa relação interanual.

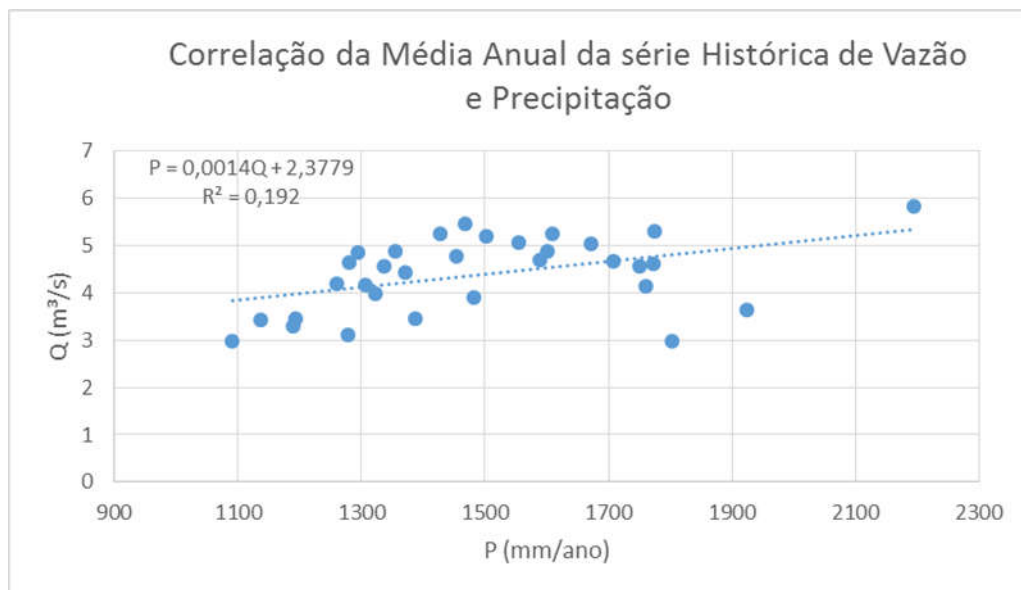


Figura 43: Gráfico de Correlação da Média Histórica Anual de Vazão e Precipitação entre 1979-2014  
 Fonte: Dados do monitoramento da CAESB

Já quando analisamos a variação intra-anual (Figura 44), apresentada pelas médias das vazões mensais, nota-se que os maiores valores dessa vazão ocorreram nos meses de outubro a abril, coincidindo com o período da estação chuvosa no DF. A maior vazão média mensal de longa duração corresponde ao mês de dezembro (6,17 m³/s) e a menor ao mês de junho (2,85 m³/s).

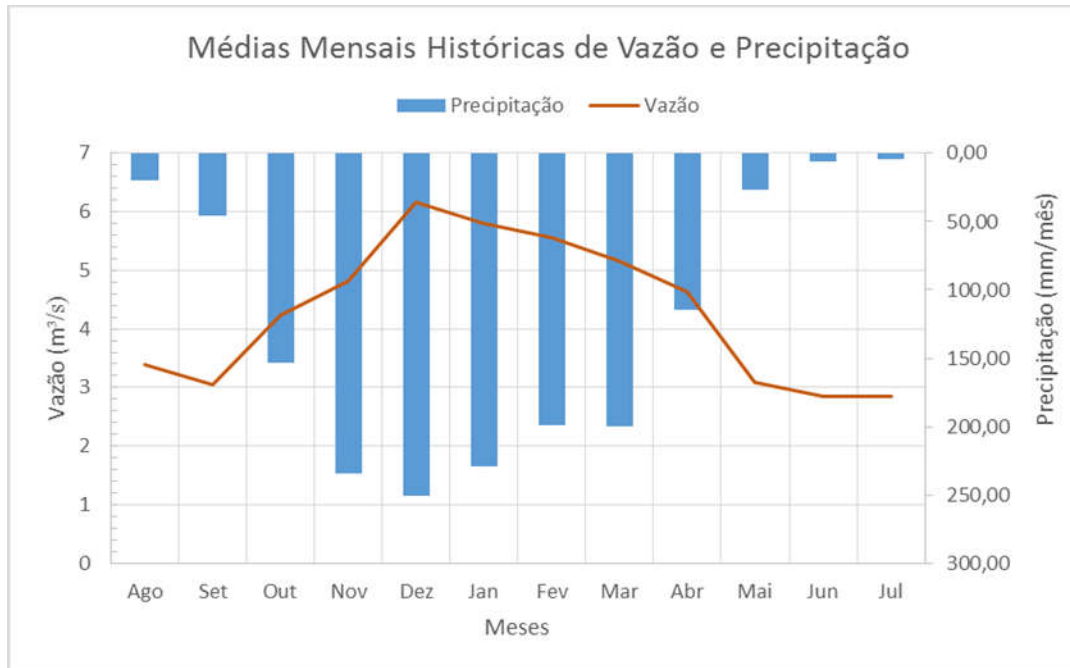


Figura 44 – Média Histórica Mensal de Vazão e Precipitação entre 1979-2014  
 Fonte: Dados do monitoramento da CAESB

Para compreendermos um pouco da relação chuva e vazão mensal, obtivemos a Figura 45 de correlação entre as variáveis do qual, se obteve uma alta correlação, evidenciando que a variável vazão é dependente da precipitação com 90% de confiabilidade entre os dados.

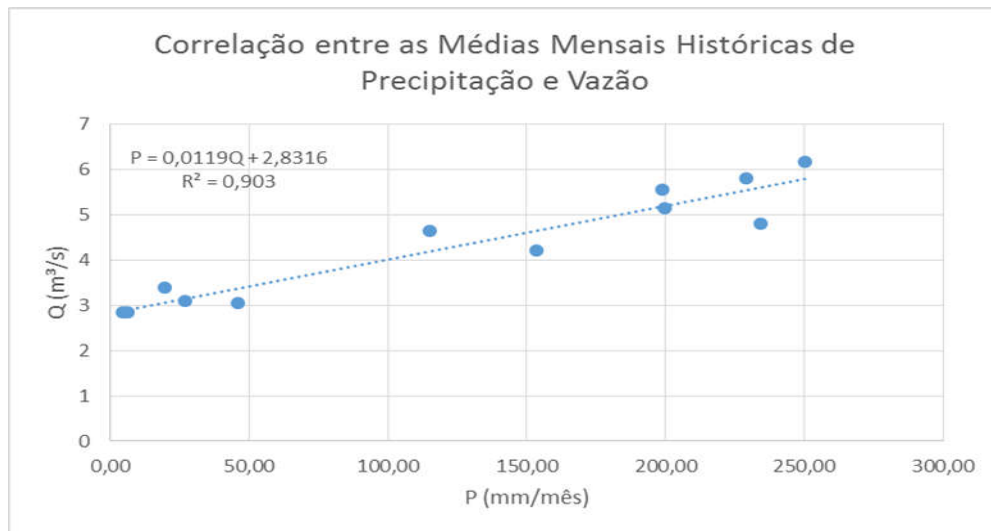


Figura 45: Correlação das Média Histórica Mensal de Vazão e Precipitação entre 1979-2014

Fonte: Dados do monitoramento da CAESB

Entendendo que estes dados médios não representam exatamente os fenômenos de descarga sólida, visto que, mesmo sem dados medidos, sabe-se que o transporte de sedimentos ocorre principalmente durante a ocorrência de eventos chuvosos e que estes são de curta duração na região de estudo e não podem ser detectados com os dados do observador feitos duas vezes ao dia. Por isso foram instalados linígrafos na estação, e os mesmo cobriram um período de dois anos e seis meses. Deve-se destacar que, durante este período, o intervalo dos registros das cotas linimétricas não foram constantes. Inicialmente, para o período de outubro de 2012 a junho de 2013, foram tomados dados com intervalo de trinta minutos. Para o período de agosto de 2013 a janeiro de 2014 foram registrados com intervalo de uma hora, e após fevereiro de 2014 foram registrados com intervalo de quinze minutos.

