

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE AMBIENTAL

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO DA SUB-
BACIA DO RIACHO FUNDO - LAGO PARANOÁ, BRASÍLIA - DF.**

Igor Guedes de Aquino

Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Dissertação de Mestrado

Brasília - DF

2017



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE AMBIENTAL

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO DA SUB-
BACIA DO RIACHO FUNDO - LAGO PARANOÁ, BRASÍLIA - DF.**

Igor Guedes de Aquino

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

2017

IGOR GUEDES DE AQUINO

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO DA SUB-
BACIA DO RIACHO FUNDO - LAGO PARANOÁ, 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.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig
(Orientador)

Prof. Dr. Jérémie Garnier
(Avaliador Interno)

Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato
(UNIFAL-MG)

Brasília - DF

2017

Dedico este trabalho a todos aqueles que buscam superar suas dificuldades e aprender com os desafios diários.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, pela oportunidade e orientação.

Agradecimento especial aos colegas Welber Ferreira, Elton Souza, Henrique Bernini e Leandro Salles por toda ajuda prestada ao longo do mestrado, com as dúvidas teóricas.

Ao Diogo, Renan e Rodrigo, pela companhia e ajuda em campo.

À colega Rita Condé, pela ajuda no desenvolvimento da curva-chave e consistência de dados.

Aos professores Eloi e Edi, pela ajuda prestada na parte de mineralogia.

À professora Rejane, ao Manuel e Coutinho, pela ajuda com o levantamento do perfil topográfico.

Agradeço ao Alessandro, Régio e Matheus, da Agência Nacional de Águas, pelo auxílio com a sonda multiparamétrica.

Ao Jorge, Vanusa, Augusto e Maria do Carmo, da CAESB, pela contribuição com dados e protocolos. Especialmente ao Jorge, pela paciência também nas explicações, quando acompanhei campos de monitoramento de vazão.

À minha namorada, Larissa, por todo amor, carinho, atenção e paciência, durante inclusive os períodos mais difíceis ao longo do mestrado.

À minha família e amigos.

Agradeço à CAPES, pela bolsa de mestrado. Também ao CPNq, pela bolsa vinculada ao projeto aquasense.

Ao laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial do IG/UnB pela disponibilização da infraestrutura necessária e à ESRI/IMAGEM pela disponibilização do Pacote de ferramentas que compõem a Família ArcGIS 10 por intermédio do contrato N° 2011 MLK 8733.

E a todos os outros que possam ter contribuído, de alguma maneira.

RESUMO

A preocupação com a quantidade e qualidade de água disponível para consumo tem sido cada vez mais presente, dado o crescimento urbano e populacional. Brasília - Distrito Federal- é uma cidade que cresceu além do planejado e já possui situação frágil por estar localizada em uma região de nascentes. Além disso, atualmente a cidade passa por uma crise hídrica que culminou no abastecimento emergencial de um reservatório que não foi planejado para este fim durante sua construção, o Lago Paranoá. Nesse contexto, o monitoramento de sedimentos torna-se uma ferramenta importante do ponto de vista de planejamento, para evitar a diminuição da vida útil do Lago Paranoá para abastecimento. Entretanto, o monitoramento efetivo da quantidade de sedimentos só foi iniciado em 2012 e por dificuldades técnicas não se sabe de fato a quantidade que é exportada para o lago, já que os eventos de cheia não têm sido acompanhados corretamente, tanto em termos de vazão, quanto quantidade de sedimentos, estando os dados restritos a cota de 1,20 m. Assim, esse trabalho objetivou contribuir com o estudo sedimentométrico do Córrego Riacho Fundo, afluente do Lago Paranoá e historicamente o principal exportador de sedimentos de toda a bacia. Para isso, a vazão foi medida por método acústico com o M9 e foi utilizado um amostrador automático ISCO 6712, para amostragem de água e sedimentos, com coleta em um ponto fixo e variando de acordo com a cota, a 40 cm de profundidade da superfície d'água. Também foi feito monitoramento simultâneo da turbidez, com sonda multiparamétrica flutuando, igualmente. Os resultados alcançados aqui permitiram elaborar uma nova curva-chave, com vazões medidas entre 0,9 e 2,83 m de cota. Apesar de não ter sido possível estabelecer uma curva-chave de sedimentos, devido à dispersão dos dados, foi acompanhada parte considerável dos eventos em cotas altas, entre 1,40 e 3,79 m. A turbidez teve boa correlação com os sedimentos, tendo coeficiente de correlação $R^2 = 0,92$. Outro componente dos sedimentos foi analisado, a composição mineral dos sedimentos suspensos. O uso do amostrador automático permitiu identificar uma diversidade de minerais que não foi identificada em outros estudos na região.

Palavras chave: Sedimentometria; amostrador automático; turbidez; mineralogia.

ABSTRACT

The concern about the quantity and quality of water available for consumption has been increasingly present, given the urban and populational growth. Brasília - Federal District - is a city that has grown beyond planned and already has a fragile situation due to its location in a region of water springs. Furthermore, currently the city undergoes a water crisis that culminated in the emergency supply by a reservoir that was not planned for this purpose during Brasília's construction, the Lake Paranoá. In this context, sediment monitoring becomes an important tool from a planning point of view, to avoid a reduction in the useful life of Lake Paranoá for supply. However, the effective monitoring of the amount of sediment only started in 2012 and due to technical difficulties, the amount exported to the lake is not known, since flood events have not been correctly kept up, in terms of flow rate and amount of sediments, with the data being restricted to a height of 1.20 m. Thus, this work aimed to contribute to the sedimentometric study of the Riacho Fundo stream, affluent of Lake Paranoá and historically the main exporter of sediments of the entire basin. For this purpose, the flow was measured by the acoustic method with the M9 and an automatic sampler ISCO 6712 was used for water and sediment sampling, with collection at a fixed point and varying according to the height, at 40 cm of depth from water surface. Also, simultaneous monitoring of the turbidity was carried out, with a floating multiparameter probe, likewise. The results obtained here allowed to elaborate a new rating curve, with measured flows between 0.9 and 2.83 m³ of quota. Although it was not possible to establish a key sediment curve, due to the dispersion of the data, a considerable part of the events was observed at high levels, between 1.40 and 3.79 m. The turbidity had a good correlation with the sediments, with $R^2 = 0.92$. Another component of the sediments was analyzed: the mineral composition of the suspended sediments. The use of the automatic sampler allowed identifying a diversity of minerals not identified in other studies in the region.

Keywords: Sedimentometry; automatic sampler; turbidity; mineralogy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1: Mapas da perda da área superficial do braço Riacho Fundo do Lago Paranoá entre 1966 e 2016. Fonte: Adaptado de Meneses (2010). 18
- Figura 2: Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá e Sub-bacia do Riacho Fundo. Fonte: CAESB e ESRI (2015). 19
- Figura 3: Carta pedológica da Bacia do Lago Paranoá (LP) e limites da sub-bacia do Riacho Fundo, fonte: Carvalho (2013). 23
- Figura 4: Mostra os resultados do evento do dia 01/11/12, em que foi utilizado amostrador automático 26
- Figura 5: Tipos de carga no transporte de sedimento: carga em suspensão, carga de fundo e carga de sólidos dissolvidos. Imagem retirada e adaptada de: <https://www.geol.umd.edu/~jmerck/geol342/images/04load.jpg>. 31
- Figura 6: Gráficos ilustrativos dos três principais padrões de laços de histerese: A) laço horário: fonte dos sedimentos próxima ou da própria calha; B) laço anti-horário: fonte dos sedimentos encontra-se distante; e C) laço com formato de oito: fonte dos sedimentos provenientes de regiões próximas e distantes. c = concentração. Adaptado de Williams (1989). 33
- Figura 7: Fotos de molinetes em uso: (A) molinete hidrométrico sendo usado em medição a vau, e (B) molinete sendo usado em embarcação. Imagem retirada de: <http://www.d2l.com.br/hidrologia-e-hidrossedimentologia/> 35
- Figura 8: Medidor de vazão acústico fixado na margem de um canal. Retirado de: <http://www.clean.com.br/Servico/Index/medicao-de-vazao> 36
- Figura 9: Representação de um medidor de vazão acústico sendo utilizado ao longo de uma travessia. Na imagem é possível ter uma idéia de variação de vazão ao longo da seção transversal, em que cores quentes representam maiores vazões, em contraste com vazões mais baixas em cores mais frias. Imagem retirada de: http://www.huntercaprez.ch/images/produkte/RiverSurveyor_Messung.jpg. 38
- Figura 10: Amostragem por integração. (A) pelo método IID na qual cada sub-amostra tem o mesmo volume e as semi-seções são divididas de acordo com o mesmo incremento de descarga líquida; (B) pelo método IIL na qual cada garrafa tem volume proporcional à vazão da seção transversal. (Fonte: EDWARDS; GLYSSON , 1999). 41
- Figura 11: Processo de amostragem pontual instantânea. (A) Amostrador pontual instantâneo do tipo Calléde com lastro de 50kg utilizado em rios da Amazônia; (B) Parte da seção do Rio Purus com a localização da amostragem nas verticais 1 e 2. Fonte: Adaptado de Santos (2013) 42

Figura 12: Amostrador automático ISCO 6712. Este equipamento bombeia água com sedimentos a partir da programação realizada. Assim, o amostrador pode ser acionado para coletar em diversas situações, sem depender de um técnico estar presente no momento da amostragem. Pode ser programado para coletar em função do tempo, acionado baseado no nível da cota, chuva ou fluxo da água no rio. Imagem retirada de: http://img.directindustry.com/pt/images_di/photo-g/22360-2881231.jpg	43
Figura 13: Visão de toda estação fluviossedimentométrica, onde ocorreu o presente estudo. Na data em que a foto foi tirada, o teleférico ainda não havia sido destruído por enchente e a infraestrutura de flutuabilidade da sonda e amostrador automático ainda não haviam sido feitas. Fonte: Aguiar (2015).	47
Figura 14: Amostragem fixa de água e sedimentos. O filtro coletor permanecia fixo durante as cheias no Córrego Riacho Fundo. Foto: próprio autor (2016)	48
Figura 15: Instalação e melhoramento da infraestrutura: tubos PVC para passagem de fios ligados ao painel solar na foto A e instalação da bateria ligada ao painel solar na foto B. Fotos C e D instalação de infraestrutura para flutuação filtro do amostrador automático ISCO 6712 (C) e da sonda multiparamétrica Hydrolab DS5X (D). Foto: Elton Souza (2017a).	49
Figura 16: Estrutura para sonda e amostragem de sedimento com variação da cota e lance de régua em funcionamento. Ao fundo, ponte que faz parte da rodovia DF-003 (Estrada Parque Indústria e Abastecimento – EPIA). A ponte encontra-se a montante da estação. Foto: próprio autor.	50
Figura 17: Levantamento do perfil topográfico na estação 60478200 Montante Zoo, com nível óptico, pelo método de Nivelamento Geométrico por Visadas Extremas em junho de 2017. Foto: Farias (2017).....	51
Figura 18: Medição de descarga líquida com uso do M9 River Surveyor®, da Sontek, no Córrego Riacho Fundo, Estação fluviométrica 60478200 (Código ANA) Montante Zoológico. Foto: Elton Souza (2017c)	52
Figura 19: Fluxograma do processo de levantamento de dados em campo e laboratório.	54
Figura 20: (A) Medição dos volumes das amostras, (B) imagem retirada de Lopes et al. 2009 mostrando o método de filtragem, (C) béqueres em processo laboratorial de evaporação em uma chapa. Imagens A e C foto do próprio autor.	56
Figura 21: Equipamento utilizado para identificação dos minerais presentes nos sedimentos fluviais após evaporação em béqueres. O difratômetro de raios-X <i>RIGAKU Ultima IV</i> , opera com tubo de cobre e filtro de níquel, sob 30 kV e 15 mA. Imagem retirada de: https://www.rigaku.com/sites/default/files/UltimaIV_image1_0.jpg	57
Figura 22: Histórico do levantamento de perfis transversais (cota X largura) para a seção da Estação Riacho Fundo Montante Zoológico (60478200 Código ANA). Fonte: dados da CAESB (2013 a 2016) e do próprio autor (2017).	60

Figura 23: Foto do ano 2017 mostrando erosão na margem esquerda (retângulo vermelho), próxima à Estação Fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico EPIA 003, Código ANA 60478200..Foto tirada de cima de ponte, localizada a montante da estação, na rodovia DF-003 (Estrada Parque Indústria e Abastecimento – EPIA) Foto: Elton Souza (2017b).....	61
Figura 24: Dois dos eventos em que houve medição de vazão com o M9. Cotas medidas podem ser vistas nas vazões medidas pelo M9 com as cotas referentes e datas.....	62
Figura 25: Curva-chave gerada no <i>software</i> SIADH 2.0. Os pontos representam medições de vazão realizadas e a linha representa a própria curva gerada.	64
Figura 26: Gráfico feito no SIADH 2.0 exibindo relação entre vazão calculada e vazão medida. A comparação é feita a partir do desvio (%) e representada por linhas que indicam o quanto ocorreu de divergência em termos percentuais. Também mostra os valores da própria vazão calculada e medida.	64
Figura 27: Comparação da curva-chave elaborada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) com a curva-chave constituída no presente trabalho. Para a curva-chave da CAESB, os parâmetros são os seguintes: $a = 10,65$; $h_0 = 0,42$ e $n = 2,8$. A curva-chave do presente trabalho de mestrado resultou em $a = 12,75$, $h_0 = 0,66$ e $n = 1,42$. .	65
Figura 28: Série de vazões diárias para o ano hidrológico 2015-2016 da Estação 60478200 Montante Zoológico. Vazões no gráfico representadas a cada 15-30 minutos, com base em linígrafo.	66
Figura 29: Série de vazões diárias para o ano hidrológico 2016-2017 da Estação 60478200 Montante Zoológico. Vazões no gráfico representadas a cada 15-30 minutos, com base em linígrafo.	66
Figura 30: Gráfico das vazões médias mensais e precipitação total mensal acumulada dos anos hidrológicos 2015-2016 e 2016-2017.	67
Figura 31: Gráfico das vazões médias mensais e precipitação média mensal total dos anos 2006 a 2017.....	68
Figura 32: Gráfico de dispersão entre cota e concentração por método de amostragem fixa. Fonte: Aguiar (2015) e próprio autor.	70
Figura 33: Gráfico de dispersão entre cota e vazão. Dados levantados a partir de amostragem variando com a cota.....	70
Figura 34: Sedimentograma e hidrograma de evento ocorrido durante período em que a amostragem era feita de forma fixa. No gráfico, cada ponto quadrado representa uma amostra, registrada por linígrafo, no caso do hidrograma e por amostrador automático ISCO 6712 no sedimentograma.	71
Figura 35: Sedimentograma e hidrograma de evento ocorrido durante período em que a passou a ser feita a 40 cm de profundidade da superfície, com filtro do amostrador flutuando.	