Foram analisados, para o presente estudo, 82 eventos com registros de 15 em 15 minutos, entre fevereiro de 2014 e abril de 2015, período de execução deste estudo. Desses 82 eventos, 15 foram escolhidos ao acaso para fazer uma avaliação dos eventos extremos e analisar o tempo de pico para cada um, ou seja, a vazão máxima e o tempo de passagem da onda de cheia, como pode-se observar na Figura 46 e está descrito na Tabela 05.



Figura 46: Gráficos dos Eventos Extremos na Estação de Monitoramento Riacho Fundo Mont. Zoológico

Fonte: Dados do monitoramento da CAESB

Na Tabela 05 é demonstrado alguns dados do Linígrafo observados na Figura 47, como o tempo do início do evento até o seu pico (Tempo 1° Pico). Alguns casos há a presença do segundo pico de cheia, onde após o primeiro pico, há uma decaída da vazão e retorna a subir, onde podemos observar o tempo entre os dois picos, chamado de Tempo entre o 1° e o 2° Pico. A vazão máxima para cada evento e o Tempo de Passagem da Onda de Cheia que é o tempo necessário de subida e descida do evento até o restabelecimento inicial.

Tabela 5 – Resumo dos eventos extremos na estação Riacho Fundo Montante Zoológico

<b>Eventos</b>	<b>Data</b>	<b>Tempo 1° Pico</b>	<b>Tempo entre o 1° e o 2° Pico</b>	<b>Vazão Máxima (m³/s)</b>	<b>Tempo de Passagem da Onda de Cheia (Horas)</b>
<b>1</b>	21/03/2014	1:45 min	1:20 min	51	6
<b>2</b>	03/04/2014	2:30 min	Não houve	49	8
<b>3</b>	09/04/2014	1:10 min	1 Hora	55	7
<b>4</b>	10/04/2014	1 hora	Não houve	27	3
<b>5</b>	16/04/2014	1:45 min	1 hora	38	5
<b>6</b>	23/04/2014	1 hora	1:45 min	26	6
<b>7</b>	25/04/2014	1 hora	1:30 min	34	5
<b>8</b>	27/10/2014	1:45 min	2 horas	44	12
<b>9</b>	23/11/2014	1 hora	1:15 min	24	6
<b>10</b>	25/11/2014	1:30 min	2 horas	56	8
<b>11</b>	27/11/2014	1:45 min	Não houve	66	7
<b>12</b>	07/12/2014	2 horas	1:15 min	78	8
<b>13</b>	09/03/2015	2 horas	Não houve	22	8
<b>14</b>	11/03/2015	2 horas	1:30 min	37	7
<b>15</b>	21/03/2015	3 horas	2 horas	53	6

Observou-se que o tempo de passagem da onda de cheia ficou em média sete horas para retornar aos valores iniciais de cota. Também foi possível observar que aproximadamente 80% dos eventos chegam ao pico máximo entre uma hora e meia a três horas, com declínio lento.

Foi possível analisar que na maioria dos eventos houveram dois picos. Este fenômeno pode estar relacionado ao formato da bacia que conta com dois grandes afluentes, o Córrego Riacho Fundo e o Córrego Vicente Pires. Este último, por apresentar forte impermeabilização do solo, gera um alto escoamento superficial com antecipação do pico, gerando diferenças nos tempos de concentração das duas sub-bacias. Ademais, a não uniformidade da distribuição

espacial da chuva contribui para esse padrão do hidrograma. Porém, para se ter maior clareza é necessário a implantação de pluviógrafos na bacia e analisar a distribuição da precipitação temporal e espacial na bacia.

### 5.3 DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS

Para o levantamento dos dados de sedimento, buscou-se nos períodos de cheias (outubro a abril), um acompanhamento de campanhas para coleta de sedimentos com menos tempo de intervalo e de acordo com os eventos de chuva na sub-bacia. Porém, por problemas de logística de transporte dos equipamentos e limitação da quantidade de integrantes da equipe, foi possível fazer o levantamento de dados pelos métodos convencionais e complementares, tais como o IIL, Vci, Pcs, apenas até a cota até 1,20m no rio. Em cotas maiores que 1,20 m só foram realizadas coletas com o amostrador automático.

#### 5.3.1 *Correlação dos métodos alternativos com o Método Clássico*

Neste tópico discutiremos a relações do método clássico por Igual Incremento de Largura com os métodos alternativos e complementares como, Vertical Central por Integração e Pontual Central Superficial coletados em conjunto.

##### 5.3.1.1 Método Vertical Central por Integração

A análise da distribuição da concentração dos 16 pontos obtidos pelos métodos de amostragem de uma vertical central por Integração (Vci) e por IIL (IIL), simultaneamente, resultou maior correlação positiva para um modelo potencial ( $R^2 = 0,9158$ ) (Figura 47). Portanto, pode-se afirmar que 91% das variabilidades das relações entre o Vci e IIL podem ser explicadas por este modelo.

A razão Vci/IIL (RVci/IIL – tabela 6) apresentou valores baixos, que variou de 0,69 à 1,44, valor médio de 0,92 e desvio padrão de 0,14. Isso demonstra que não há diferença considerável entre os métodos. O resíduo do modelo (diferença entre o valor medido (IIL) e o valor calculado pelo modelo (Cr)) variou entre -12,36 e 15,34, o resíduo em porcentagem variou entre 0,05 a 3,74 % com média de erro de 1,99% (Tabela 6). Assim, pode-se considerar

que tais resultados foram satisfatórios para a relação entre o método tradicional (IIL) e o método alternativo (Vci).

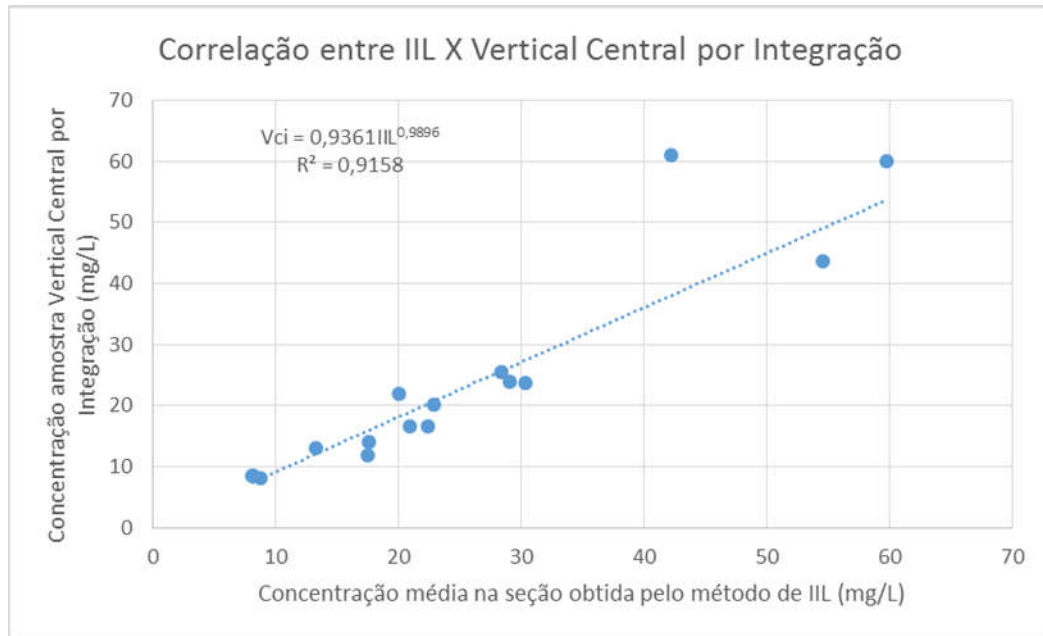


Figura 47 – Gráfico de correlação entre a concentração das amostras de uma Vertical Central por Integração (Vci) e a concentração média obtida pelo método Igual Incremento de Largura (IIL). Cr corresponde à concentração média da seção recalculada. A equação de correlação foi obtida pelo método dos mínimos quadrados

Na Tabela 6 é visualizado os valores de vazão e de concentração obtidos pela comparação entre o método clássico (IIL) e o método da vertical Central por Integração.



Tabela 6 – Valores de vazão e de concentração obtidos pela comparação entre a vertical central por integração e média seção da estação Riacho Fundo Montante Zoológico. A coluna Cr representa a concentração corrigida (recalculada) pelo modelo apresentado na Figura 48. RVci/IIL representa a razão da concentração da Vertical pela concentração média da seção e o Resíduo é a diferença entre a concentração da seção (IIL) e a calculada (Cr). O Qss é a descarga sólida média (t/dia) utilizada a concentração calculada pelo modelo (Cr).

DATA	IIL (mg/l)	Vci (mg/l)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Cr (mg/l)	RVci/IIL	Resíduo (IIL-Cr)	Erro (%) [IIL-Cr]	Qssr (t/dia)
out-13	28,4	25,5	2,05	23,1	0,9	5,3	1,9	4,1
nov-13	54,62	43,64	2,57	39,3	0,8	15,3	2,8	8,7
nov-13	42,27	60,91	-	54,6	1,4	-12,4	2,9	
dez-13	59,77	60	3,59	53,8	1,0	5,9	1,0	16,7
jan-14	20,05	22	3	19,9	1,1	0,1	0,1	5,2
mai-14	13,31	13,18	2,95	12,0	1,0	1,3	1,0	3,1
jul-14	8,81	8,13	2,37	7,4	0,9	1,4	1,5	1,5
ago-14	8,17	8,52	1,4	7,8	1,0	0,4	0,4	0,9
set-14	17,65	14,12	1,27	12,9	0,8	4,8	2,7	1,4
nov-14	30,36	23,71	1,61	21,5	0,8	8,9	2,9	3,0
nov-14	20,96	16,6	2,67	15,1	0,8	5,9	2,8	3,5
jan-15	8,1	8,51	2,52	7,8	1,1	0,3	0,4	1,7
fev-15	22,39	16,63	3,51	15,1	0,7	7,3	3,2	4,6
fev-15	17,5	12	3,57	10,9	0,7	6,6	3,7	3,4
fev-15	22,95	20,26	4,27	18,4	0,9	4,6	2,0	6,8
abr-15	29,1	23,98	4,35	21,7	0,8	7,4	2,5	8,2
Total								73

### 5.3.1.2 Método Pontual Superficial

A análise da distribuição da concentração dos 9 pontos obtidos pelos métodos de amostragem pontual central superficial (Pcs) e por IIL (IIL), simultaneamente, resultou maior correlação positiva para um modelo potencial ( $R^2 = 0,9378$ ) (Figura 48). Portanto, pode-se afirmar que 93% das variabilidades das relações entre o Pcs e IIL podem ser explicadas por este modelo.

O resíduo do modelo (diferença entre o valor medido (IIL) e o valor calculado pelo modelo (Cr)) variou entre 0,94 e 11,57, o resíduo em porcentagem variou entre 11,64 a 38,10% com média de erro de 24,14% (Tabela 11). Embora tenha havido uma boa correlação, é necessário considerar o alto valor médio de erro, evidenciando que os resultados não foram

satisfatórios para tal relação. Essa limitação leva a conclusão que a quantidade de coletas de dados, pontuais em conjunto com convencionais, não foram suficientes para determinar uma boa relação.

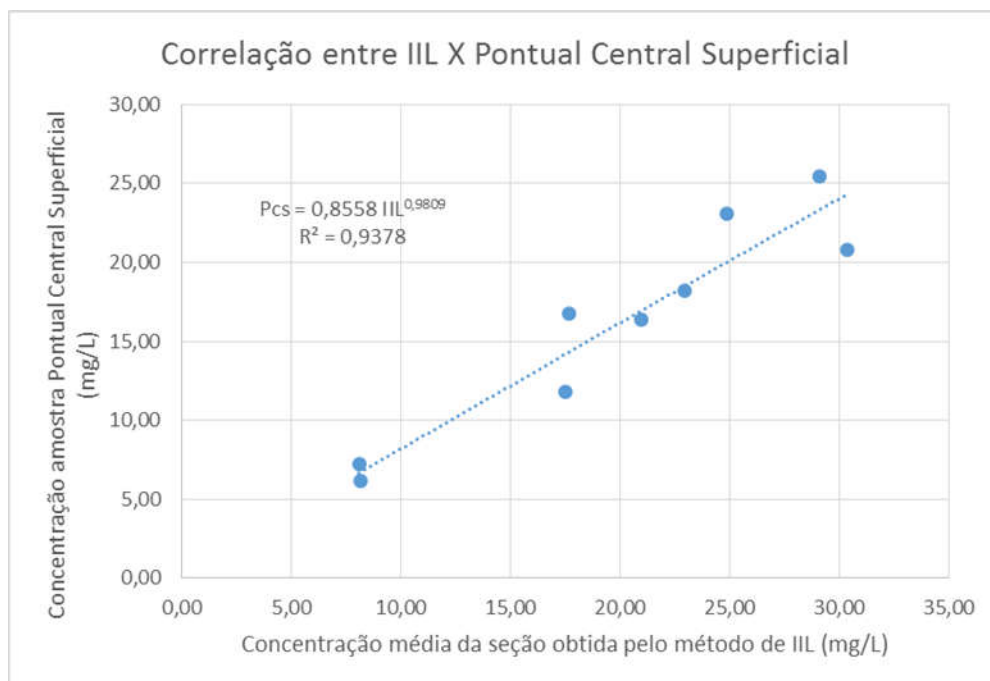


Figura 48– Gráfico de correlação entre a concentração das amostras de uma Pontual Central Superficial (Pcs) e a concentração média obtida pelo método Igual Incremento de Largura (IIL). A equação de correlação foi obtida pelo método dos mínimos quadrados

Na Tabela 7 é visualizado os valores de vazão e de concentração obtidos pela comparação entre o método clássico (IIL) e o método Pontual Central Superficial.

Tabela 7 – Valores de vazão e de concentração obtidos pela comparação entre a Pontual Central superficial e média seção da estação Riacho Fundo Montante Zoológico. A coluna Cr representa a concentração corrigida (recalculada) pelo modelo apresentado na Figura 49. O Resíduo é a diferença entre a concentração da seção (IIL) e a calculada (Cr). O Qss é a descarga sólida média (t/dia) utilizada a concentração calculada pelo modelo (Cr).