No gráfico, cada ponto quadrado representa uma amostra, registrada por linígrafo, no caso do hidrograma e por amostrador automático ISCO 6712 no sedimentograma.	72
Figura 36: Sedimentograma e hidrograma de evento extremo em que o amostrador automático foi inundado, comprometendo as amostras. No gráfico, cada ponto quadrado representa uma amostra, registrada por linígrafo, no caso do hidrograma e por amostrador automático ISCO 6712 no.....	73
Figura 37: Laço de histerese anti-horário no evento do dia 08/12/2016. Cada ponto no laço representa uma amostra coletada, com intervalo de 30 minutos entre cada uma.	75
Figura 38: Laço de histerese em formato de oito no evento do dia 13/12/2016. Cada ponto no laço representa uma amostra coletada, com intervalo de 30 minutos entre cada uma.	75
Figura 39: Laço de histerese sentido horário no evento do dia 16/01/2017. Cada ponto no laço representa uma amostra coletada, com intervalo de 30 minutos entre cada uma.	75
Figura 40: Histograma mostrando a frequência absoluta do número de eventos com valor de descarga sólida dentro de cada intervalo de classe.	76
Figura 41: Boxplot mostrando a variabilidade dos valores de descarga de sedimento total de cada evento, em toneladas, com os dados obtidos neste trabalho.	77
Figura 42: Imagens relacionadas ao evento extremo ocorrido entre os dias 19 e 20 de janeiro de 2016. (A) amostras foram inundadas com a cheia (B) Estação 60478200 Montante Zoo inundada, foto tirada com córrego já na depleção (C) cerca que protegia a estação derrubada (D) guincho sem cabo de aço e com base torta devido a destruição do cabo com a cheia. Fonte: próprio autor.....	78
Figura 43: Gráfico de dispersão turbidez medidos pela sonda multiparamétrica e concentração obtida por amostrador automático ISCO 6712. Foram utilizadas 28 amostras para comparação.	82
Figura 44: Gráfico mostra a representatividade das amostras escolhidas ao longo de um evento de chuva de Março de 2016 no Córrego Riacho Fundo – Brasília, Distrito Federal. Foram escolhidas aleatoriamente as amostras de número 2, 4, 5, 6, 9 e 12 para a realização do presente estudo.	83
Figura 45: Gráfico mostra a representatividade das amostras escolhidas ao longo de um evento de chuva de Janeiro de 2017 no Córrego Riacho Fundo – Brasília, Distrito Federal. Foram escolhidas aleatoriamente as amostras de número 1, 2, 3, 4 e 6 para a realização do presente estudo.	84
Figura 46: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 2, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Ilita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Rutilo, e Hematita. Possível detecção de Anatásio (próximo ao pico n=2 da Caolinita) e Goethita (d~4,15-4,19).	96

Figura 47: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 4, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Ilita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Hematita e Rutilo. Possível detecção de Anatásio (próximo ao pico n=2 da Caolinita) e Goethita (d~4,15-4,19).	97
Figura 48: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 5, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Ilita , Caolinita , Gibbsita , Quartzo , Hematita e Rutilo. Possível detecção de Anatásio (próximo ao pico n=2 da Caolinita) e Goethita (d~4,15-4,19).	97
Figura 49: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 6, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Vermiculita, Ilita , Caolinita , Gibbsita , Quartzo , Rutilo (d=3,2475 Å), Hematita. Possível detecção de Anatásio (próximo ao pico n=2 da Caolinita) e Goethita (d~4,15-4,19).	98
Figura 50: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 9, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Vermiculita, Ilita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Rutilo e Anatásio. Possível detecção de Goethita (d~4,15-4,19).	98
Figura 51: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 12, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Saponita , Muscovita , Hematita, Caolinita , Gibbsita , Quartzo, Diásporo, Rutilo e Anatásio. Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).	99
Figura 52: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 1, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo, Rutilo e Anatásio. Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).	99
Figura 53: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 2, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo, Rutilo e Anatásio. Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).	100
Figura 54: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 3, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo, Rutilo e Anatásio. Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).	100
Figura 55: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 4, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo, Rutilo e Anatásio. Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).	101
Figura 56: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 6, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Saponita, Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo e Rutilo. Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).	101

TABELAS

Tabela 1 - Dados de monitoramento mensal da CAESB durante teste exploratório entre os anos 2011 e 2013, utilizando as metodologias de amostragem IIL (Igual Incremento de Largura) e IID (Igual Incremento de Descarga). Fonte: CAESB 2013b.	25
Tabela 2 - Métodos de medição de descarga sólida, retirado de: Carvalho et al. (2000).	39
Tabela 3- Vazões medidas pelo M9 e respectivas cotas e datas.....	62
Tabela 4 – Resumo das concentrações máximas de sedimentos em suspensão encontradas em outros trabalhos que utilizaram amostradores automáticos do tipo ISCO.....	74
Tabela 5 - Tabela mostrando os valores dos quartis, para os dois métodos de amostragem. ...	76
Tabela 6 - Descarga Sólida total (toneladas) para cada evento, com o método de amostragem com a cota fixa.....	79
Tabela 7 - Descarga Sólida total (toneladas) para cada evento, com o método de amostragem com a cota variando.	80
Tabela 8 – Minerais identificados com o método de amostragem fixa.....	85
Tabela 9 - Minerais identificados com o método de amostragem com a cota variável e filtro flutuando na superfície da água.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ADASA	Agência Reguladora de Águas do Distrito Federal
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CSS	Concentração de Sedimentos em Suspensão
DF	Distrito Federal
IID	Igual Incremento de Descarga
IIL	Igual Incremento de Largura
RF	Riacho Fundo

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	17
2 - OBJETIVOS	20
2.1 - Objetivos específicos.....	20
3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	21
3.1 – Uso e ocupação do solo.....	21
3.2 - Caracterização geológica e pedológica:	21
3.3 - Mineralogia dos solos.....	22
3.4 - Caracterização do clima.....	22
3.5 - Hidrossedimentometria.....	24
4 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
4.1 – Ciclo hidrossedimentológico	29
4.1.1 – Efeito histerese	32
4.2 - Métodos para a medição do transporte de sedimentos	34
4.2.1 - Descarga líquida.....	34
4.2.2 - Descarga sólida	38
4.2.3 – Monitoramento de turbidez para quantificação de sedimentos.....	44
4.2.4 - Processamento laboratorial	44
4.2.5 – Cálculo da descarga sólida	45
5 - ETAPAS E MÉTODOS.....	47
5.1 - Infraestrutura da estação estudada.....	47
5.2 - Levantamentos de perfil topográfico	50
5.3 – Medição de vazão.....	51
5.3.1 - Curva-chave.....	51
5.4 – Medição da descarga sólida	53
5.4.1 – Levantamento de campo	53

5.4.2 - Processamento laboratorial	55
5.4.3 – Cálculo da descarga sólida	56
5.4.4 - Determinação da composição mineral	57
6 – RESULTADOS/DISCUSSÃO	59
6.1 - Caracterização do canal do Córrego do Riacho Fundo	59
6.2 – Vazão.....	61
6.2.1 - Cálculo da curva-chave	63
6.2.2 – Séries de vazão para os anos hidrológicos trabalhados.....	65
6.3 – Sedimentologia	68
6.3.1 – Concentração e descarga sólida	68
6.3.2 – Correlação turbidez	81
6.3.3. - Composição mineral	83
7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
REFERÊNCIAS	89
ANEXOS: Difratogramas de identificação dos minerais presentes nos eventos analisados dos dias 11/03/2016 e 17/01/2017.....	96

1 - INTRODUÇÃO

Indubitavelmente a água é um recurso indispensável à vida humana. Desde os anos 80, a UNESCO (CAPOZZOLI, 2015) adverte para uma crise de abastecimento da água em escala mundial, que iniciaria no ano de 2015. Esta previsão tem se tornado realidade em vários estados brasileiros, onde o Distrito Federal (DF) não é uma exceção. A CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal) nos últimos anos vem trabalhando na identificação e operacionalização de novas fontes de abastecimento (CAESB, 2017). Entre estas fontes estão: o reservatório de Corumbá IV, que exige uma longa rede de aquedutos; e o Lago Paranoá, apesar dos vários problemas históricos já ocorridos com relação à qualidade das águas (ALVES; CAVALCANTI; MATTOS, 1988; CAESB, 2013a) e assoreamento (MENEZES, 2010). No entanto, o agravamento da crise hídrica no DF fez com que a CAESB tomasse a decisão de captação emergencial da água do Lago Paranoá (Agência Reguladora de Águas - ADASA, 2017).

Neste contexto, várias pesquisas têm sido realizadas com objetivo de verificar as condições geoquímicas das águas (COSTA, 2014), dos sedimentos (MOREIRA, 2002; COSTA, 2014; DIAS, 2017), as fontes destes sedimentos (FRANZ et al., 2014) e a evolução do padrão de uso e ocupação da bacia de contribuição (MENEZES, 2010). Estes estudos têm demonstrado que a bacia do Lago Paranoá teve, e continua tendo, uma forte extração da cobertura vegetal em detrimento da expansão urbana, causando um aumento nos processos erosivos e no assoreamento do Lago (**Figura 1**) (MENEZES, 2010; ROIG et al. 2013).

Apesar destes estudos, a quantificação do aporte dos sedimentos provenientes das sub-bacias que aportam o lago Paranoá e sua distribuição espaço-temporal ainda é incipiente. Os primeiros estudos, buscando entender este processo, iniciaram-se somente em 2012 no projeto AGUA-DF executados pela CAESB com o apoio do IG/UnB. A partir desta data, a CAESB iniciou o programa oficial seguindo as diretrizes da ANA com amostragem mensal de sedimentos pelo método Igual Incremento de Largura –IIL; (CAESB, 2013b). Como os dados levantados não permitiram uma análise adequada, Aguiar (2015) propôs usar técnicas alternativas como o método pontual central da superfície, vertical central por integração e pontual de margem, similar ao feito por Bicalho (2006) para o Descoberto. Ainda assim, apesar da melhoria na obtenção dos dados, os resultados não foram satisfatórios.

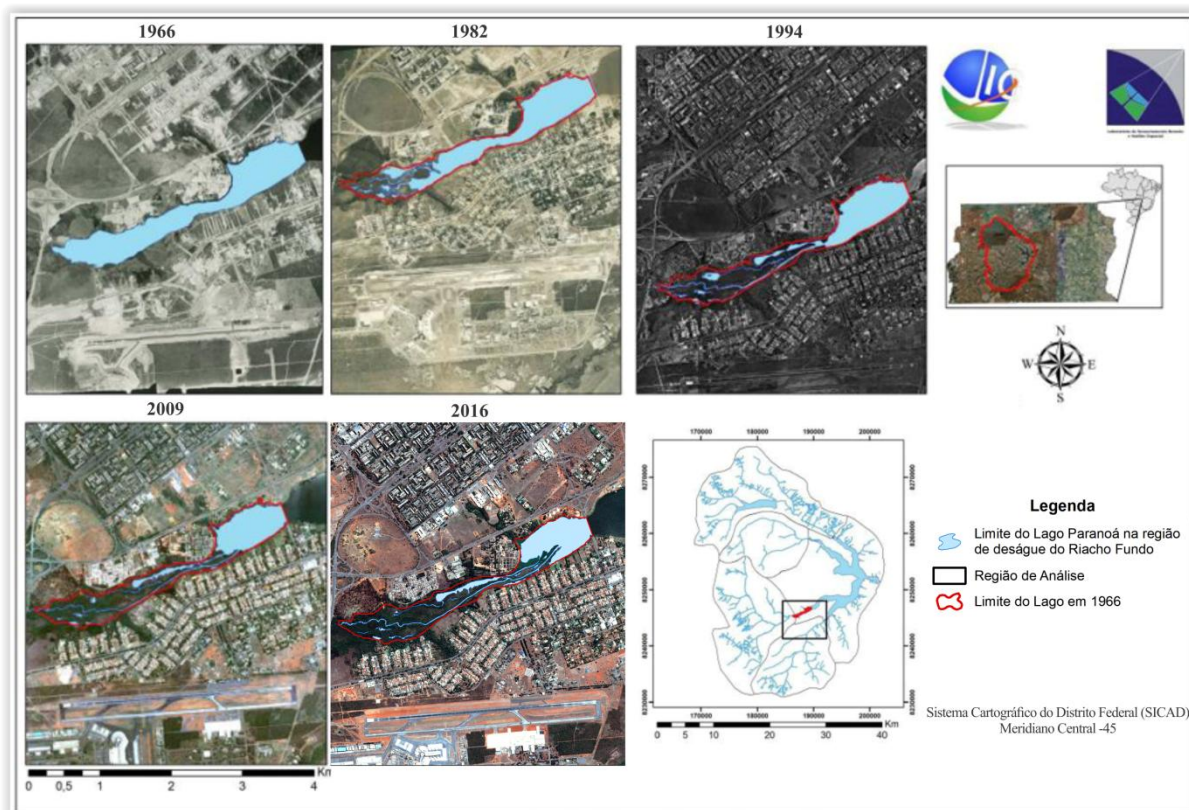


Figura 1: Mapas da perda da área superficial do braço Riacho Fundo do Lago Paranoá entre 1966 e 2016. Fonte: Adaptado de Meneses (2010).

O método IIL, que tem sido utilizado pela CAESB, demanda um processo de medição muito vagaroso para o monitoramento da sub-bacia do Riacho Fundo (RF) (**Figura 2**), que é uma bacia em que o pico de cheia ocorre de forma rápida em resposta à chuva. E, mais importante ainda, devido à resposta de curto tempo à chuva, o deslocamento até o local de medição é um grande empecilho ao acompanhamento dos eventos de cheia. Estes motivos levaram Aguiar (2015) a não conseguir monitorar os eventos de cheia e a comparar os métodos alternativos com o método oficial (IIL) em cotas mais altas.

Tendo em vista a necessidade de otimização dos estudos para melhor entendimento do processo de aporte de sedimentos da sub-bacia do RF (**Figura 2**), o presente estudo buscou contribuir com o entendimento da real quantidade de sedimento que chega ao Lago Paranoá. Por último, destaca-se que, os dados oficiais referentes à descarga líquida e, conseqüentemente a sólida, estão restritas a cota 1,2m para a estação do Riacho Fundo Montante Zoológico - cód.60478200 (CAESB, 2013b). É sabido que durante o período das chuvas as cotas podem alcançar 3,2m para os eventos mais intensos, e frequentemente atingem 2,5m. Assim, faz-se necessário um adensamento da frequência de levantamento para

podemos complementar ou criar uma nova curva chave para vazão, para entender o seu impacto no transporte de sedimentos.

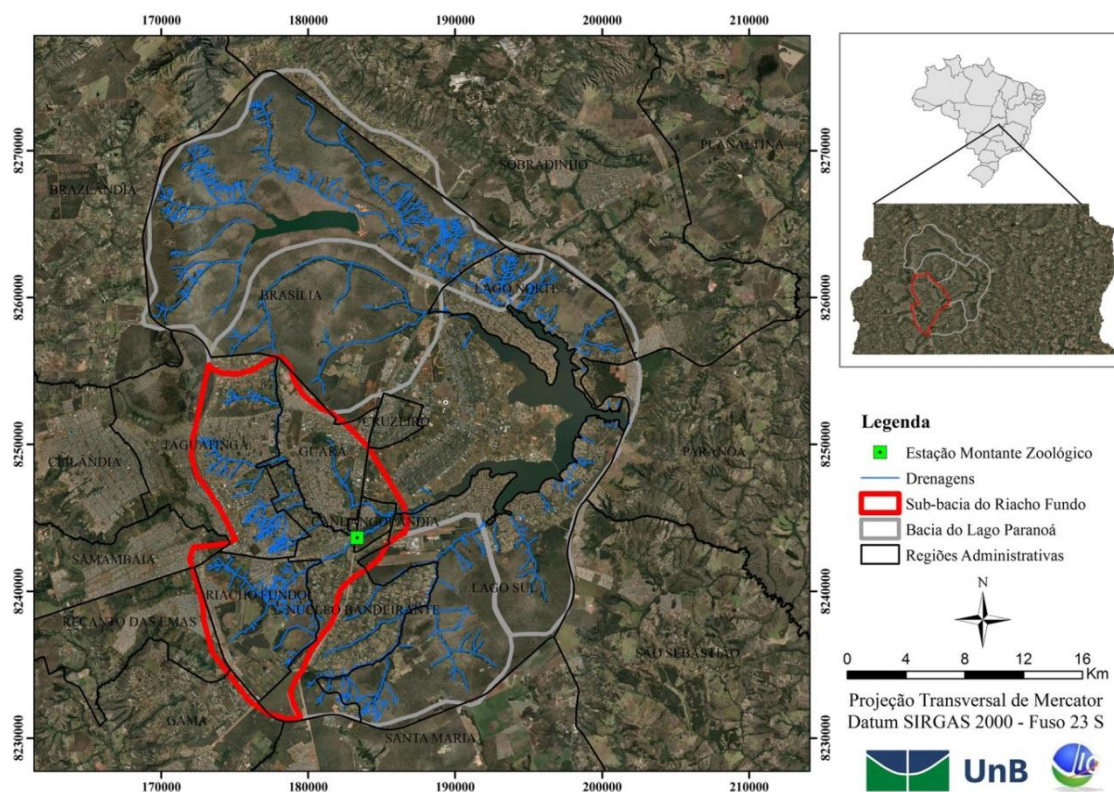


Figura 2: Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá e Sub-bacia do Riacho Fundo. Fonte: CAESB e ESRI (2015).