DATA	Q (m <sup>3</sup> /s)	IIL	Pcs	Cr	Resíduo (IIL-Cr)	Erro (%) [IIL - Cr]	Qss (t/dia)
ago-14	1,40	8,17	6,18	6,27	1,90	23,21	0,76
set-14	1,27	17,65	16,77	15,33	2,32	13,15	1,68
nov-14	1,61	30,36	20,82	18,80	11,57	38,10	2,61
nov-14	2,67	20,96	16,40	15,02	5,94	28,35	3,46
dez-14	4,30	24,89	23,08	20,73	4,16	16,70	7,70
jan-15	2,52	8,10	7,22	7,16	0,94	11,64	1,56
fev-15	3,57	17,50	11,83	11,11	6,39	36,53	3,43
fev-15	4,27	22,95	18,20	16,56	6,40	27,87	6,11
abr-15	4,35	29,10	25,46	22,77	6,33	21,76	8,56
Total							35,86

### 5.3.2 Curva-Chave de Descarga Sólida

Para a elaboração da curva-chave de sedimentos, foram utilizados dados do monitoramento realizado pela CAESB e de levantamentos em campo feitos neste trabalho no período de novembro de 2011 a abril de 2015 (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores das medições e Levantamentos de Sedimentos Mensais Realizadas na estação Riacho Fundo Montante Zoológico. Onde Qss (ton/dia) é a descarga sólida,  $Q_{ss_{esp}}$  é a descarga sólida específica em (Ton/Km<sup>2</sup>.mês).

Data Coleta	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Qss (Ton/dia)	$Q_{ss_{esp}}$ (Ton/km <sup>2</sup> x mês)	Data Coleta	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Qss (Ton/dia)	$Q_{ss_{esp}}$ (Ton/km <sup>2</sup> x mês)
25/11/2011	6,89	161,44	266,72	08/10/2013	2,05	5,04	8,33
07/12/2011	4,69	7,29	12,04	18/11/2013	2,58	12,18	20,12
05/01/2012	4,51	7,64	12,62	16/12/2013	3,6	18,58	30,70
08/02/2012	3,3	3,25	5,37	09/01/2014	3,01	5,21	8,61
08/03/2012	2,82	1,22	2,02	01/02/2014	3,25	5,91	9,76
09/04/2012	20,9	4595,66	7592,65	14/03/2014	3,49	6,64	10,97
01/05/2012	11,59	2298,66	3797,69	09/04/2014	5,9	18,83	31,11
11/06/2012	2,28	1,65	2,73	14/05/2014	2,96	3,40	5,62
09/07/2012	1,98	1,16	1,92	01/06/2014	2,66	2,54	4,20
15/08/2012	1,61	0,74	1,22	16/07/2014	2,37	1,80	2,97
14/09/2012	1,42	0,96	1,59	21/08/2014	1,40	0,98	1,62
08/10/2012	1,03	0,51	0,84	23/09/2014	1,27	1,93	3,19
13/11/2012	4,03	55,14	91,10	01/10/2014	1,44	2,99	4,94
10/12/2012	3,39	56,58	93,48	11/11/2014	2,67	4,83	7,98
08/02/2013	3,69	6,15	10,16	10/12/2014	4,3	9,24	15,27
11/04/2013	6,73	99,37	164,17	13/01/2015	2,52	1,76	2,91
28/05/2013	2,25	1,36	2,25	10/02/2015	3,51	6,80	11,23
11/06/2013	2,42	1,54	2,54	11/03/2015	3,6	9,80	16,19
19/07/2013	1,80	1,35	2,23	14/04/2015	4,35	10,94	18,07
14/08/2013	1,54	1,18	1,95	13/05/2015	3,92	328,42	542,59
16/09/2013	1,39	0,62	1,02				

Analisando os dados de vazão líquida e descarga sólida medidos e coletados em campo, verificou-se uma questão importante, a existência de uma tendência para vazões baixas e outra para as altas, o que levou a utilização de uma equação diferente para essas situações.

Das 31 medições realizadas para vazões até 4 m<sup>3</sup>/s (baixas vazões), duas medições foram descartadas por apresentarem uma tendência de elevação da curva de correlação. Essas medições descartadas estão destacadas em vermelho na tabela 8. Os dados das medições não descartadas e a curva chave são apresentados na Figura 49. A equação escolhida para representar a curva chave foi pelo modelo exponencial uma vez que este apresentou maior valor de coeficiente de correlação ( $R^2= 0,6242$ ). Assim, pode-se considerar que a relação entre vazão e descarga sólida é de 62%.

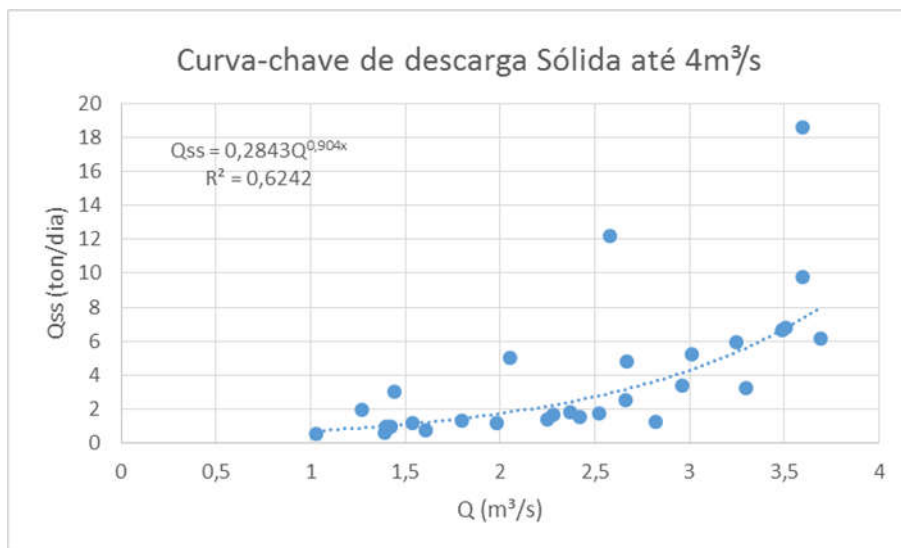


Figura 49 – Curva-chave de Sedimento para vazões baixas da estação Riacho Fundo Montante Zoológico

Para altas vazões (maior que 4 m³/s) foram realizadas 10 medições, na qual os dados e curva chave são apresentados na Figura 50. No entanto, o melhor modelo para representar a curva chave foi o potencial ( $R^2 = 0,8525$ ). Ou seja, 85% da relação dos dados entre a vazão e Descarga Sólida é explicada por este modelo. Porém, vale salientar que na curva para altas vazões, há apenas dois dados com valores acima de 10 m³/s. Essa carência pode ser considerado o principal fator da curva não estar bem ajustada. Se houvessem mais dados de vazão >10 m³/s a curva de calibração provavelmente seria mais robusta.

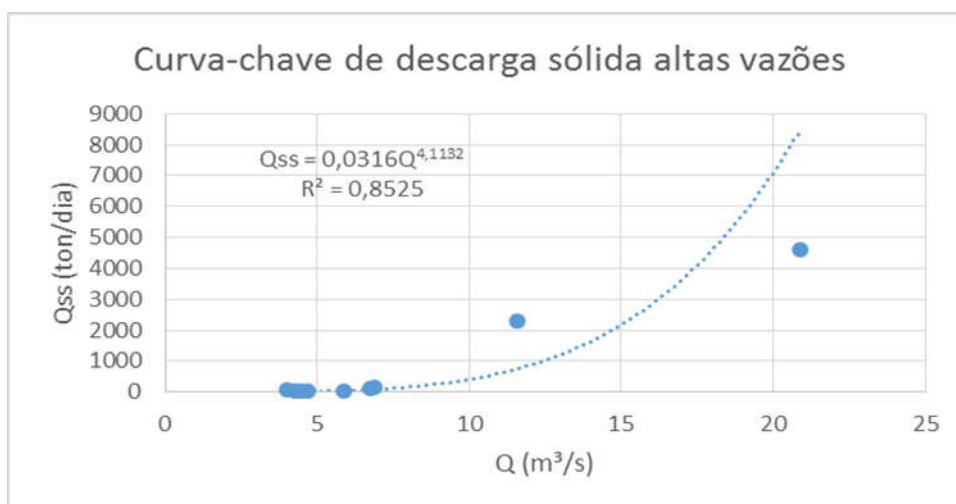


Figura 50: Curva-chave de Sedimento para vazões baixas da estação Riacho Fundo Montante Zoológico

### 5.3.3 Total de Sedimento Transportado

Para a determinação do sedimento total transportado em suspensão foram utilizados os anos hidrológicos de 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014 e 2014-2015 (Tabela 8), cada ano hidrológico sendo iniciado no mês de outubro e finalizado em setembro, onde se dá o início e fim da época de cheias.