Para o cumprimento dos propósitos do presente trabalho, levou-se em consideração que não existe, de modo geral, metodologia ideal para medição de descarga sólida, sendo que cada uma delas tem suas próprias limitações (MORRIS; FAN, 1997). Segundo os mesmos autores a técnica de amostragem dos sedimentos em suspensão depende do objetivo a ser atingido ou da disponibilidade de equipamentos.

2 - OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo contribuir com informações relativas à variação temporal da descarga sólida em suspensão bem como das características físicas dos sedimentos da sub-bacia hidrográfica do RF (Riacho Fundo), ao longo de dois anos hidrológicos, com ênfase no levantamento dos eventos de cheia.

2.1 - Objetivos específicos

- Determinar uma nova curva chave que contemple toda a amplitude da descarga líquida da sub-bacia RF;
- Verificar a importância dos eventos extremos na descarga sólida da sub-bacia RF;
- Identificar a mineralogia dos sedimentos que aportam o braço do Riacho Fundo do Lago Paranoá.
- Verificar se há existência de correlação entre a turbidez e a descarga sólida em suspensão.

3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Neste item pretende-se descrever as características da bacia que tem alguma relação com a descarga líquida e sólida, que poderá ser usado na etapa de discussão.

3.1 – Uso e ocupação do solo

A sub-bacia do RF é intensamente coberta por estruturas urbanas, tendo mais de 70% de sua área urbanizada, sendo 25% da área da unidade hidrográfica coberta por solos com baixa taxa de infiltração, fator esse que explica as altas taxas de escoamento existentes (MENEZES, 2010). No que se refere à cobertura dos solos, observa-se que existe maior concentração de impermeabilização urbana por onde escoam o Córrego Vicente Pires, um dos principais canais fluviais da bacia que deságua no RF, enquanto que a região contemplada pelo rio do Riacho Fundo tem ocupação predominante de casas com extensas áreas verdes, a exemplo do Setor de Mansões Park Way, diversas chácaras, granjas e a fazenda experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Se faz necessário ressaltar as diferenças morfológicas da bacia, sejam físicas ou não, pois tais características podem refletir diretamente, ou indiretamente, no aporte de sedimento, visto que é esperado que exista diferença na quantidade de sedimentos a depender de sua origem.

3.2 - Caracterização geológica e pedológica:

Do ponto de vista geológico, de acordo com Maia, Boaventura e Pires (2006), o Córrego RF nasce na Unidade Q3 (Unidade Quartzito Médio) e corta as unidades R3 (Metarritmito Arenoso) e A (Ardósia). Estas unidades são pertencentes ao Grupo Paranoá, caracterizado por Campos e Freitas (1998), e ainda abrange depósitos aluvionares. Essas unidades foram formalizadas recentemente com outros nomes (CAMPOS et al., 2013): Formação Ribeirão Contagem (antes Unidade Q3), Formação Serra da Meia-noite (Unidade R3) e Formação Ribeirão do Torto (Unidade A).

Carvalho (2013), a partir de dados da EMBRAPA (1978-revisado em 1997) e da Secretaria do Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia (Sematec) /Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN) (1994) registra a diversidade de solos (**Figura 3**) contidos na sub-bacia do RF, sendo eles: Cambissolo Háplico, Gleissolo Háplico, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho Amarelo, Nitossolo Vermelho e Plintossolo Pétrico. Destes, o solo que contribui com mais expressividade em relação à área total é o Latossolo Vermelho, e os solos com menores frações são o Nitossolo Vermelho e o Plintossolo Pétrico. No entanto, Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho Amarelo e Gleissolo Háplico, são aqueles com maior proximidade com a drenagem da região.

3.3 - Mineralogia dos solos

Quanto à mineralogia dos solos da sub-bacia do RF, não existem trabalhos ainda que tenham buscado identificar os minerais de forma consistente. Porém, considerando um cenário mais amplo, os solos do DF em boa parte (54,5% da área total) são compostos por Latossolos (REATTO et al., 2004), um tipo de solo que não varia muito mineralogicamente de região para região. Neste contexto, no Distrito Federal, segundo Reatto et al. (1999; 2004), são caracterizados por abundância de minerais secundários do grupo da caulinita, óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos de Ferro e Alumínio, como hematita, goethita, gibbsita, entre outros. Mas também ocorrem minerais traço, como vermiculita, rutilo e anatásio (REATTO et al., 1999).

3.4 - Caracterização do clima

O Córrego Riacho Fundo está inserido em uma região com clima “Tropical de Savana”, segundo classificação de Köppen, com estação chuvosa no verão, delimitada pelos meses de outubro (início) e abril (término) (FERRANTE; RANCAN; NETTO, 2001; GOLÇALVES; ROIG; CAMPOS, 2009), com representatividade de 84% da precipitação total anual (média que varia entre 1200 a 1700 mm), sendo novembro, dezembro e janeiro os meses com maior contribuição. Deste trimestre, dezembro se destaca entre os demais como o de maior precipitação.

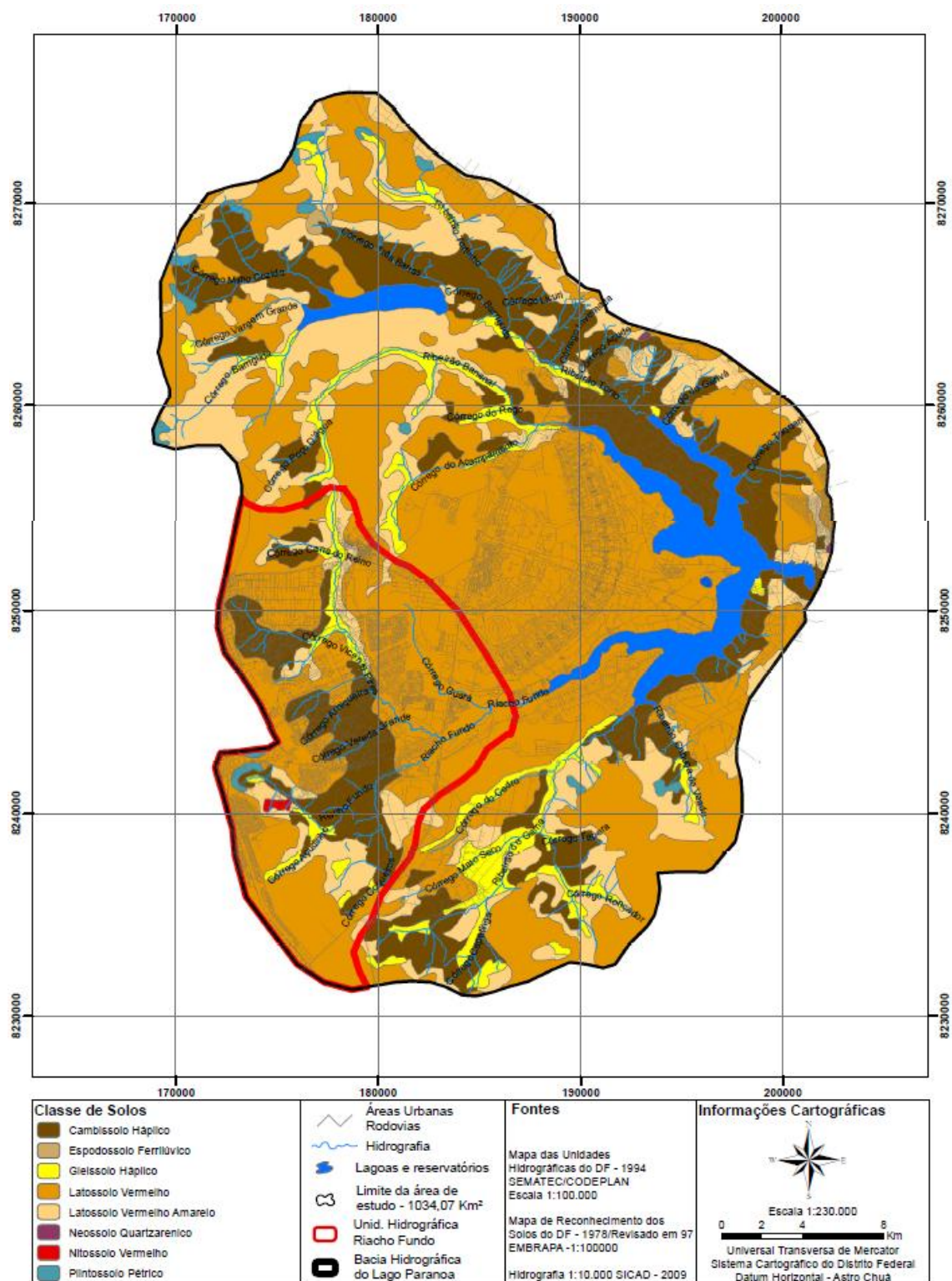


Figura 3: Carta pedológica da Bacia do Lago Paranoá (LP) e limites da sub-bacia do Riacho Fundo, fonte: Carvalho (2013).

Em contraposição, o trimestre mais seco vai de junho a agosto. Outro componente envolvido com as chuvas, a temperatura, tem média anual entre 18 °C a 22 °C, contrastando os meses de setembro e outubro, que possui médias superiores a 22 °C (FERRANTE; RANCAN; NETTO, 2001).

3.5 - Hidrossedimentometria

A CAESB realizou testes exploratórios, que duraram aproximadamente um ano e meio, com início em novembro de 2011 e término em junho de 2013, de monitoramento comparando os resultados dos levantamentos sedimentométricos entre os métodos IIL (Igual Incremento de Largura) e IID (Igual Incremento de Descarga) com frequência mensal e utilizou amostrador automático ISCO 3700, da UnB, para acompanhar os eventos de chuva. A partir da comparação dos resultados entre os métodos utilizados mensalmente, a companhia concluiu que não havia diferenças expressivas entre os resultados e com isso optou em manter o método IIL, devido a sua maior praticidade.

Dessa maneira, de acordo com o relatório de sinopse do monitoramento sedimentométrico (CAESB, 2013b), que trata do teste exploratório entre os anos 2011 e 2013, durante um período de quase dois anos a CAESB coletou dados mensais dentro dos limites de cota de 0,8 m e 1,24 m, em que a concentração de sedimento mínima medida foi de 5mg/L (1,22 t/dia de sedimentos em suspensão) e a máxima 271,2 mg/L (total de 161,44 t/dia da carga suspensa) na cota de 1,24 m (**Tabela 1**).

Já o amostrador automático foi utilizado apenas no dia 01/11/12 e permitiu coletar até 2,36 m, sendo que a cota máxima registrada para o período havia sido de 3,08 m (**Figura 4**). Nesse dia, os dados de concentração variaram de 42,18 mg/L, em 0,85 m de cota (sendo a vazão calculada igual a 1,88m³/s pela curva-chave da CAESB), até 7100mg/L na cota 1,84 m (equivalente a 21,65m³/s de vazão calculada também pela curva-chave da CAESB), durante a depleção do hidrograma).

Atualmente, a CAESB mantém o monitoramento mensal, com exceção dos meses de julho, agosto e setembro, pelo método IIL, mesmo durante períodos de chuva. Quanto ao uso do amostrador automático, fica restrito a uso sem frequência pré-estabelecida. O uso contínuo deste equipamento somente foi retomado por Aguiar (2015).

Durante o andamento do trabalho de Aguiar notou-se a necessidade de aprimoramento da infraestrutura da estação. Deste modo, com recursos de projeto e, em parceria com a CAESB foi instalada estrutura para acomodação de amostrador automático, sonda, painel solar e um teleférico, que acabou sendo destruído em uma forte enchente, ocorrida entre 19 e 20 de janeiro de 2016. Tais modificações tornaram a estação modelo e referência de infraestrutura para as estações existentes e possíveis novas estações da CAESB.

Tabela 1: Dados de monitoramento mensal da CAESB durante teste exploratório entre os anos 2011 e 2013, utilizando as metodologias de amostragem IIL (Igual Incremento de Largura) e IID (Igual Incremento de Descarga). NTU = Unidade Nefelométrica de Turbidez.

Data	Método	Cota (m)	Sólidos em Suspensão (mg/L)	Turbidez (NTU)	Vazão Líquida (m ³ /s)	Descarga Sólida em Suspensão (t/dia)
25/11/2011	IIL	1,24	271,20	274,00	6,89	161,44
07/12/2011	IIL	1,04	10,80	14,60	4,69	4,38
07/12/2011	IID	-	18,00	12,90	4,69	7,29
05/01/2012	IIL	1,14	19,60	13,30	4,51	7,64
05/01/2012	IID	-	15,20	14,20	5,45	7,16
08/02/2012	IIL	0,96	9,40	6,60	3,30	2,68
08/02/2012	IID	-	11,40	7,00	3,30	3,25
08/03/2012	IIL	0,90	5,00	7,20	2,82	1,22
11/06/2012	IIL	0,88	8,40	5,50	2,28	1,65
09/07/2012	IIL	0,85	5,92	5,20	1,98	1,01
09/07/2012	IIL	0,85	6,80	5,50	1,98	1,16
15/08/2012	IIL	0,82	5,33	4,80	1,61	0,74
14/09/2012	IIL	0,80	7,83	6,50	1,42	0,96
08/10/2012	IIL	0,82	5,76	4,90	1,03	0,51
13/11/2012	IIL	1,06	55,14	47,60	4,03	19,20
10/12/2012	IIL	0,99	56,58	37,10	3,39	16,57
08/02/2013	IIL	0,96	19,30	11,50	3,69	6,15
11/04/2013	IIL	1,19	170,80	84,90	6,73	99,37
28/05/2013	IIL	0,86	7,01	5,90	2,25	1,36
11/06/2013	IIL	0,85	7,36	4,40	2,42	1,54

Fonte: CAESB (2013b).

Mesmo com o aprimoramento relatado, durante os estudos de Aguiar (2015), foi necessário nova modificação no suporte da sonda e mudança de local de registro de dados da mesma, devido aos problemas relativos à captura de dados. Ainda assim, o registro de dados ocorria em um ponto fixo, sem que a sonda pudesse obter informações da superfície da água, quando o córrego enchia, o que dificultou relacionar os dados de concentração do amostrador automático com a turbidez registrada pela sonda. Outro problema enfrentado por Aguiar (2015) foi relacionado ao limite de detecção da sonda, que foi de 3000 NTU. O próprio amostrador automático também foi instalado de modo a fazer coleta em um ponto fixo, desta maneira, coletando apenas a porção de maior concentração e granulometria de sedimentos do fundo (com a cheia do córrego). O que acabou por interferir no processo de correlação da concentração de turbidez, devido a tendência em ter maior proporção de partículas maiores (LEWIS; EADS, 1996)

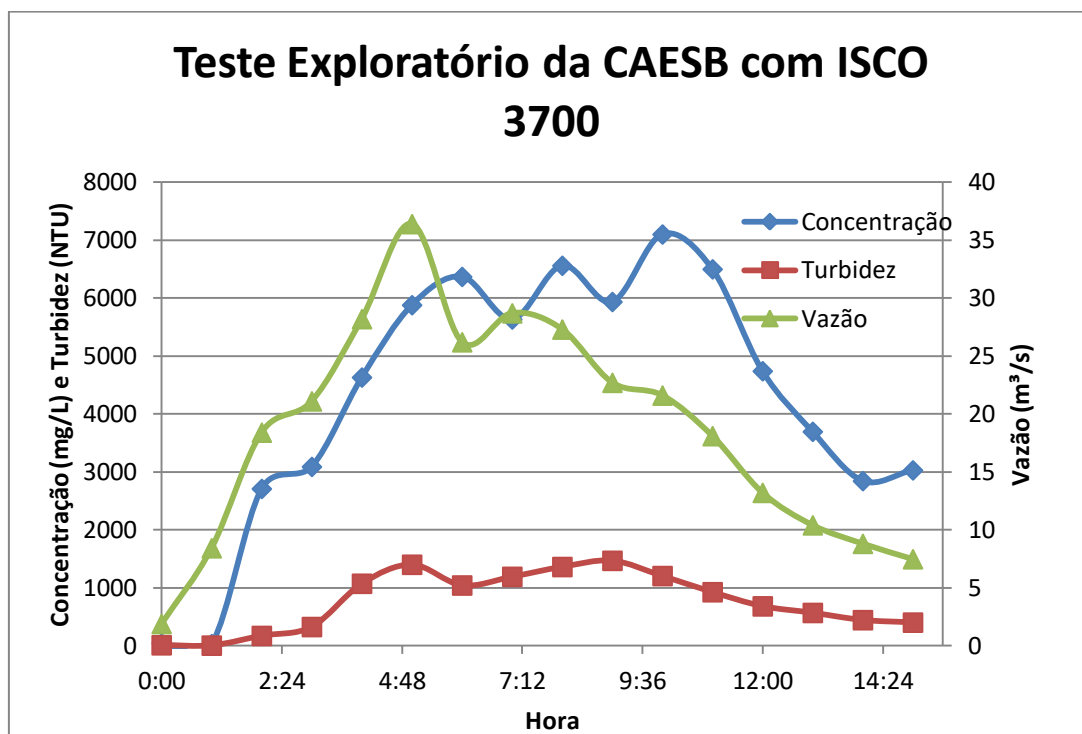


Figura 4: Mostra os resultados do evento do dia 01/11/12, em que foi utilizado amostrador automático

Ademais, os estudos de Aguiar (2015) demonstraram que o método para a quantificação da descarga sólida utilizado pela ANA e CAESB (Igual Incremento de Largura – ILL) não permite uma análise adequada da produção de sedimentos, principalmente quando ocorrem os principais eventos de cheia. Este estudo também utilizou métodos alternativos como pontual na margem com amostrador automático e amostragem em uma única vertical, seguindo os procedimentos estabelecidos por Roig (2005). Com isso, os resultados no trabalho de Aguiar mostram boa correlação de dados entre o método ILL e amostragem em uma única vertical (coeficiente de correlação de 91%, com baixos valores de resíduo); foi obtido 93% de correlação, com altos valores de resíduo, entre o método pontual central da superfície e o ILL e não foi possível efetuar uma boa correlação entre os dados do amostrador automático e o ILL. Entretanto, o estudo de Aguiar (2015), apesar da melhoria do procedimento metodológico, não conseguiu realizar as campanhas do método ILL durante os eventos de cheia. Além disso, apesar do autor ter chegado a algumas estimativas da descarga sólida, o mesmo recomendou que os métodos alternativos devam ser executados simultaneamente em eventos de cheia, em estudos posteriores.

O que se observa a partir dos dados hidrossedimentométricos existentes é que não foi possível obter uma boa série de dados para uma análise mais consistente da descarga sólida. Isso indica que muito ainda deve ser feito para que possamos entender qual é a descarga sólida proveniente da Bacia do Riacho Fundo e qual é a contribuição dos eventos de chuva no

processo de assoreamento do lago. No Distrito Federal, além do trabalho de Aguiar (2015), já foram realizados alguns trabalhos com amostragem de sedimentos, na Bacia do Descoberto e na sub-bacia do Gama, na busca da compreensão de sua variação espaço temporal.

Bicalho (2006) realizou monitoramento mensal entre junho 2005 a fevereiro 2006, utilizando seis estações fluviosedimentométricas ao longo da bacia comparou os métodos de amostragem por IIL com pontual na margem e integração em uma única vertical. A autora concluiu que: (a) a determinação da concentração média de sedimentos de uma seção transversal pode ser feita com erros aceitáveis por uma única vertical; (b) há indícios de que a concentração média possa ser estimada com base em uma única amostra pontual de margem; (c) a variabilidade da concentração média de sedimentos entre as verticais era menor nos maiores cursos d'água. No entanto, a autora recomenda que nos próximos estudos seja feito esforço amostral para aumentar o número de dados para complementar as curvas-chave de sedimentos, principalmente nas vazões mais altas, devido à carência de dados.

Outro estudo, na Bacia do Descoberto, com amostragem em campo por meio de coleta de amostras de água e sedimentos foi conduzido por Lopes (2009). No trabalho foram realizadas campanhas entre novembro de 2008 e abril de 2009, e os dados obtidos foram comparados com os levantados por Bicalho (2006). O estudo conclui que as curvas-chave de sedimentos feitas por Bicalho estavam subestimando o total de sedimentos transportados, devido à carência de dados em vazões mais altas. Lopes também instalou um turbidímetro na bacia, programado para registro a cada 10 minutos, enquanto coletava simultaneamente amostras de sedimento com amostrador automático ISCO 6712 e obteve duas tendências diferentes, mas com boas correlações, sendo uma para as vazões baixas e outra para as altas.

Na sub-bacia do Gama, a qual está inserida na Bacia do Lago Paranoá, os estudos foram conduzidos por Souza (2015), com base nos métodos de amostragem IIL, vertical central e pontual de margem com amostrador automático ISCO 6712. O estudo utilizou dados de vazão da CAESB, para formulação da curva-chave, caracterizados por carência de dados em vazões altas. Deste modo, a autora comenta que os valores calculados para cotas mais altas foram superestimados. Apesar de ter conseguido acompanhar alguns eventos de cheia somente com o método pontual de margem, com amostrador ISCO, os dados de sedimentos em suspensão foram representativos apenas para cotas baixas. Os métodos de levantamentos sedimentométricos não foram comparados entre si.

Além de todos os estudos já comentados aqui, outra questão importante relacionada ao transporte de sedimentos é o transporte em conjunto de poluentes (HOROWITZ, 1991), ligados aos sedimentos que, entre outros problemas, causam alterações na qualidade das águas

(MOREIRA; BOAVENTURA, 2003) e eutrofização do lago, fenômeno que tende a ser intensificado com a perda de volume d'água por assoreamento. O fenômeno de eutrofização pode ser agravado pelo transporte de sedimentos que podem estar carreando nutrientes, aumentando a incidência de florações de microalgas e cianobactérias (FUNASA, 2003). No Lago Paranoá este problema já foi mais sério durante as décadas de setenta e oitenta, porém, pode estar voltando à tona com a proliferação de algas e cianobactérias. (OLIVETTI, informação verbal). No final do ano de 2016 houve, no braço do RF no Lago Paranoá, um *boom* de algas, em especial cianobactérias, Esta proliferação levou o GDF a emitir uma nota de alerta e de restrição de uso na região que engloba desde a foz do RF ao Pontão do Lago (ADASA, 2016).

Diante do exposto, há no Distrito Federal dificuldades em levantamentos de dados, tanto de vazão quanto de sedimentos, em eventos de cheia. Logo, fica clara a importância em aumentar os esforços para que seja aplicada metodologia satisfatória no monitoramento de vazão e sedimentos. Essa preocupação ganha mais destaque no Córrego RF, devido à significativa impermeabilização da sub-bacia em questão, o que aumenta o escoamento superficial e erosão das áreas expostas (e conseqüentemente o transporte de sedimentos), e devido ao histórico expressivo de assoreamento causado por sedimentos transportados pelo córrego RF, como visto na introdução.

4 - REFERENCIAL TEÓRICO

Este item abordará questões referentes ao arcabouço teórico necessário para a execução e interpretação dos resultados desta pesquisa e envolve: o ciclo sedimentológico (erosão, transporte e deposição); e os métodos envolvidos com a obtenção dos dados referentes a descarga líquida e sólida. Deste modo, serão descritos os principais métodos de amostragem de sedimentos em suspensão, processamento das amostras em laboratório, cálculo da descarga sólida, assim como uma base conceitual a cerca de vazão sua medição e cálculo.

4.1 – Ciclo hidrossedimentológico

Sedimentos são materiais provenientes da desagregação de partículas dos solos, os quais são transportados pela água ou ar, e podem ser acumulados em leitos de rios, planícies de inundação, praias (CARVALHO; MASSERA DA HORA, 2013). Esse ciclo, de erosão, transporte e deposição de sedimentos, é conhecido como ciclo sedimentar e é considerado como ciclo aberto, ao contrário do ciclo hidrológico, pois os sedimentos depositados não retornam a área de origem (D'ALKMIN TELLES, 2012). Mais especificamente com relação ao processo de transporte no corpo d'água, segundo Carvalho (2000b), a quantidade total de sedimento, concernente a uma área de drenagem, que passa por um ponto de referência durante certo tempo, é referida como produção de sedimento. Esta é dimensionada em t/ano, podendo ser expressa em termos de taxa de produção específica (t/km²/ano), de modo a refletir a proporção do quanto uma bacia contribui por unidade de área, e não o total absoluto para a bacia inteira, facilitando a comparação entre bacias de diferentes tamanhos (VANONI, 1977; MORRIS; FAN, 1998; CARVALHO et al., 2000a).

O ciclo sedimentar tem seu processo iniciado pela erosão (laminar, em sulcos, em ravinas ou voçorocas), sendo que cada uma delas apresenta potencial distinto de contribuição para a produção de sedimentos (D'ALKMIN TELLES, 2012). A erosão, assim como o ciclo sedimentar como um todo, é um fenômeno natural, influenciado pelos processos do clima, tipo de solo, topografia e ausência de cobertura vegetal. No entanto, é agravado pelas ações antrópicas, sendo o homem o principal agente acelerador dos processos erosivos (CARVALHO, 1994; MORRIS; FAN, 1997).

Após o processo de erosão o material é transportado, fenômeno esse que geralmente apresentam maiores taxas na alta bacia (cabeceira) até finalmente ser transportada pelos cursos d'água. É denominada a relação entre o que é erodido e o que é de fato produzido de Relação de Transferência de Sedimentos (RTS) (MORRIS; FAN, 1997).

A quantidade de sedimento transportado por um curso d'água está intrinsecamente ligada aos fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, cobertura e uso do solo, fatores geomorfológicos, capacidade de transporte do curso d'água e disponibilidade do material na bacia (VANONI, 1977; BROOKS et al., 2012; CARVALHO; MASSERA DA HORA, 2013). Quanto maior a duração da chuva e intensidade (fatores de erosividade da chuva), maior o potencial de desagregação de partículas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985). Assim, as chuvas convectivas de alta intensidade e localizadas são as que mais contribuem para a erosão e transferência de sedimentos (D'ALKMIN TELLES, 2012). A erodibilidade do solo vai depender de características como sua granulometria, minerais constituintes e teor de matéria orgânica. Questões agravantes relacionadas ao uso e cobertura do solo são: a impermeabilização, que aumenta a energia cinética e concentração do escoamento superficial da água da chuva, exposição do solo por desmatamentos, terraplanagens, estradas vicinais e ausência de práticas conservacionistas em atividades agropecuárias. No caso de fatores geomorfológicos, temos a geometria das encostas, tamanho e forma da bacia, declividade e densidade de drenagem como elementos que influenciam a transferência de sedimentos (GUIMARÃES et al 2003; D'ALKMIN TELLES, 2012). Já a capacidade de transporte de um curso d'água, vai depender de fatores como geometria e declividade do canal, rugosidade do fundo, velocidade e turbulência do fluxo. (VANONI, 1977; JULIEN, 1998; MORRIS; FAN, 1997).

Quando no curso d'água, as partículas de sedimento estão sujeitas a uma série de elementos que, baseado em suas características, divide-se conceitualmente o transporte de sedimentos em três categorias: carga em suspensão, carga de fundo e carga de sólidos dissolvidos (VANONI, 1977; CARVALHO et al., 2000a) (**Figura 5**). Assim, elementos como tamanho, peso e formato da partícula, velocidade da corrente, tipo de escoamento e declividade do leito são elementos que irão influenciar o tipo de transporte (JULIEN, 1998).

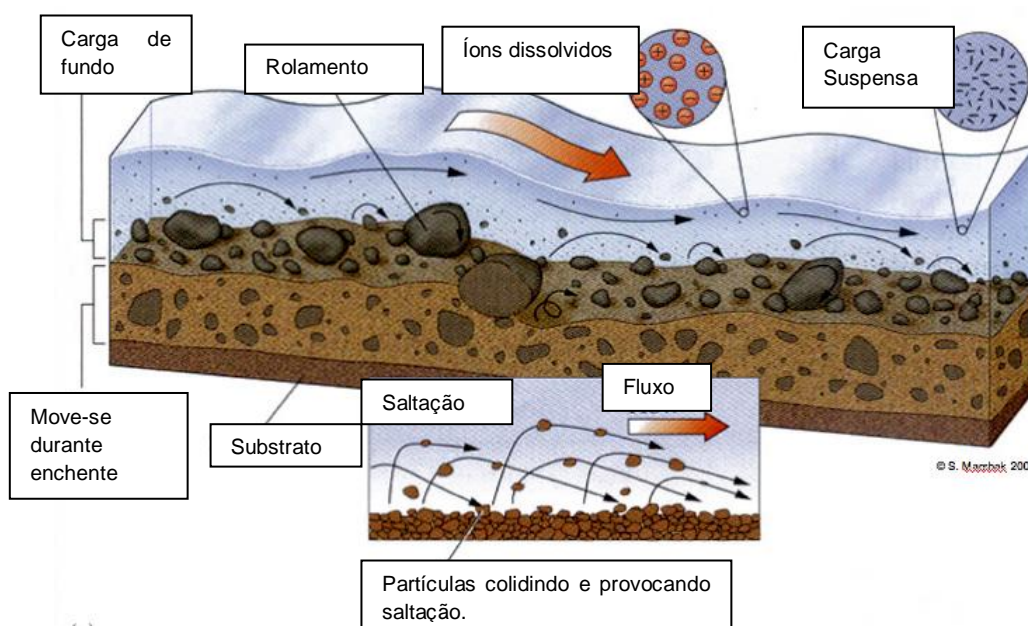


Figura 5: Tipos de carga no transporte de sedimento: carga em suspensão, carga de fundo e carga de sólidos dissolvidos. Imagem retirada e adaptada de:

<https://www.geol.umd.edu/~jmerck/geol342/images/04load.jpg>.

Deste modo, a carga de fundo é composta majoritariamente por areia e cascalho, materiais de granulometria maior, e é transportada junto ao leito do rio, por saltação ou arraste. Porém, o fator declividade tem maior peso na distinção conceitual entre o que está em suspensão e o que é de fundo, dado que partículas de mesma granulometria podem estar em suspensão em rios mais declivosos, enquanto que em rios ou trecho de rios mais planos seria considerada carga de fundo (SANTOS, 2001).

A saltação, como o próprio nome sugere, é o fenômeno que acontece quando continuamente as partículas saltam do fundo para a corrente, seja devido ao impacto de outras partículas, ou da força da corrente. Já as partículas que rolam ou escorregam no leito, ao longo do rio, são as que definem a carga de arraste (JULIEN, 1998). Ressalta-se que a carga de fundo não costuma ser medida, podendo ser estimada como uma porcentagem da carga em suspensão ou a partir da hidráulica do canal e uso de equações de carga de fundo (MORRIS; FAN, 1997). Essa carga em suspensão é composta por partículas de granulometria mais fina, sendo transportada em uma velocidade bem próxima à da água, sendo uma condição que facilita sua quantificação, quando comparamos com o processo de quantificação da carga de fundo, que é mais complexo.

A carga dissolvida é aquela resultante das partículas intemperizadas das rochas e de compostos originados da poluição difusa ou pontual (SANTOS, 2001). É transportada em solução, com maior contribuição do escoamento subterrâneo, quando a origem é a partir da

intemperização, podendo ter contribuição significativa do escoamento superficial quando a origem da carga dissolvida provém de poluição (SANTOS, 2001).

A contribuição percentual entre cada tipo de carga vai variar em função da posição da seção, velocidade, tipo de escoamento, profundidade e granulometria. Porém, o mais comum é que a carga em suspensão represente a maior contribuição entre as demais, podendo corresponder a 95% da descarga sólida total (CARVALHO, 1994). A etapa final do ciclo sedimentar é a deposição, provocando o assoreamento de drenagens, desembocaduras de rios e reservatórios. Nesse sentido, o processo de assoreamento traz uma série de efeitos negativos, como inundações mais frequentes e intensas, incluindo áreas a montante de reservatórios, por exemplo, diminuição da água disponível, prejuízos ao lazer, impactos a biodiversidade aquática, encarecimento do tratamento d'água e eutrofização, culminando com a diminuição da vida útil dos reservatórios (CARVALHO, 1994; MORRIS; FAN, 1997).

Existe uma relação entre o transporte de sedimentos e deposição, ao longo de um canal ou em partes dele, influenciado pelos fatores que controlam a produção de sedimentos (VANONI, 1977; BROOKS et al., 2012; CARVALHO; MASSERA DA HORA, 2013). Dependendo da quantidade de energia existente no transporte de sedimentos, uma parte do que é transportada pode ficar retida no leito do canal, sendo este processo denominado agradiação. Em contrapartida, a degradação é quando a energia no transporte é suficientemente grande para fazer com que parte do material do leito seja levado embora do local de deposição (BROOKS et al., 2012).