A Tabela 09 indica as classes dos valores de produção de sedimentos para entrada em reservatórios e lagos.

Tabela 9 – Valores de produção de sedimento

<b>Tolerância</b>	<b>Produção de Sedimentos (t/km<sup>2</sup>.ano)</b>
Alta	> 175
Média	70 a 175
Baixa	< 35

Fonte: CARVALHO et al. (2000) (adaptado)

A Tabela 10 indica os valores de descarga sólida em suspensão anual da estação de monitoramento, obtido através das equações 04 e 05, onde os valores mensais de produção de descarga sólida específica são somados e quantificados para cada ano.

Tabela 10 – Valores dos resultados da Descarga Sólida em Suspensão Anual (ton/Km<sup>2</sup>.ano) obtidos na estação de monitoramento e situação anual referente à produção de sedimentos

<b>Ano Hidrológico</b>	<b>Descarga Sólida em Suspensão Anual (ton/km<sup>2</sup>.ano)</b>	<b>Observação</b>	<b>Nível de Produção de Sedimentos</b>
2011-2012	11.697	12 meses analisados	Alta
2012-2013	377	10 meses analisados	Alta
2013-2014	133,81	12 meses analisados	Média
2014-2015	614,25	7 meses analisados	Alta

Fazendo uma comparação entre as tabelas 09 e 10, percebe-se que a estação de monitoramento Riacho Fundo Mont. Zoológico apresenta uma condição crítica para o processo de assoreamento. Da série de quatro anos hidrológicos analisados, três apresentaram alto nível de produção de sedimentos (2011-2012, 2012-2013 e 2014-2015) e apenas o ano de 2013-2014 apresenta médio nível de produção de sedimentos. Para o ano de 2014-2015, não

foi analisado os anos de estiagem que correspondem aos meses entre julho a setembro, porém, com alto nível de produção de sedimentos. No ano de 2012-2013 o mês de janeiro e março que corresponde a altas vazões não foi analisado e novamente com alto nível de produção de sedimentos.

#### 5.3.4 Correlação entre Turbidez e Concentração de Sedimentos em Suspensão

Os resultados deste tópico abrangem uma técnica indireta, bastante comum em apoio ao monitoramento hidrossedimentológico, a turbidez. Manz et al., (2011) tem considerado a turbidez como um parâmetro que pode apresentar bons resultados, por meio de correlações com CSS obtidas por métodos sedimentométricos convencionais, tal como o Igual Incremento de Largura. Nos resultados aqui analisados, demonstramos o desempenho do monitoramento automático da turbidez da água, a partir de uma série de eventos.

Em apenas um evento, entre oito medidos, foi possível fazer uma boa correlação dos dados, obtendo-se um coeficiente de correlação de 91% entre a turbidez e a concentração de sedimentos de acordo com a Figura 51. Neste evento, também evidenciando a boa correlação, foi observado um alinhamento das concentrações de sólidos em suspensão (C<sub>ss</sub>) e Turbidez (T) pelo amostrador automático e pela sonda multiparamétrica medidas em intervalos de 15 minutos (Figura 52).

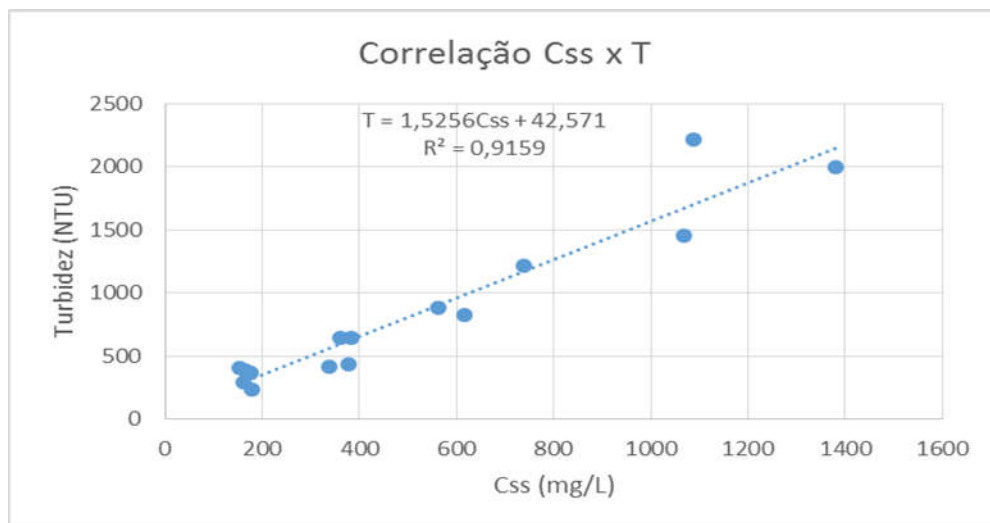


Figura 51 – Correlação entre a Concentração de sólidos em Suspensão e a Turbidez para o evento do dia 18/12/2014

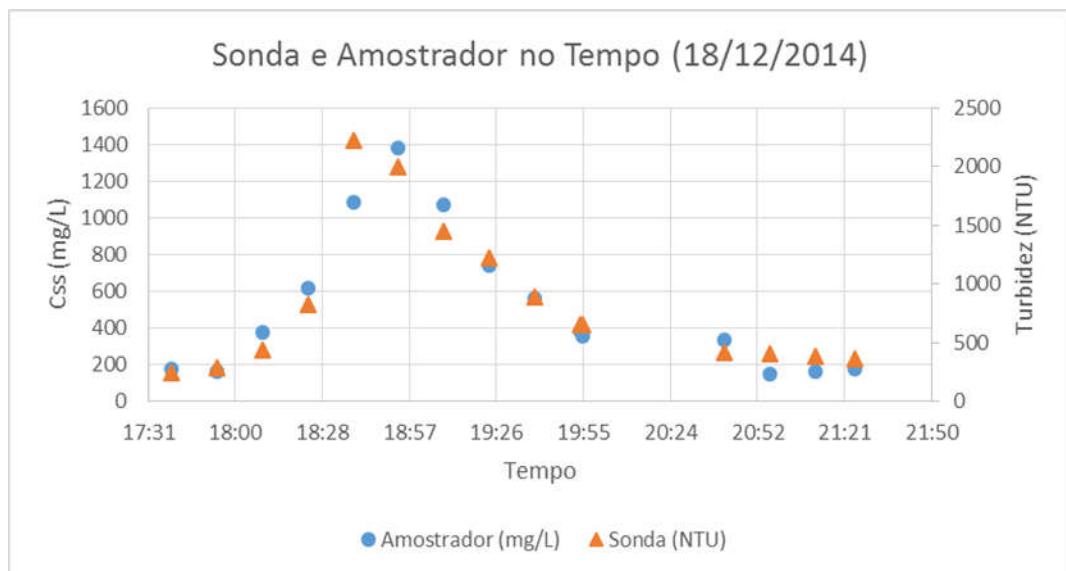


Figura 52 – Comportamento dos dados de Concentração de sólidos em Suspensão e a Turbidez para o evento do dia 18/12/2014

Os outros sete eventos não obtiveram sucesso devido a algumas condições de monitoramento que demonstraram afetar diretamente a qualidade de registro dos dados. Dentre essas condições se destacam três fatores que foram primordiais nos resultados.