No caso de Brasília, uma das principais preocupações com relação ao ciclo sedimentar é com o depósito que ocorre no Lago Paranoá. Desse modo, em um reservatório, independente do fim a que se almeja (abastecimento público ou geração de energia elétrica), o monitoramento sedimentológico deve ser mantido permanentemente, desde o projeto até quando o sistema já estiver em operação (CARVALHO et al., 2000b), até porque, segundo Mantoura et al. (1991; *apud* OLIVEIRA, 2009) a retenção de sedimentos é alta, podendo chegar a uma eficiência de 99% em grandes reservatórios. Esse fato é explicado pelo aumento da profundidade e diminuição da velocidade, que ocorre quando a corrente de água chega ao reservatório, diminuindo, assim, a capacidade de transporte dos sedimentos e promovendo sua deposição (JULIEN, 1998).

4.1.1 – Efeito histerese

Nos estudos de monitoramento de vazão e descarga sólida comumente ocorre o fenômeno denominado histerese. A busca da compreensão deste fenômeno auxilia no entendimento da variabilidade temporal da quantidade de sedimentos (MINELLA et al. 2011)

e até mesmo também o entendimento hidrossedimentológico da bacia monitorada, como um todo (STOTT, 2006; LEFRANÇOIS et al., 2007).

A histerese é o “atraso” na evolução de um fenômeno físico em relação a outro (ZIEGLER et al., 2014). Na sedimentologia, o estudo da histerese é realizado a partir da comparação entre o hidrograma e sedimentograma para um evento de cheia (CARVALHO, 1994). Além disso, esse tipo de estudo, segundo Minella et al. (2011), tem auxiliado na identificação de fontes de sedimentos em suspensão e também na compreensão dos mecanismos de transporte desses sedimentos.

Segundo Williams (1989), existe cinco tipos de curvas de histerese, que são avaliadas a partir dos chamados laços de histerese, por meio do sentido e formato desses. Dentre esses cinco tipos de curvas, representadas por laços, os mais comuns são os laços em sentido horário, anti-horário e em formato de oito (MINELLA et al. 2011) com as informações referentes a vazão (Q) e concentração (c) (**Figura 6**).

O laço no sentido horário mostra que o pico do sedimentograma antecedeu o pico do hidrograma, situação que ocorre quando a contribuição da fonte de sedimentos provém da própria calha do rio ou regiões muito próximas. Já quando o laço de histerese ocorre no sentido anti-horário, é um indicativo de que a fonte de sedimentos se encontra em localidades mais afastadas, como as próprias vertentes da bacia. O laço em formato de oito é a representação de um evento que ocorre tanto o laço no sentido horário quanto anti-horário. Nesse tipo de evento, o pico de concentração é alcançado anteriormente ao pico de vazão e após isso, a concentração diminui gradativamente e a vazão diminui de forma mais abrupta (MINELLA et al, 2011) (**Figura 6**).

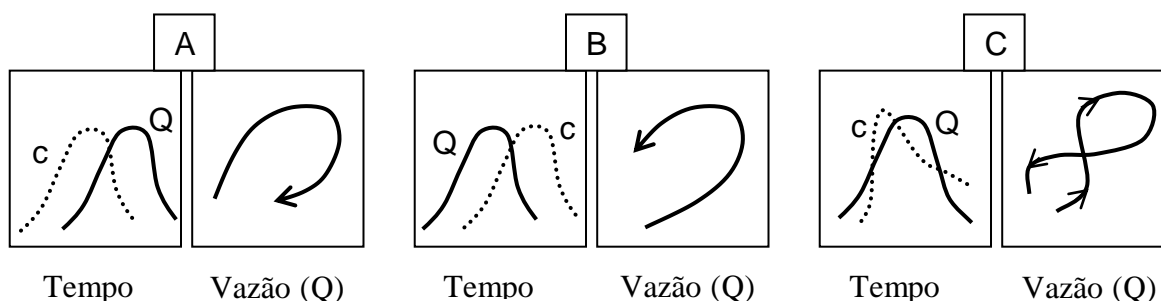


Figura 6: Gráficos ilustrativos dos três principais padrões de laços de histerese: A) laço horário: fonte dos sedimentos próxima ou da própria calha; B) laço anti-horário: fonte dos sedimentos encontra-se distante; e C) laço com formato de oito: fonte dos sedimentos provenientes de regiões próximas e distantes. c = concentração. Adaptado de Williams (1989).

4.2 - Métodos para a medição do transporte de sedimentos

Este item trata dos procedimentos adotados para a determinação da descarga sólida transportada por um rio. Apesar de ser um procedimento bem estabelecido e empregado há muito tempo por vários pesquisadores e instituições gestoras como, por exemplo, o USGS, ainda não existe uma mensuração clara e consistente de qualquer rio, principalmente rios pequenos que tem respostas aos eventos de chuva em um intervalo menor do que 1 dia e os rios de escala continental onde suas dimensões dificultam o levantamento de campo. Isso faz com que os métodos de monitoramento e, conseqüentemente, a gestão dos recursos hídricos superficiais ainda necessitem de melhoras. Apesar de ainda necessitarmos de métodos mais eficientes, os métodos utilizados estão bem estabelecidos pelas agências gestoras como WMO (World Meteorological Organization), USGS (United States Geological Survey), ANA e ADASA. Deste modo, para a quantificação do transporte de sedimentos, faz-se necessário primeiro determinar a descarga líquida e depois a descarga sólida.

4.2.1 - Descarga líquida

A vazão, ou descarga líquida, é definida como a quantidade de água por unidade de tempo que passa por uma seção que, no caso de rios, usualmente é expressa em metros cúbicos por segundo (m^3/s) (COLLISCHONN; TASSI, 2008). Existem diversos métodos para sua obtenção. Entre eles, podemos citar a medição volumétrica, medição colorimétrica, uso de vertedores, Calha Parshall, molinete hidrométrico e métodos acústicos (BOITEN, 2003; CHEVALLIER, 2012; D'ALKMIN TELLES, 2012).

Será apresentada uma breve descrição do método do molinete hidrométrico e dos métodos acústicos, por serem os principais métodos utilizados atualmente (ANA, 2012; CAESB, 2012; ADASA, 2015) e também serem os utilizados neste trabalho. O primeiro método é utilizado oficialmente pela CAESB e ADASA, enquanto o segundo é utilizado em projetos desenvolvidos pela UnB (Faculdade de Tecnologia e Instituto de Geociências) e também a ADASA, embora seu uso não seja sistemático, pela agência. Ressalta-se que, os levantamentos oficiais, só permitiram estabelecer a curva chave para a seção da Estação do Riacho Fundo Zoológico até a cota 1,2 m e a vazão durante os eventos alcança a cota 3,2 m, o que restringe significativamente a interpretação dos dados.

4.2.1.1 – Método Molinete Hidrométrico

O molinete hidrométrico é um equipamento que mede a vazão de forma indireta, a partir do produto da velocidade da água pela área da sessão transversal medida (**Figura 7**). A velocidade é dada por uma equação que relaciona o número de rotações de uma hélice, mostradas por um registrador, durante certo intervalo de tempo (geralmente 50 segundos) com a velocidade da corrente de água que passou (SANTOS, 2001; BOITEN, 2003).

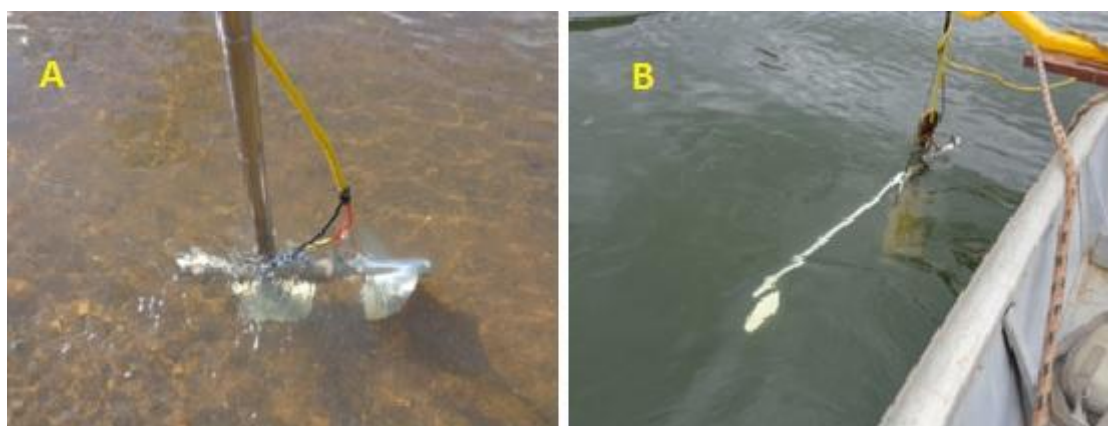


Figura 7: Fotos de molinetes em uso: (A) molinete hidrométrico sendo usado em medição a vau, e (B) molinete sendo usado em embarcação. Imagem retirada de: <http://www.d2l.com.br/hidrologia-e-hidrossedimentologia/>

A equação que descreve esta relação é dada pelo próprio fabricante do equipamento e pode sofrer modificações ao longo do tempo, motivo pelo qual o molinete deve ser aferido anualmente (SANTOS, 2001). O molinete pode ser usado de diversos modos: com haste graduada (medição a vau), colocada ao fundo do canal, em que o operador percorre a seção de medição caminhando, em pontes, embarcações e teleféricos. Estes três últimos frequentemente são utilizados para situações em que os canais são mais largos e com maiores vazões, apesar da medição com molinete ser indicada em canais de menores velocidades e dimensões (até 5 m de largura, profundidades de até 1,20 m e velocidades menores que 2 m/s) (SANTOS, 2001; BOITEN, 2003, D'ALKMIN TELLES, 2012).

Quanto ao número de pontos de medição com molinete em cada vertical, existem dois métodos de amostragem, que segundo Pimenta (1996), são estatisticamente equivalentes. São eles, os métodos dos dois pontos e o método detalhado. O primeiro vale-se da medição em um ponto a 60% da profundidade em cada vertical, para aquelas menores que 0,6 m e um ponto a 20% e outro a 80% da profundidade da vertical para aquelas iguais ou maiores a 0,6 metros.

No método detalhado, o número de pontos pode ser até seis no total, variando de acordo com a profundidade (SANTOS, 2001).

A ANA (2012) indica que o número de verticais deve ser delimitado de modo que o afastamento entre cada vertical seja equivalente a um valor entre 0,025% - 0,05% da largura total da seção molhada. Ainda, a agência comenta que maior concentração de verticais de amostragem deverá ser estabelecida nas áreas de maior fluxo ou de maior turbulência e que nos cursos d'água com pequena largura poderá ser utilizado menor quantidade de verticais de amostragem, porque as verticais consecutivas não devem ter intervalos inferiores a 0,30 m.

4.2.1.2 – Método de Medição Acústica

Os medidores de vazão acústicos têm como princípio o mecanismo de efeito Doppler, os quais são medidos por transdutores. Estes transdutores são responsáveis por emitir ondas acústicas e as recebem de volta ao serem refletidas por partículas que estão sendo transportadas pela corrente de água (SANTOS, 2001; BOITEN, 2003).

Seu uso tem uma série de vantagens: não contém peças móveis, o que acaba por diminuir a necessidade de manutenção; são aparelhos extremamente precisos e com alto nível de exatidão (SANTOS, 2001; BOITEN, 2003, MULLER; WAGNER, 2009). Além disso, o equipamento não prejudica o escoamento da água de modo a causar alterações na velocidade dessa e são operados em menor tempo e o mais importante, mede o escoamento de quase toda a seção, o que permite uma melhor aproximação da vazão na seção (SANTOS, 2001; BOITEN, 2003, MULLER; WAGNER, 2009).

As medições podem ser feitas com equipamento fixado na margem do canal, a vau, travessia ao longo de uma ponte ou uso de barco como suporte (**Figura 8 e Figura 9**).



Figura 8: Medidor de vazão acústico fixado na margem de um canal. Retirado de: <http://www.clean.com.br/Servico/Index/medicao-de-vazao>

4.2.1.3 - Curva-Chave

Como normalmente não é possível realizar a medição de vazão durante todo o ciclo hidrológico, faz-se necessário a realização de extrapolações por meio de correlações entre as vazões medidas e a cota do nível da água que é medida com maior frequência. Este procedimento gera um modelo denominado curva-chave (DNAEE, 1989; SANTOS, 2001; CHEVALLIER, 2012). A curva-chave é a relação existente entre cota e vazão, que permite a obtenção da vazão a partir da cota registrada. Deste modo, pode ser representada matematicamente tanto por uma forma exponencial quanto polinomial (DNAEE, 1989).

É um modelo, utilizado com base em medições de campo, que torna o processo de obtenção de vazão menos dispendioso e penoso. No entanto, conforme já relatado, os leitos dos rios estão sujeitos aos processos de agradação e degradação (BROOKS *et al.*, 2012, o que pode modificar a relação entre cota e vazão, impossibilitando o uso da curva-chave que estava sendo utilizada anteriormente a mudança do leito (TE CHOW, 1988). Por isso, faz-se necessário monitorar os elementos geométricos da seção (perfil transversal, área molhada, raio-hidráulico) (DNAEE, 1989). No entanto, o parâmetro que mais pode sofrer alteração é o perfil transversal, devido ao fundo móvel ou a processos erosivos das margens. Também se deve analisar o histórico de dados da estação, quando disponível (CHEVALLIER, 2012).



Figura 9: Representação de um medidor de vazão acústico sendo utilizado ao longo de uma travessia. Na imagem é possível ter uma idéia de variação de vazão ao longo da seção transversal, em que cores quentes representam maiores vazões, em contraste com vazões mais baixas em cores mais frias. Imagem retirada de: http://www.huntercaprez.ch/images/produkte/RiverSurveyor_Messung.jpg.

As medições de cota e vazão devem ser contempladas em condições climáticas diferentes, estiagens e períodos de cheias, buscando alcançar uma série de dados que contenha a maior variação da vazão possível (mínima e máxima) das cotas do rio (TE CHOW, 1988).

4.2.2 - Descarga sólida

Descarga Sólida é a quantidade de sedimento que é transportada, passando em uma seção transversal de um curso d'água numa unidade de tempo (CARVALHO *et al.*, 2000a). A descarga sólida é dividida em suspensão e arrasto. Aqui daremos ênfase a suspensão, pois segundo a literatura é o principal meio de transporte dos sedimentos, normalmente superior a 95% (CARVALHO, 1994). Segundo estes mesmos autores os métodos de medição de descarga sólida podem ser classificados em diretos ou indiretos (**Tabela 2**).

Tabela 2: Métodos de medição de descarga sólida.

Descarga sólida em suspensão	
Método de medição direta	Método de medição indireta
<p>Tipo 1: Usa equipamentos que medem diretamente no curso d'água a concentração ou outra grandeza como a turbidez ou ultra-som.</p> <p>Tipo 2: Por acumulação de sedimento num medidor (proveta graduada).</p>	<p>Tipo 3: Coleta de sedimento por amostragem de mistura água-sedimento, análise de concentração e granulometria e cálculo posteriores da descarga sólida.</p> <p>Tipo 4: Uso de fotos de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem, em grandes rios.</p>
Equipamentos ou metodologia de medida: método medição direta	Equipamentos ou metodologia de medida: método medição indireta
<p>Tipo 1: Medidor nuclear (portátil ou fixo), Ultra-sônico ótico, Ultra-sônico Doppler de dispersão, Turbidímetro, ADCP (Doppler)</p> <p>Tipo 2: Garrafa Delft (medição pontual e concentração alta)</p>	<p>Tipo 3: Diversos tipos de equipamentos: de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneas, pontuais por integração e integradores na vertical (no Brasil usa-se principalmente a série norte-americana – U-59, DH-48, DH-59, D-49, P-61 e amostrador de saca)</p> <p>Tipo 4: São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das fotos com as concentrações medidas.</p>

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

Os métodos indiretos 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. Os métodos diretos são realizados no campo, *in situ*, com equipamentos que obtêm a concentração por meio de relações entre o parâmetro que se está de fato medindo e a concentração de sedimentos, como por exemplo, medição da turbidez ou de ondas acústicas (ADCP) a qual resultará em valores que tem relação com a quantidade de sedimentos.

Dentro dos métodos indiretos, os principais são por integração na vertical, e os menos usuais são pontual instantâneo e pontual por integração (CARVALHO et al., 2000a). Lembrando que os métodos por integração na vertical são os procedimentos oficiais estabelecidos pelas agencias reguladoras como a ANA e ADASA.

A integração na vertical é feita com amostradores que percorrem uma vertical da seção transversal ao longo de alguns segundos também, podendo ser realizado a amostragem somente no sentido descendente como em ambos os sentidos, devendo o movimento ser constante e respeitar a velocidade de trânsito (EDWARDS; GLYSSON, 1999; CARVALHO et al., 2000a; BOITEN, 2003; CARVALHO; MASSERA DA HORA, 2013). Esta é a velocidade na qual o equipamento precisa percorrer a vertical de modo que não altere em módulo e direção a velocidade do escoamento no momento da coleta (POLETO e MERTEN, 2013).

No caso das integrações nas verticais, os métodos tradicionais consagrados são o método de Igual Incremento de Descarga (IID) (**Figura 10**) e o de Igual Incremento de Largura (IIL) (**Figura 10**) (ANA, 2012; CARVALHO & MASSERA DA HORA, 2013; POLETO e MERTEN, 2013). O IIL é a divisão da seção transversal em semi-seções de igual comprimento em que na metade de cada comprimento é posicionado o equipamento para amostragem na vertical (POLETO e MERTEN, 2013). Neste método, em cada vertical é necessário que seja calculada a velocidade do escoamento para ser usada no cálculo da velocidade de trânsito e com isso obter o tempo que se precisa para descer e subir o amostrador. A descida e subida deve evitar que o equipamento toque o leito e suspenda sedimentos de fundo, portanto deve haver um distanciamento de 5 a 10 cm do fundo. A velocidade de trânsito deve ser a mesma para todas verticais e é calculada a partir da vertical que apresente o maior produto de velocidade média e profundidade. Porém, o tempo de amostragem em cada vertical vai depender também de sua profundidade (EDWARDS; GLYSSON, 1999).

O IID (Igual Incremento de Descarga), diferente do IIL, divide a seção transversal em semi-seções de igual incremento de descarga. Então, é feito depois a média dos valores de concentração de sedimento em suspensão (CSS) de cada semi-seção, de modo a representar a seção por inteiro. Outro ponto que difere a IID da IIL é que a velocidade de trânsito é diferente para cada vertical a ser amostrada (EDWARDS; GLYSSON, 1999; POLETO; MERTEN, 2013).

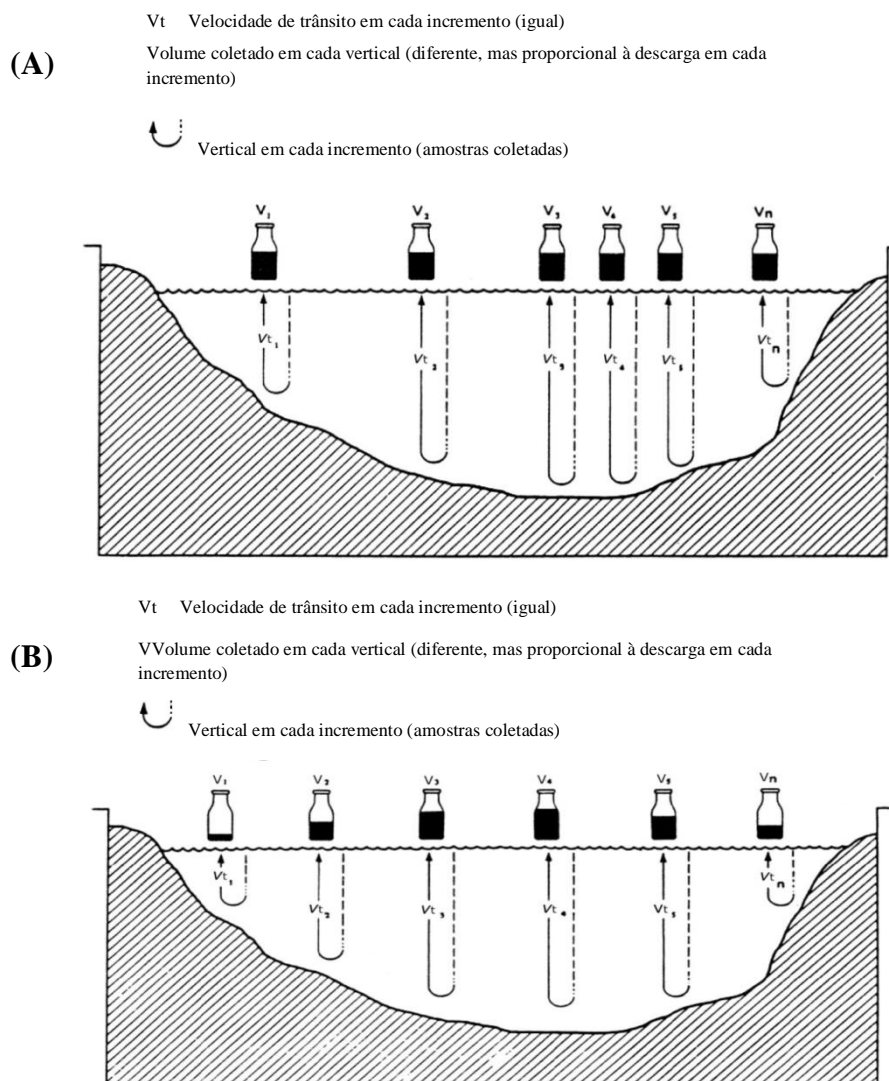


Figura 10: Amostragem por integração. (A) pelo método IID na qual cada sub-amostra tem o mesmo volume e as semi-seções são divididas de acordo com o mesmo incremento de descarga líquida; (B) pelo método IIL na qual cada garrafa tem volume proporcional à vazão da seção transversal. (Fonte: EDWARDS; GLYSSON, 1999).

O método pontual instantâneo é executado a partir de coleta instantânea em um ou vários pontos ao longo da seção transversal, utilizando amostradores do tipo Callede (**Figura 11**). Já a pontual por integração coleta a mistura água-sedimentos em um ponto da seção vertical com duração de alguns segundos, utilizando-se por exemplo, de amostradores padrões como USP-61 (AMS-4).



Figura 11: Processo de amostragem pontual instantânea. (A) Amostrador pontual instantâneo do tipo Calléde com lastro de 50kg utilizado em rios da Amazônia; (B) Parte da seção do Rio Purus com a localização da amostragem nas verticais 1 e 2. Fonte: Adaptado de Santos (2013)

Horowitz (2008) e Poletto e Merten (2013) discutem que sedimentos em suspensão variam tanto temporalmente quanto espacialmente. Por esse motivo, amostragens que abrangem a largura e profundidade do rio geralmente são requeridas para obter amostras mais representativas.

A partir de dados coletados no Rio de Arkansas, Horowitz (2008) obteve diferentes resultados a depender do método utilizado. Os resultados de amostradores pontuais, a 20% de profundidade, comparados àqueles que integravam juntamente a profundidade e largura, mostraram uma subamostragem de partículas de areia ($> 63 \mu\text{m}$), enquanto os amostradores automáticos, também a 20% de profundidade, superamostraram. Com isso, as diferenças na concentração de partículas de areia produziram resultados diferentes na composição química de várias amostras.

Dick (1996, *Apud* SANTOS *et al.* 2001) discorre sobre a possibilidade de superestimação e subestimação dos valores da fonte amostrada, no uso de amostradores automáticos, pontuais de margem. Segundo o autor, a velocidade de sucção da água pela bomba pode ser baixa o suficiente para depositar sedimentos (subestimação dos valores) ou alta a ponto de aumentar o potencial de sólidos na amostra (superestimação dos valores).

Gettel *et al.* (2011) conseguiram melhorar substancialmente o método de amostragem automática a partir do desenvolvimento experimental da entrada da mangueira em contato com a região amostrada, por meio da adaptação de múltiplos tubos de amostragem e implementação de uma ‘asa’. Porém, segundo Poletto e Merten (2013), essa adaptação atenua os erros, mas não resolve a condição de amostragem não isocinética, sendo necessário para isso corrigir os valores de concentração de sólidos em suspensão a partir de uma correlação entre os dados provenientes do amostrador automático e procedimentos padrões

isocinéticos (ou seja, que não alteram em módulo e direção a velocidade do escoamento no momento da coleta).

Apesar das limitações expostas concernentes ao uso do amostrador automático, esse tipo de amostragem acaba por ser útil para a coleta de altas concentrações de sedimentos em eventos de chuva, além de ser um método aplicável a pequenas bacias, devido à rápida resposta às chuvas (GAO, 2008).

4.2.2.1 - Amostrador automático

Os amostradores automáticos (**Figura 12**) bombeiam água com sedimentos a partir de programação prévia realizada. Seu uso possibilita aumentar a frequência de amostragem, permitindo uma representação mais completa de eventos de chuva, especialmente em bacias hidrográficas que apresentam rápidas respostas a chuvas (MORRIS; FAN, 1997). Este é o caso da sub-bacia do Riacho Fundo, Brasília – DF, a qual se encontra intensamente urbanizada (MENEZES, 2010).



Figura 12: Amostrador automático ISCO 6712. Este equipamento bombeia água com sedimentos a partir da programação realizada. Assim, o amostrador pode ser acionado para coletar em diversas situações, sem depender de um técnico estar presente no momento da amostragem. Pode ser programado para coletar em função do tempo, acionado baseado no nível da cota, chuva ou fluxo da água no rio. Imagem retirada de: http://img.directindustry.com/pt/images_di/photo-g/22360-2881231.jpg.

Amostradores automáticos são equipamentos que podem ser acionados em função de diversas variáveis, sem depender de um técnico estar presente no momento da amostragem. Podem ser programados para coletar em função do tempo, acionados com base no nível da cota da água do rio, nível de precipitação, intensidade do fluxo da água no corpo d'água ou mesmo por auxílio de um aparelho celular, à distância.

Apesar das limitações já expostas nesse trabalho em virtude do uso do amostrador automático (DICK 1996, Apud SANTOS *et al.* 2001; HOROWITZ, 2008; POLETO; MERTEN, 2013) e considerando que o método de amostragem depende do objetivo da pesquisa, esse método tem suas vantagens. De acordo com Edwards e Glysson, (1999),

Coiado (2001) e Santos et al. (2001), as vantagens que o método automático oferece são vistas nas seguintes situações: em condições de rápida variação do nível d'água, locais remotos de amostragem, demanda de visitas frequentes, necessidade de coletas frequentes, demanda de coleta em função do tempo, coleta a partir de início de uma chuva ou para acompanhar a duração da chuva por completo e coleta quando certo nível d'água é alcançado. Esses autores argumentam que em muitas das situações citadas é inviável o uso de amostradores manuais, os quais são utilizados nos métodos tradicionais consagrados IIL e IID, recomendados pela ANA.

4.2.3 – Monitoramento de turbidez para quantificação de sedimentos

A turbidez é a medida do quanto a luz é absorvida e espalhada em um corpo d'água (LEWIS; EADS, 1996). Essa medida é influenciada pela quantidade, forma e tamanho das partículas em suspensão na coluna d'água, presença de matéria orgânica e composição mineral dos sedimentos (SANTOS, 2001). Devido aos inúmeros fatores responsáveis pela quantidade de sedimentos transportada em um curso d'água (CARVALHO, 1994; SANTOS, 2001; D'ALKMIN TELLES, 2012; CARVALHO; MASSERA DA HORA, 2013), e também pelas boas correlações encontradas entre turbidez e concentração, o monitoramento da turbidez acaba por ser um bom modo de estimar a concentração de sedimentos (LEWIS; EADS, 1996; MORRIS; FAN, 1997).

Contudo, para o monitoramento da concentração a partir da turbidez é necessário que seja efetivada calibração do equipamento para as condições do curso d'água a ser amostrado, de modo a permitir a determinação da curva de correlação concentração-turbidez (LEWIS; EADS, 1996; MORRIS; FAN, 1997; MINELLA; MERTEN, 2011). Quanto maior a frequência de amostragem de mistura água-sedimento, em menores intervalos de tempo, mais adequada é a calibração (MINELLA; MERTEN, 2011). Por esse motivo, Morris e Fan (1997) sugerem o uso de amostradores automáticos de água e sedimento em conjunto com o uso de turbidímetro.

4.2.4 - Processamento laboratorial

As quantidades de sedimento são extraídas a partir do método da filtração ou evaporação, a depender se as amostras possuem concentrações maiores ou menos que 200 ppm, sendo o método da filtração indicado para valores menores que 200 ppm (CARVALHO et al., 2000a), além da presença de areia. A CAESB (CAESB 2013c; CAESB 2014a) se vale da medição da turbidez diretamente para escolha do método de processamento, considerando

que valores maiores ou iguais a 200 NTU são indicativos do método de evaporação, ao passo que valores menores que esse limite mostra que a amostra deve ser submetida a técnica de filtração. As informações relativas à CAESB aqui foram retiradas de protocolos solicitados à empresa (CAESB 2013c; CAESB 2014a; CAESB 2014b). A execução do processo de filtragem deve considerar a heterogeneidade das partículas, portanto, não é recomendada a tentativa de suposta homogeneização da amostra para retirar apenas uma alíquota para filtrar devido à estratificação das partículas imediatamente após a mistura (CARVALHO et al. 2000a). Em seguida, os sedimentos resultantes do procedimento, quando levados à estufa, não devem ser colocados em ambiente térmico superior a 110 °C, e por uma questão de segurança o recomendado é manter à 105 °C (CARVALHO et al. 2000a); a CAESB trabalha entre 103-105 °C. Segundo o autor, é importante que a temperatura seja respeitada, posto que caso contrário, existem minerais que podem queimar e sofrer alterações, reduzindo o peso da amostra.

Antes de evaporar a amostra, é necessário medir o volume e deixar que seja decantada durante 24 h (CARVALHO et al., 2000a). No caso da CAESB as amostras permanecem 4 dias decantando e protegida da luz, caso a amostra seja transparente. O excesso de líquido isento de sedimento, após o processo de decantação, deve ser retirado e caso haja coloração na amostra saturada, pela presença de partículas em suspensão, é necessário filtrar alíquotas de 50 mL para adição na concentração final. Porém, independentemente da existência ou não de coloração na amostra, se for o caso, é preciso retirar 3 alíquotas de 50 mL (CARVALHO et al., 2000a) ou somente duas, de acordo com a CAESB, para cálculo de sólidos dissolvidos.

4.2.5 – Cálculo da descarga sólida

Aqui, será dada uma breve revisão sobre cálculos de descarga sólida. Para maiores detalhes, é importante verificar os autores citados, visto que existem distinções a serem consideradas, a depender do método de amostragem utilizado. Recomendamos a leitura dos seguintes autores: Vanoni (1977), Carvalho (1994), Julien (1998), Morris e Fan (1997), Carvalho (2000a), Santos (2001).

O cálculo da descarga sólida irá depender do tipo de carga transportada e do método de medição utilizado (CARVALHO, 1994a). De modo mais amplo, a descarga sólida suspensa é resultante da multiplicação da vazão pela concentração, ao passo que a descarga sólida do leito, que sofre ações de resistência entre as próprias partículas e influência de atrito do leito, exige uma análise mais complexa. Assim, para cômputo da descarga sólida total, os dois tipos de carga de transporte devem ser calculados primeiramente, de modo independente,

para posteriormente poder verificar a contribuição de cada um para o total transportado (CARVALHO, 1994).

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot q_i \cdot C_i \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que,
Q_{ss}= descarga sólida instantânea (t/dia);
q_i= descarga líquida instantânea (m³/s);
C_i= concentração (mg/L).

Considerando o processo de cálculo relativo à carga suspensa, dependendo da unidade de medida utilizada, é necessário multiplicar o resultado final por um fator de correção. Deste modo, quando os valores de vazão estão em m³/s, por exemplo, e a concentração em mg/L ou ppm, com o fator de correção 0,0864 obtém-se o resultado final em toneladas por dia (t/dia). Tal peculiaridade (fator de conversão) deixa de ser necessária caso as unidades sejam “homogêneas”, como por exemplo, em situações em que tanto a vazão quanto a concentração são consideradas na unidade de litro. A unidade a ser utilizada depende dos valores alcançados no transporte dos sedimentos. Em cursos d’água com valores acima de 10 t/dia, a unidade deve ser expressa em t/dia, enquanto valores inferiores são expressos em kg/dia (CARVALHO; MASSERA DA HORA, 2013).