A primeira, observada em campo, está relacionada com a angulação da sonda na coluna d'água de 45°. Foi observado que nesse posicionamento acumulava muito sedimento dentro da proteção dos sensores e nos sensores, devido a uma alta carga de sedimentos nos eventos de cheia, ocasionando possíveis problemas de superestimação dos dados (Figura 26). Desta forma o posicionamento da sonda foi reestruturado para a angulação de 90° (Figura 27), após esse processo não foi identificado acúmulo de sedimentos nos sensores.

Inicialmente a sonda era alimentada por pilhas, isso dificultava a autonomia do equipamento, com duração de até quatro dias, sendo financeiramente inviável. Assim, em conjunto com a ANA, foi instalada placa solar e bateria e este problema foi solucionado

O último entrave está relacionado a infraestrutura de acondicionamento da sonda. Mesmo com a mudança de angulação para 90°, a sonda não estava fixa na estrutura de cano de PVC o que gerava uma vibração do equipamento e as leituras de Turbidez foram superestimadas, em todos os registros a resposta era o valor máximo do *range* de leitura, 3000 NTU.

Embora os resultados foram satisfatórios em apenas um evento, verificou-se que as condições de monitoramento afetam a qualidade dos registros. Nesse trabalho, quando em



condições adequadas ao monitoramento automático, os resultados foram expressivos qualitativamente.

#### *5.3.5 Dados do Amostrador Automático*

De forma a buscar um monitoramento automático hidrossedimentométrico utilizou-se o amostrador automático. Nos resultados aqui analisados, demonstramos o desempenho do monitoramento automático da coleta de mistura de água+sedimento, a partir de uma série de eventos.

Antes de iniciar as discussões dos resultados, vale salientar que um dos objetivos deste trabalho seria relacionar os dados da coleta automática com o método clássico por meio de correlações simples, buscando a quantificação do aporte de descarga sólida. Como não houve uma boa correlação entre o método alternativo, Pontual de Margem com o método clássico, analisou-se neste tópico de forma qualitativa os hidrogramas e sedimentogramas dos eventos coletados.

Os gráficos de histerese foram construídos e sua forma analisada qualitativamente. Na Figura 53 são apresentados alguns dos gráficos de histerese obtidos no estudo.

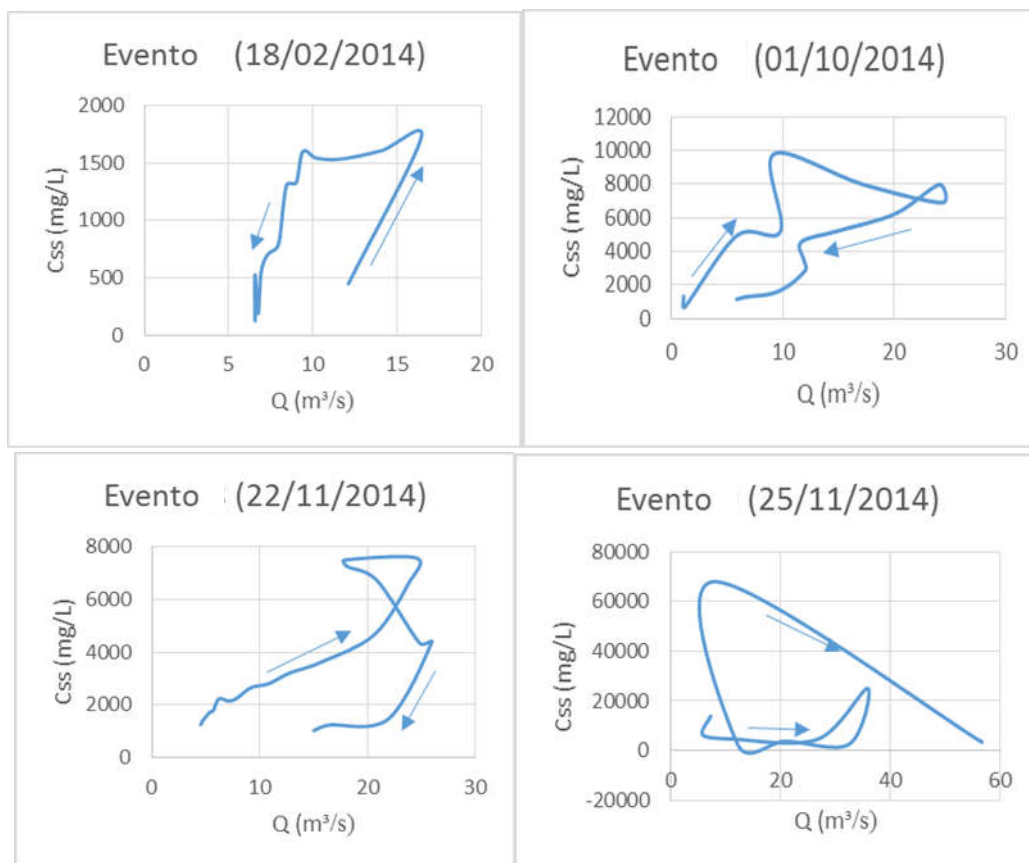


Figura 53 – Laços de histerese para diferentes eventos na sub-bacia do Riacho Fundo

Com relação ao monitoramento automático, os eventos foram coletados com intervalo trinta minutos, metodologia adotada pela CAESB. Observou-se em campo que o nível do rio sobe rapidamente em um intervalo mínimo de uma hora. Assim, foi modificado o tempo de coleta das amostras para quinze minutos neste trabalho, de modo a coletar o fenômeno de crescente e decrescente do evento.

Foi verificado que a maioria dos eventos apresentou um sentido anti-horário. O que indica que as fontes principais dos sedimentos são mais distantes, de áreas mais afastadas, carregado pelo escoamento superficial. Desta forma, o pico de sedimentos atrasado em relação ao de vazão, possivelmente esteja relacionado com o alto grau de impermeabilidade no terço superior da sub-bacia.

Analisou-se que em poucos eventos ocorreram histerese no formato de oito, sendo o pico da vazão em conjunto com o pico da concentração de sedimentos, que indicam que as fontes dos sedimentos são tanto do próprio leito quanto de fontes distantes.

Observou-se que a histerese ocorrente nos eventos tem uma média de diferença de tempo entre os picos de vazão e de concentração de sedimentos em suspensão de quarenta e cinco minutos, chegando ao máximo de duas horas. Essa média estimada de diferença de tempo foi obtida a partir dos dados de registro do linígrafo e do amostrador automático.

Desta forma, é possível aferir que o comportamento do corpo hídrico tem uma resposta rápida em eventos, e os picos de vazão e de sedimentos ocorrem muito próximos, ou seja, uma pequena histerese.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando quatro períodos hidrológicos, pode-se concluir que a estimativa de produção de sedimentos na sub-bacia do Riacho Fundo é expressiva, pois houve três períodos com alto nível de sedimentos no rio. Essa intensa carga de sedimentos pode estar relacionada ao fato de que a área de estudo é a bacia com a maior densidade populacional do DF (Netto, 2010; Menezes 2010).

Os métodos alternativos podem complementar o método convencional, pois houve correlação significativa, 91% com resíduo baixo, entre o método da Vertical Central por Integração com o método tradicional IIL recomendado pela ANA. Esse resultado ocorreu pela amostragem na vertical central, onde o fluxo de sedimentos é mais intenso em toda a coluna d'água do rio.