5 - ETAPAS E MÉTODOS

A descrição das etapas e métodos aplicados está dividida em: Instalação da Infraestrutura, Caracterização da Seção, Medição de Vazão, Medição da descarga sólida em suspensão, medição dos parâmetros físico-químicos com sonda, processamento das amostras no Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília e análise dos dados.

5.1 - Infraestrutura da estação estudada

A estação fluviossedimentométrica 60478200 (Código ANA) Montante Zoológico (**Figura 13 e Figura 14**) foi escolhida para a realização do estudo visto que é a mais próxima do exutório da sub-bacia do Riacho Fundo. Esta sub-bacia foi escolhida por ser a principal fonte de sedimentos para o Lago Paranoá, como apresentado anteriormente.

Esta estação está localizada imediatamente a jusante da confluência do Córrego Vicente Pires com o Riacho Fundo.



Figura 13: Visão de toda estação fluviossedimentométrica, onde ocorreu o presente estudo. Na data em que a foto foi tirada, o teleférico ainda não havia sido destruído por enchente e a infraestrutura de fluviabilidade da sonda e amostrador automático ainda não haviam sido feitas. Fonte: Aguiar (2015).



Figura 14: Amostragem fixa de água e sedimentos. O filtro coletor permanecia fixo durante as cheias no Córrego Riacho Fundo. Foto: próprio autor (2016)

Hoje, após as várias evoluções devido aos testes realizados (AGUIAR, 2015 e neste estudo) a infraestrutura da estação é composta por: 2 linígrafos sendo um telemétrico, um amostrador automático, uma sonda multiparamétrica do tipo Hydrolab DS5X e Plataforma de Coleta de Dados (PCD), com antena de transmissão (**Figura 15** e **Figura 16**). A estação fica na margem esquerda do córrego (referência esquerda de quem fica de costas para montante do córrego).



Figura 15: Instalação e melhoramento da infraestrutura: tubos PVC para passagem de fios ligados ao painel solar na foto A e instalação da bateria ligada ao painel solar na foto B. Fotos C e D instalação de infraestrutura para flutuação filtro do amostrador automático ISCO 6712 (C) e da sonda multiparamétrica Hydrolab DS5X (D). Foto: Elton Souza (2017a).



Figura 16: Estrutura para sonda e amostragem de sedimento com variação da cota e lance de réguas em funcionamento. Ao fundo, ponte que faz parte da rodovia DF-003 (Estrada Parque Indústria e Abastecimento – EPIA). A ponte encontra-se a montante da estação. Foto: próprio autor.

5.2 - Levantamentos de perfil topográfico

O levantamento de perfil topográfico no Córrego RF é realizado a cada dois anos sob responsabilidade da CAESB. A metodologia empregada é a de Nivelamento Geométrico por Visadas Extremas. Este método consiste em determinar o desnível entre a posição do nível e da mira, por meio de visadas horizontais e com base no conhecimento da altura do nível e da leitura efetuada sobre a mira (VEIGA, ZANETTI, FAGGION, 2012). Conforme será relatado nos resultados, a ocorrência de eventos de grande intensidade na bacia do RF fizeram com que fosse necessário concentrar esforços em realizar uma medição entre o intervalo de dois anos em que a CAESB executa o levantamento. Para isso, a mesma metodologia empregada pela CAESB foi utilizada para o levantamento de 2017 (**Figura 17**).



Figura 17: Levantamento do perfil topográfico na estação 60478200 Montante Zoo, com nível óptico, pelo método de Nivelamento Geométrico por Visadas Extremas em junho de 2017. Foto: Farias (2017)

5.3 – Medição de vazão

Para determinação de vazão, neste trabalho, foi utilizado o método acústico, por meio do equipamento River Surveyor® M9, da Sontek (**Figura 18**). A escolha se justifica devido à rápida resposta da sub-bacia do RF às chuvas (no que concerne ao aumento de vazão), inviabilizando o uso de outros métodos, como o molinete hidrométrico, utilizado pela CAESB. Além disso, é um equipamento que abrange mais pontos de medição que o molinete.

O M9 teve que ser operado de cima da ponte da Rodovia DF-003, próximo da seção de medição da estação, devido à ausência de teleférico. Este foi destruído por uma forte enchente, logo antes do início do presente trabalho.

5.3.1 - Curva-chave

O presente trabalho utilizou um modelo de curva-chave para calibração cota vazão na forma exponencial (**Equação 2**), sendo:

$$Q = a(h - h_0)^n \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual: Q = vazão (m³/s); h = cota correspondente à vazão; h₀ = cota correspondente à vazão nula; e a, n = constantes determinadas para o local.



Figura 18: Medição de descarga líquida com uso do M9 River Surveyor®, da Sontek, no Córrego Riacho Fundo, Estação fluviométrica 60478200 (Código ANA) Montante Zoológico. Foto: Elton Souza (2017c)

A curva-chave foi feita no *software* SIADH 2.0 e utilizando a ferramenta Solver, de modo a delimitar resultados robustos para os parâmetros a , H_0 e n .

Foi calculado desvio absoluto médio entre o que foi mensurado pela curva-chave e o que foi de fato medido pelo M9. Assim, o conceito de desvio no presente trabalho foi dado pela diferença percentual entre os valores de vazão calculados e medidos. Para tanto, aplicou-se a seguinte expressão (Equação 3):

$$Desvio (\%) = \left(\frac{Q_{calc} - Q_{med}}{Q_{med}} \right) \times 100\% \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: Q_{calc} = vazão calculada e Q_{med} = vazão medida.

O Desvio (%) é um critério utilizado pela ANA para validação de curva-chave. Em nota técnica (nº 245/2011/SGH-ANA) do ano 2011, afirma-se que o desvio absoluto médio é tolerado em até 20%. Atualmente, este limite passou a ser de 10%.

Como parte do processo de análise de consistência de dados verificou-se a dispersão dos desvios em relação à cota e ao tempo. Além da seleção de dados de modo a excluir aqueles inconsistentes (gerados por erro na medição de campo, como falha momentânea no cálculo da área molhada ou profundidade, por exemplo).

Para a construção da curva-chave, neste estudo, trabalhou-se com médias, sendo aplicadas para dados que possuíam semelhanças nas condições hidrológicas, ou seja, mesma cota, dia e estágio do hidrograma (ascensão ou depleção).

Depois de concluída a curva-chave, as vazões foram calculadas com base no linígrafo da CAESB, o qual mantinha registro de cota a cada 15 minutos. No entanto, entre abril de 2016 e abril de 2017 os registros foram modificados pela empresa para medir a cota a cada 30 minutos.

5.4 – Medição da descarga sólida

O tópico de medição de descarga sólida descreverá todo o processo envolvido com a medição de descarga sólida. Conterá desse modo, todo o trabalho em campo, laboratório e escritório, para levantamento dos dados. Na etapa de laboratório também será descrito o método utilizado para identificação de minerais presentes nos sedimentos em suspensão.

5.4.1 – Levantamento de campo

Partes dos dados foram obtidos por meio do amostrador automático ISCO 6712, para coleta de amostras de água durante os eventos, e a sonda multiparamétrica Hydrolab DS5X utilizada no monitoramento da turbidez.

Após todo melhoramento da infraestrutura realizado a sonda e o filtro do amostrador passaram a flutuar a aproximadamente 40 cm de profundidade da superfície da água. O amostrador automático foi instalado em janeiro de 2016. Este equipamento também foi acoplado a um detector de nível, do próprio fabricante do amostrador, que tinha a função de acionar o processo de amostragem enquanto o sensor estivesse em contato com a água. Uma vez em contato e enquanto a água ainda tocava o sensor, o programa feito para o amostrador fazia com que a coleta de água e sedimentos ocorresse a cada 30 minutos. Como os dados da CAESB estão limitados a um limite máximo de aproximadamente 1,20 m de cota, o detector de nível foi instalado em 1,40 m de altura da régua (**Figura 14** e **Figura 19**). Isso faria com que parte do esforço de amostragem não fosse perdido com coleta de amostras em cotas que já estavam sendo monitoradas pela CAESB.

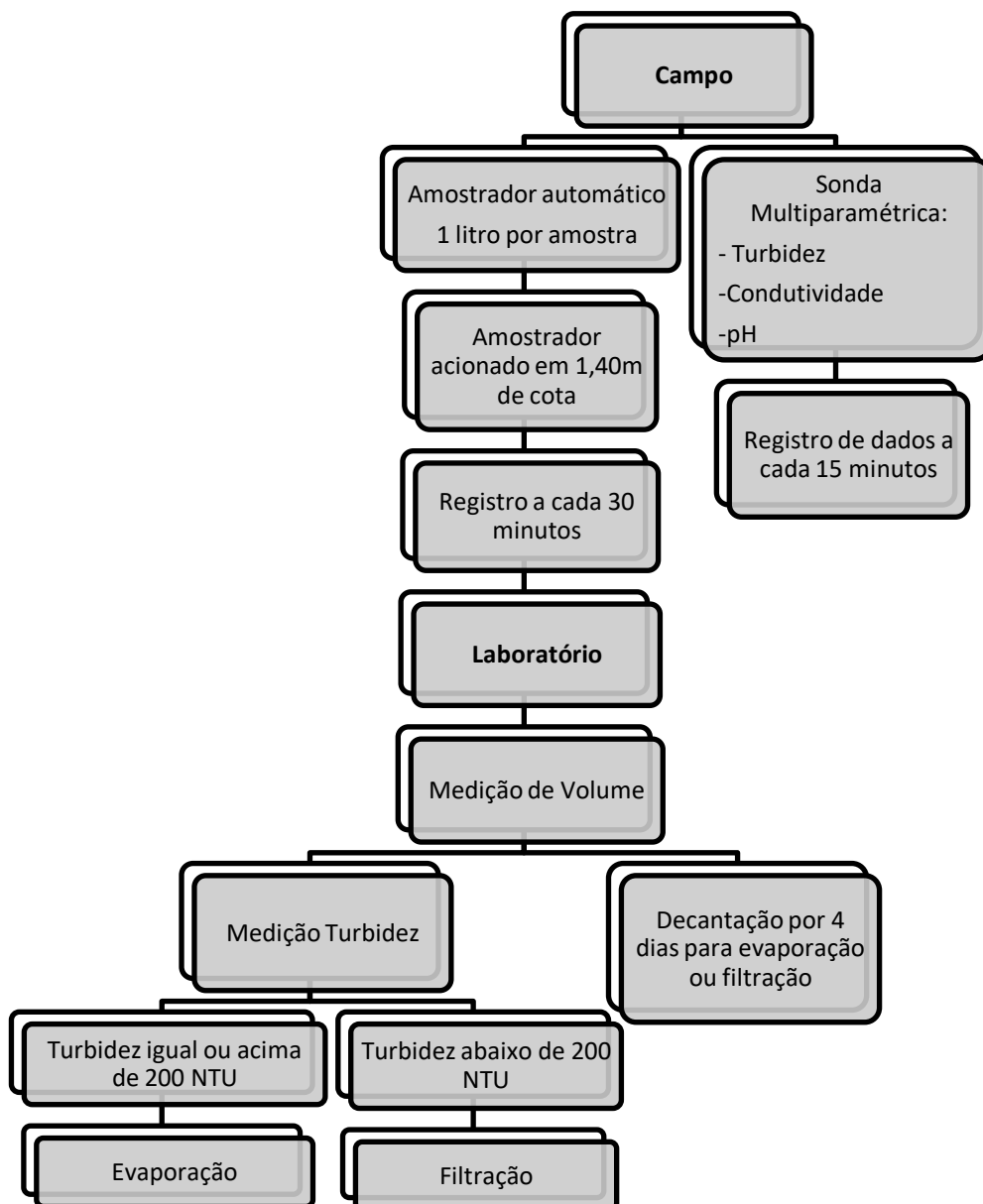


Figura 19: Fluxograma do processo de levantamento de dados em campo e laboratório.

O aumento da cota no córrego, provocado pela chuva, era acompanhado a partir do linígrafo da ADASA, com transmissão telemétrica com uma hora de atraso, da Plataforma de Coleta de Dados (PCD). Após o fim do evento de cheia, ocorria direcionamento ao local para retirar as amostras coletadas e trocar a bateria do amostrador automático.

A sonda foi instalada em janeiro de 2017, momento em que a nova infraestrutura de flutuação já estava pronta. Durante este mês a sonda ainda era alimentada por pilhas, algo que mudou no mês que se seguiu, quando foi ligada a uma bateria, que era carregada por um painel solar, com programação de registro de dados de qualidade da água (Turbidez, Oxigênio

Dissolvido, Condutividade, pH) a cada 15 minutos. Com relação à calibração do equipamento, era realizada a cada 30 dias na ANA.

5.4.2 - Processamento laboratorial

Todos os procedimentos de laboratório foram baseados em protocolos da CAESB, os quais foram solicitados à empresa (**Figura 19** e **Figura 20**). Logo, para a quantificação dos sedimentos em suspensão, o método de filtração foi realizado quando a turbidez de bancada indicava valores inferiores a 200 NTU e o método evaporação era aplicado quando a turbidez alcançava valores iguais ou superiores a 200 NTU. Este parâmetro também era medido no Laboratório de Geoquímica e Água do Instituto de Geociências, na Universidade de Brasília por um turbidímetro de bancada modelo HACH DR2000.

A filtração foi feita com filtros de porosidade 0,45 μm , sendo os filtros pesados anteriormente após 1h na estufa, a 105 °C, e 15 minutos no dessecador para resfriamento.

O método evaporação da CAESB segue as etapas, na seguinte ordem: decantação da amostra durante 4 dias consecutivos, retirada de duas alíquotas de 50 mL (para cálculo dos sólidos dissolvidos); retirada do líquido sobrenadante em cada amostra, deixando um volume próximo a 200mL. Lembrando que, conforme já descrito anteriormente, no referencial teórico, caso o líquido sobrenadante apresente coloração, ou seja, não esteja transparente, é necessário que as alíquotas passem por filtragem em filtro 0,45 μm , para quantificação das partículas que não decantaram. Em sequência, as alíquotas, os 200 mL de amostra e também os filtros com sedimento retido, são colocados para secar em uma estufa. Neste trabalho, as amostras nos béqueres foram secadas em chapa, a uma temperatura média de 90 °C (**Figura 20 (C)**).