Entretanto, limitações foram resultantes em outros métodos alternativos testados. O método Pontual de Superfície teve uma significativa correlação, de 94%, porém com erro residual alto devido a poucos dados coletados em conjunto com o método convencional. Esse fato demonstra a necessidade de continuar o monitoramento em busca de um adensamento dos dados para obter uma diminuição do erro residual.

O método de Turbidez pela sonda multiparamétrica teve apenas um sucesso entre oito testes devido as dificuldades de instalação do equipamento relacionadas a angulação de posicionamento, vibração e autonomia.

Nesse contexto, para estudos e aplicações posteriores, recomenda-se que sejam feitas amostragens de todos os métodos em conjuntos nos eventos de cheia. Para o método pontual superficial é necessária maior frequência de amostragem visando um maior adensamento dos dados. Com a sonda multiparamétrica recomenda-se que a estrutura seja montada com angulação de 90° de modo a evitar o acúmulo de sedimentos nos sensores. Também é importante salientar a necessidade de uma estrutura dentro do cano PVC para que a sonda não fique solta e não haja vibração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (Agência Nacional de Águas). **Orientações para Operação de Estações Hidrométricas** / Agência Nacional de Águas (ANA); Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília: ANA, SGH, Ed. ANA, 2012.
- ANTONIAZZI, L. B. **Oferta de Serviços Ambientais na Agricultura**. 2008. 91p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2008.
- ASSELMAN, N. E. M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*. Toulouse, 2000, p. 228-248.
- BACK, A. J. **Hidráulica e hidrometria aplicada**: (com programa hidrom para cálculo). Florianópolis: EPAGRI, 2006.
- BICALHO, C. C. **Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio descoberto**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2006.
- BRASINGTON, J.; RICHARD, K. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrological Processes*. v. 14, 2000. p. 2559-2574.
- CALHOUN, R. S.; FLETCHER III, C. H. Measures and predicted sediment yield from a subtropical, heavy rainfall, steep-sided river basin: Hanalei, Kauai, Hawaiian Islands. *Geomorphology*, v. 30, 1999.
- CARDOSO, T. C.; KOBAYAMA, M.; GRISON, F. Problemas na estimativa de sólidos em suspensão associados à elaboração da curva-chave para sensor de turbidez. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS. Foz do Iguaçu, 2012.
- CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.
- \_\_\_\_\_. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.
- \_\_\_\_\_. et al. **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios**. Brasília: ANEEL. 2000. 140p.
- \_\_\_\_\_; FILIZOLA JÚNIOR, N. P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000.

CHEVALLIER, P. Aquisição e processamento de dados. In: C. E. M. Tucci. **Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hidrology**. New York: McGraw-hill book, 1988.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. v. 1: O canal fluvial. São Paulo: Blucher, 1981.

COBANER, M.; UNAL, B.; E KISE, O. Suspended sediment concentration estimation by na adaptive neuro-fuzzy and neural network approaches using hydro-meteorological data. **Journal of Hydrology**, Toulouse, 2009, p. 52-61.

COIADO, E. M. Uso do amostrador fixo programável na determinação da concentração dos sedimentos transportados em suspensão no rio Atibaia-SP. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Aracaju: 2001.

COLBY, B. R. Relation of unmeasured sediment discharge to mean velocity. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 38, p.708-719. 1957.

DIAS, R. T.; MENEZES, P. H. B. J. **Estudo do Assoreamento e sua Relação com a Ação Antrópica Utilizando Técnicas de Geoprocessamento: Lago Paranoá – Braço Riacho Fundo – DF**. 35p. Monografia (Especialização) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2011.

EINSTEIN, H. A. **Bed-load transportation in Mountain Creek**, U.S. Dept. Agric. Soil Cons. Tech. Public. pp. 44 -55. 1944.

FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – **Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan**. London. 2011. 285p.

FIGUEIREDO, A. G. **A Dinâmica da Produção e Transporte de Sedimento em Suspensão na Bacia do Rio Aguapeí**. 182p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 1993.

FILIZOLA JR., N. P.; GUYOT, J. L.; BOAVENTURA, G. **Fluxo de sedimentos em suspensão na Amazônia** – uma análise a partir da base de dados da ANEEL. In: Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins. Manaus, 1999.

FILIZOLA N.; GUYOT, J. L. The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon / L'utilisation des techniques Doppler pour la détermination du transport solide de l'Amazone. **Hydrological Sciences Journal**. Viena, 2004.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J.L. Fluxo de Sedimentos em Suspensão nos Rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio de Janeiro, dez/2011. 2011.

FILL, H. D.; SANTOS, I. Estimativa de concentração de sedimentos em suspensão através da profundidade de Sechi. In: V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA. Aracaju, 2001.

FRAGOSO, M. M. A. **Estudo Hidrológico e de Transporte de Sedimentos em uma Bacia do Bioma Cerrado: Bacia do Córrego do Capão Comprido**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2008.

GAMA, I. Perfil Ambiental dos Recursos Hídricos no Centro-Oeste expandido. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS. Ouro Preto, 2002

GLYSSON, G. D. **Sediment-Transport Curves**. Reston: U.S. Geological Survey Open-File /Report, 1987.

GOODWIN, T. et al. The temporal and spatial variability of sediment transport and yields within the Bradford Beck catchment, West Yorkshire. **The Science of The Total Environment**. v. 314-316, p. 475-494, 2003.

GRUTKA, L. **Estudos da Relação entre descarga Sólidas e Líquidas obtidas por meio de diferentes métodos de medição**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

GUIMARAES, M; RESENDE, M. G. **Estudo dos Processos de Hidrossedimentologia do Exutório do Riacho Fundo no Lago Paranoá, Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado) 75f. Universidade Católica de Brasília, 2011.

HELLER, L.; PÁDUA, W. L. de. **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

ICOLD, International Commission on Large Dams. **Sedimentation Control Of Reservoirs/Maîtrise De L'alluvionnement Des Retenues**. Committee on Sedimentation of Reservoirs. Paris, 1989.

JULIEN, P. Y. **Erosion and sedimentation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

LEFRANCOIS, J. et al. Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. **Hydrological Processes**. v.21, p.2923-2933, 2007.

LEWIS, J. (2003). Turbidity-controlled Sampling for Suspended Sediment Load Estimation. **Proceedings of the Oslo Workshop**. Oslo, 13-20. 2003.

LEWIS, J. **Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation**. Water Resour. Res. 32(7), 2299-2310, 1996.

\_\_\_\_\_.; EADS, R. Automatic real-time control of suspended sediment sampling based upon high frequency in situ measurements of nephelometric turbidity. In: **Proceedings Federal Interagency Workshop: Sediment Technology for the 21'st Century**. St. Petersburg, February 17-19, 1998.

LIMA, J.E.F.W. et al. Avaliação de método pontual de coleta de amostras hidrossedimentométricas em pequenos cursos de água. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE SEDIMENTOS. Ed. ABRH, Brasília, 2010.

LOBO, G. A.; MORETTI, L. R.; BRIGHETTI, G. Sedimentometria em pequenas bacias hidrográficas. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Ed. ABRH, Belo Horizonte, 1999.

LOPES, G. R. **Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia do córrego do Capão Comprido, DF**. 123p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 2010.

\_\_\_\_\_.; TÁVORA, B. E.; SANTOS, R. M. D.; KOIDE, S. Estudo sobre Correlação entre Turbidez e Sólidos em Suspensão para Estimativa da Vazão Sólida em uma Pequena Bacia. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Ed. ABRH, Campo Grande, 2009.

LOUREIRO, DIEGO D. T. **Métodos atuais e novas tecnologias para o monitoramento do transporte de sedimento em rios: necessidade de dados e incertezas envolvidas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Carlos, 2008.

MACEDO, I. L. **Aplicação do balanço de sedimento em ambiente de geoprocessamento na avaliação do impacto do assoreamento em reservatório: o caso da bacia do rio Indaiá – UHE Três Marias, MG**. 2009. 312p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2009.

MACEDO, M. J. B. **A influência do uso, da ocupação e da conservação do solo na qualidade da água de abastecimento: o caso da Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto**. 173 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Brasília, 2004.

MANZ, R. E.; SANTOS, I. dos; PAULA, E. V de. Monitoramento automático do transporte de sedimento em suspensão por meio de turbidímetro de alta performance. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTO ENES. **Anais IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimento ENES**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Brasília, 2010.

MARCONDES, C. R. **Estudo de descarga sólida em suspensão nos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí**. Dissertação (Mestrado), 78 p. Universidade Federal de Itajubá, 2011.

MARINHO, T. P. **Concentração de Sedimentos em Suspensão na Região de Confluência dos Rios Negro e Solimões, Amazônia, Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Amazonas, 2014.

MENEZES, P. H. B. J. **Avaliação do Efeito das Ações Antrópicas no Processo de Escoamento Superficial e Assoreamento na Bacia do Lago Paranoá**. 133p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, 2010.



\_\_\_\_\_. Roig, H.L., Almeida, T.; Soares Neto, G.B; Bakker, F. **Análise da evolução do padrão de uso e ocupação do solo na bacia de contribuição do Lago Paranoá – DF.** Estudos Geográficos, Rio Claro, 8: 87-105.

\_\_\_\_\_. **Estudo da Dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório de Três Marias – MG.** 2013. 112 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, 2013.

MERTEN, G. H. et al. Considerações sobre a utilização da curva-chave para determinação de fluxo de sedimentos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS. Ed. ABRH, Porto Alegre, 2006.

MINELLA, J. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, v. 15, nº 12, 2011.

MINELLA, J. P. G. **Utilização de Técnicas Hidrossedimentométricas Combinadas com a Identificação de Fontes de Sedimentos para Avaliar o Efeito do Uso e do Manejo do Solo nos Recursos Hídricos de uma Bacia Hidrográfica Rural no Rio Grande do Sul.** 2007. 172p. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

\_\_\_\_\_.; WALLING, D. E.; MERTEN, G. H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. **Journal of Hydrology.** Toulouse, v. 348, p. 546-563. 2008.

MORRIS, G. L.; FAN, J. Reservoir Sedimentation Handbook. In: **McGraw-Hill Book Co.** New York, 1998.

NELLIS, M. D.; HARRINGTON, J. A.; Wu, J. Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir. **Geomorphology.** Kansas, v. 21, Issues 3–4, Jan. 1998, p. 281-293, 1993.

NETTO, P. B. Sustentabilidade Ameaçada. In: FONSECA, F. O. (org). **Olhares sobre o lago Paranoá.** 1. ed. Brasília: Secretaria de meio ambiente e recursos hídricos – SEMARH, 2001, p.167-190.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e aplicações.** 4. ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2008.

\_\_\_\_\_.; TUNDISI, J. G.; Sensoriamento remoto de Águas Interiores: Perspectivas. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais V Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto.** Ed. SBSR São José dos Campos: INP, 1988, p. 13-21.

OLIVA, A. Q. et al. **Uso e Ocupação do Solo.** In: **Olhares Sobre o Lago Paranoá.** Brasília: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2001.

- ORWIN, J. F.; SAMRT, C. C. An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment. **Geomorphology**. v. 68, n. 1-2, p. 3-15, 2005.
- PAIVA, J. B. D. Curvas-chave de vazões e de sedimentos de pequenas bacias hidrográficas. O que representam? IV ENCONTRO NACIONAL DE SEDIMENTOS. **Anais IV Encontro Nacional de Sedimentos**. Porto Alegre: Associação Brasileira de recursos Hídricos, 2001, p. 53-79.
- PHILLIPS, J. M. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area infrequent samples. **Hidrological Process**. Chichester, v. 13, p. 1035-1050. 1999.
- PICOUET, C.; HINGRAY, B.; OLIVRY, J., C. Empirical and conceptual modeling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river. The upper Niger basin. **Journal of Hydrology**, Toulouse. 2000.
- PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento). **Relatório do Desenvolvimento Humano 2014. Sustentar o Progresso Humano: Reduzir as Vulnerabilidades e reforçar a Resiliência**. New York, 2014.
- POLETO, C., e MERTEN, G. H. **Rede de Monitoramento e Coleta de Amostras. Qualidade dos Sedimentos**. Porto Alegre: ABRH, 2006. 397. ed.
- RAUHOFER, J.; JARRET, A. R.; SHANNON, R. D. Effectiveness Of Sedimentations Basins That Do Not Totally Impound A Runoff Event. **Transactions of the Asae**. v. 44, n. 4, p.813-818, 2001.
- ROIG, H. L. **Modelagem e Integração de Dados Aplicados à Análise dos Processos Erosivos e de Transporte de Sedimentos – O Caso da Bacia do Rio Paraíba do Sul – SP**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, 2005.
- SANTOS, I. D. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: IDT, 2001.
- SANTOS, R. F. dos. **Planejamento Ambiental - teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.
- SCHUCK, A. **Utilização do Acoustic Doppler Profiler (ADP) para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e turbidez**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2013.
- SEEGER, M. et al. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. **Journal of Hydrology**. Toulouse, v. 288, n. 3-4, p. 299-311, 2004.
- SEQUOIA. **Research and products for environmental Science**. Disponível em: <<http://www.sequoiasci.com/>>. Acesso em: 15 de mar. 2015.
- SHEN, H. W.; JULIEN, P. Erosion and sediment transport. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. McGraw-Hill, Dallas, USA, 1992. p. 12.1-12.61.

SHIMAKURA, Silvia, E. **Interpretação do coeficiente de correlação**. Disponível em: <[HTTP://leg.ufpr.br/~shimakur/ce003/node74.html](http://leg.ufpr.br/~shimakur/ce003/node74.html)>. Acesso em: 08 de nov. 2013.

SILVA, A. M.; SHULZ, H.; CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 2004.

SIMÕES, S. J. C.; COIADO, E. M. (2001). Métodos de Estimativa da Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas. In: De PAIVA, J.B.D.; De PAIVA, E.M.C.D. (org.). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001, p. 365-394.

SIVIEIRO, M. R. L.; COIADO, E. M. A produção de sedimento a montante de uma seção no rio Atibaia associada à descarga sólida transportada. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de recursos Hídricos**. Belo Horizonte, ABRH, 1999.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed, Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2007.

TUCCI, C. E. M., **Hidrologia – ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRS/ABRH, 2002.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Urbanization Prospects: The 2014 Revision**, (ST/ESA/SER.A/366). 2015.

VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering**. New York : ASCE, American Society of Civil Engineers, 1977.

VESTENA, L. R. L.; LUCI, H.; KOBAYAMA, M. Monitoramento automático da Concentração de Sedimentos em suspensão na Bacia Hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. In: **Workshop de geografia e Mudanças Ambientais: Desafios da sociedade do presente e do futuro**. Guarapuava: Ed. Unicentro, 2007, p. 61-70.

WALLING, D. E. Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land. In: BOARDMAN, J.; FOSTER, I. D. L.; DEARING, J. A. **Soil erosion on agricultural land**. Chichester: John Wiley, 1990, p. 129-152.

WALZON, T. A. L.; LIMA J. E. F. W.; VIEIRA M. R.; DIAS F. S. Análise do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio Iguaçú. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa, ABRH, 2005.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**, Toulouse, v. 111, n. 1-4, p. 89-106, 1989.

WMO (World Meteorological Organization). **Guide to Hydrological Practices**. Geneva, 2009.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report 2015. **Water for a Sustainable World**. Paris: UNESCO, 2015.