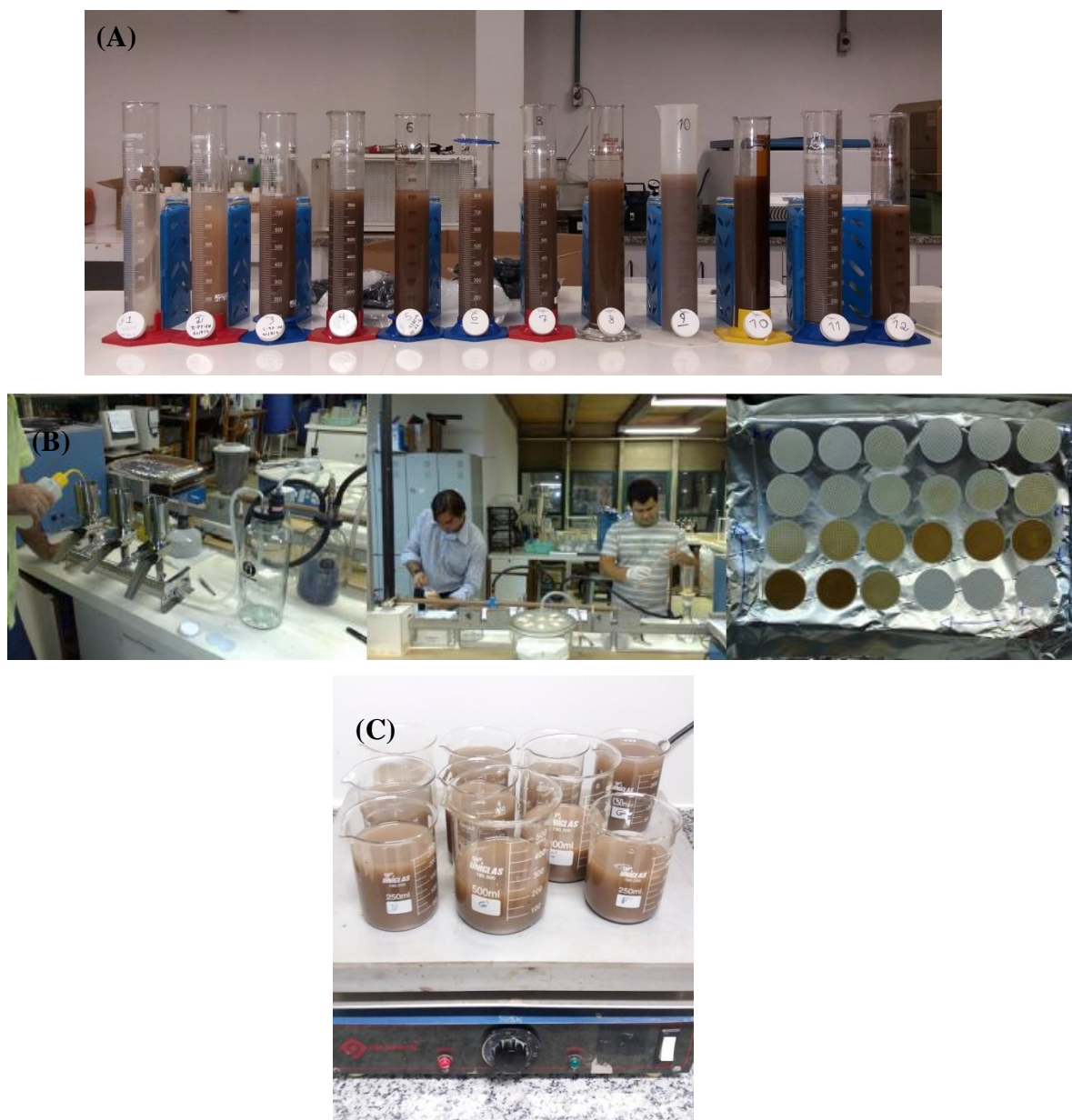


Figura 20: (A) Medição dos volumes das amostras, (B) imagem retirada de Lopes et al. 2009 mostrando o método de filtração, (C) béqueres em processo laboratorial de evaporação em uma chapa. Imagens A e C foto do próprio autor.

5.4.3 – Cálculo da descarga sólida

A partir dos dados de concentração (mg/L) calculou-se a descarga sólida para cada evento de chuva, nos eventos de chuva, foi calculada a partir da área do gráfico de cada evento, com as devidas correções de unidades. Deste modo, a cada dois dados coletados, representados no gráfico de descarga sólida X tempo, calculou-se a descarga sólida parcial por meio de cálculo de área de trapézio. Fazendo isso, no intervalo gráfico entre cada dois dados de concentração (transformada em descarga sólida pelo cálculo vazão X concentração

da amostra) e somando as descargas sólidas parciais tem-se a descarga sólida total para o evento.

5.4.4 - Determinação da composição mineral

Para análise da composição mineral foram coletadas as amostras tanto do método de amostragem fixa quanto com a amostragem em função da cota (amostragem variável). Cada amostra continha um volume próximo a um litro de água com sedimento e foram evaporadas em béqueres. O pó remanescente da evaporação foi usado para o estudo da composição mineral a partir de Difractometria de Raios-X. O equipamento utilizado, o difratômetro de raios-X RIGAKU Ultima IV (Figura 21), opera com tubo de cobre e filtro de níquel, sob 30 kV e 15 mA.



Figura 21: Equipamento utilizado para identificação dos minerais presentes nos sedimentos fluviais após evaporação em béqueres. O difratômetro de raios-X RIGAKU Ultima IV, opera com tubo de cobre e filtro de níquel, sob 30 kV e 15 mA. Imagem retirada de: https://www.rigaku.com/sites/default/files/UltimaIV_image1_0.jpg.

Com relação a interpretação dos difratogramas utilizou-se como ferramenta auxiliar o *software* JADE 9.0 da MDI. Para isso, seguiu-se as seguintes etapas:

- 1) **Preparação da lâmina de amostra total (tot)** para cada amostra, a partir de pó não orientado, com trituração das mesmas em gral de ágata. A amostra total contém as frações areia, silte e argila;
- 2) **Preparação das lâminas com somente a fração argila**, seguindo os passos, respectivamente: dispersão em água, centrifugação com 750 rpm por 7 minutos para separar silte e argila; centrifugação a 3000 rpm por 30 minutos para

recuperação da sobrenadante fração argila, e orientação em lâmina da fração decantada. Estas lâminas são então deixadas para secarem ao ar e designadas de normais (**n**). Leitura no difratograma da lâmina normal de cada amostra;

3) Solvatação, com etileno-glicol (eg), das lâminas da fração de argila orientada, por 12 horas em dessecador. Leitura no difratograma das lâminas com etileno-glicol;

4) Solvatação, com glicerol (gl), das lâminas da fração de argila orientada com etileno-glicol, por 12 horas em dessecador. Leitura no difratograma das lâminas com glicerol;

5) O próximo passo é o aquecimento das lâminasgl, de cada amostra, em mufla, por 3h30min, a 490 °C. Leitura no difratograma das lâminas aquecidas (**aq**);

6) Interpretação dos resultados dos difratogramas, comparando as lâminas **tot, n, eg, gl, aq**, entre elas, e uso do *software* JADE 9.0 para auxílio nesta tarefa.

No entanto, com relação à análise da fração argila, nem todas as amostras puderam passar pelos procedimentos metodológicos supracitados, devido à quantidade insuficiente de sedimento. Nesses casos, em que a quantidade era baixa, utilizou-se peneira de 0,045 mm para separação da areia, já que desse modo não é possível isolar bem somente a fração argila.

6 – RESULTADOS/DISCUSSÃO

Finalmente, aqui serão mostrados os resultados obtidos ao longo deste trabalho de mestrado, que serão descritos, comentados e discutidos, comparando, quando possível, com trabalhos similares já realizados e disponíveis na literatura.

6.1 - Caracterização do canal do Córrego do Riacho Fundo

Uma das premissas para que possamos usar a curva chave de vazão e de sedimentos é a estabilidade da seção amostrada, deste modo, o acompanhamento da variabilidade da seção é fundamental. Ao longo de todo o período de monitoramento desta seção foram levantados 8 perfis, no qual o primeiro foi realizado em 2007.

Como pode ser observado na Figura 22 o perfil da seção de monitoramento entre 2013 e 2014 é marcado por pequenas variações do fundo, porém as margens mostram-se bastante estáveis. Estas variações do fundo com amplitude inferior a 30 cm são comuns em leitos moveis, como é o caso da seção em estudo, e (parecem) não comprometem a determinação da curva chave. Já para o período de 2014 e 2016 observa-se significativa variabilidade do perfil da seção. O perfil de 2016 apresenta uma forte erosão da margem esquerda e expressivo assoreamento do fundo, principalmente próximo à margem esquerda. Já entre o ano de 2016 e 2017 a seção não apresentou variabilidade significativa. Essas modificações no perfil da seção devem ter levado a uma variabilidade da curva chave da seção que foi investigada, e será tratado mais a frente.

Esta variação no perfil da seção foi observada durante os levantamentos hidrossedimentométricos e ocorreram logo após o evento extremo, dos dias 19 e 20/01/2016. Este foi um evento que culminou no alagamento da Vila Cauhy, uma região habitacional localizada próximo ao córrego estudado.

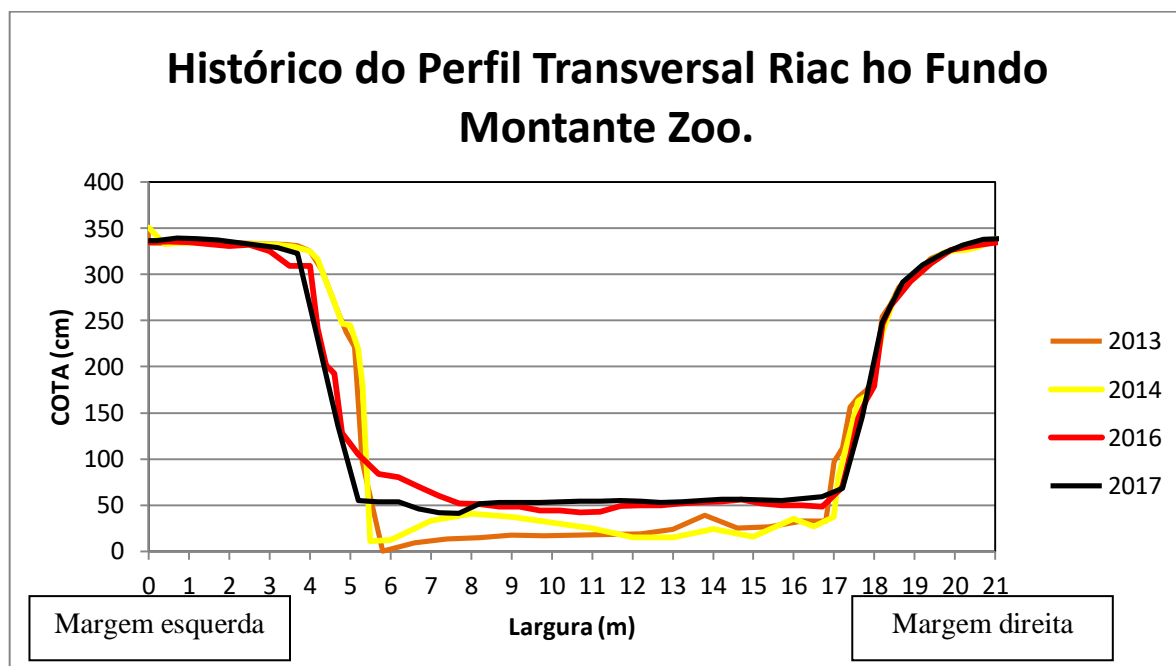


Figura 22: Histórico do levantamento de perfis transversais (cota X largura) para a seção da Estação Riacho Fundo Montante Zoológico (60478200 Código ANA). Fonte: dados da CAESB (2013 a 2016) e do próprio autor (2017).

Além da variabilidade da seção foi observada também uma variação ao longo do trecho do rio logo a montante da estação. Próximo à estação, na margem esquerda a montante, há uma região em processo de erosão (**Figura 23**), contribuindo para o depósito de sedimentos próximo à margem direita ao longo da seção da estação. Essa erosão começou a ser agravada após o processo de queda do gabião.

A ADASA já solicitou a manutenção e revisão deste gabião a partir dos dados levantados neste estudo.

Uma hipótese, além da existência do gabião é o aumento da impermeabilização da bacia que leva ao aumento do escoamento superficial e uma maior vazão no córrego. Este acréscimo na vazão provoca a instabilidade do canal com o aumento do processo erosivo das margens e fundo, como é possível de verificar em seção a montante ao longo da bacia, levando assim um maior volume de sedimentos que acabam por sedimentar na parte mais a jusante da bacia, ao longo do canal e principalmente no Lago Paranoá.



Figura 23: Foto do ano 2017 mostrando erosão na margem esquerda (retângulo vermelho), próxima à Estação Fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico EPIA 003, Código ANA 60478200..Foto tirada de cima de ponte, localizada a montante da estação, na rodovia DF-003 (Estrada Parque Indústria e Abastecimento – EPIA) Foto: Elton Souza (2017b).

Todo este processo compromete a geração de curvas chaves devido a grande variabilidade das condições morfológica do canal.

6.2 – Vazão

Foram realizadas, na estação, 11 campanhas de medições de descarga líquidas. Estas campanhas permitiram medir a descarga líquida em uma grande amplitude de cotas, desde as cotas mínimas na época da seca até as enchentes, alcançando as cotas de até 2,83 m. Deste modo, tivemos medições de vazões entre 0,9 m e 2,83 m, conforme mostrado na Tabela 3 e exemplificado Figura 24.

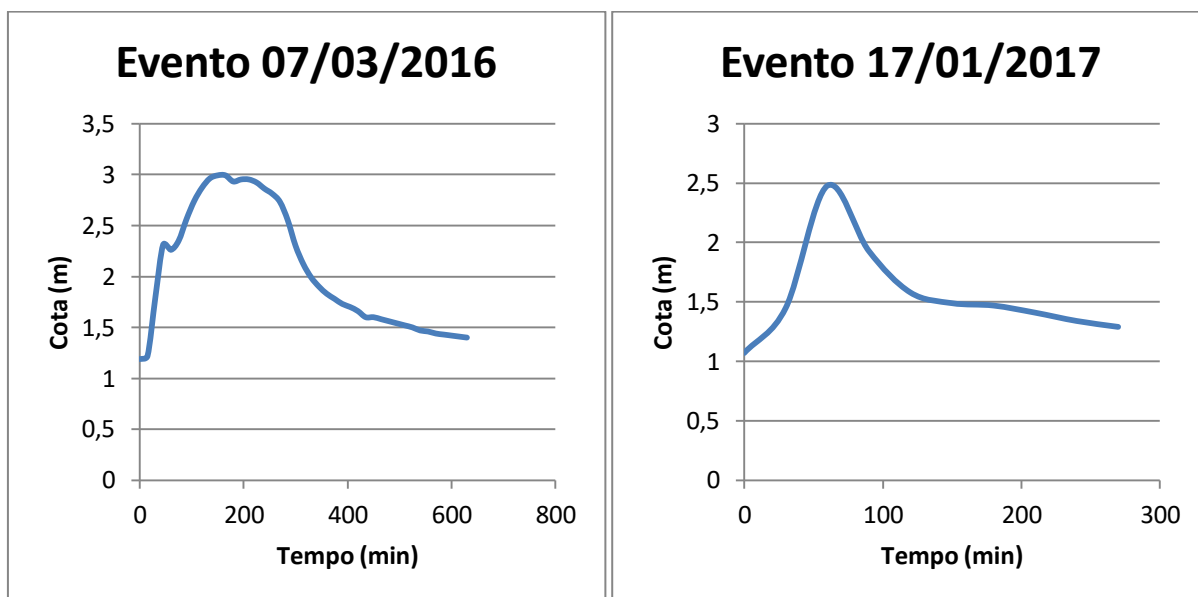


Figura 24: Dois dos eventos em que houve medição de vazão com o M9. Cotas medidas podem ser vistas nas vazões medidas pelo M9 com as cotas referentes e datas.

Tabela 3: Vazões medidas pelo M9 e respectivas cotas e datas.

Data	Cota (m)	Vazão medida (m ³ /s)	Data	Cota (m)	Vazão medida (m ³ /s)
07/03/2016	2,83	37,98	17/01/2017	1,53	10,30
07/03/2016	2,78	37,82	17/01/2017	1,52	10,30
07/03/2016	2,76	34,47	18/01/2017	1,80	16,07
07/03/2016	2,72	34,61	18/01/2017	1,78	14,11
07/03/2016	2,66	36,25	18/01/2017	1,66	13,44
07/03/2016	2,63	34,75	18/01/2017	1,60	12,40
07/03/2016	2,53	32,80	18/01/2017	1,56	9,75
07/03/2016	2,52	31,61	18/01/2017	1,48	10,76
07/03/2016	2,49	31,88	18/01/2017	1,38	8,81
07/03/2016	2,47	30,00	18/01/2017	1,33	8,20
05/10/2016	0,90	1,69	18/01/2017	1,20	6,00
18/11/2016	0,97	1,72	18/01/2017	1,11	3,99
18/11/2016	0,97	2,66	03/02/2017	1,05	3,21
17/01/2017	2,04	18,02	06/02/2017	1,14	4,59
17/01/2017	1,98	15,67	07/02/2017	1,22	5,65
17/01/2017	1,72	11,48	08/02/2017	1,64	9,97
17/01/2017	1,70	13,05	26/02/2017	1,29	7,03
17/01/2017	1,66	12,45	27/02/2017	1,37	7,77
17/01/2017	1,64	11,53	-	-	-

6.2.1 - Cálculo da curva-chave

A partir da análise de consistência dos dados, delimitação dos parâmetros a , n e h_0 com auxílio da ferramenta solver do excel, e baseado nas medições de vazão apresentadas na

Tabela 3: Vazões medidas pelo M9 e respectivas cotas e datas.foi possível estabelecer uma curva-chave (**Figura 25**), que resultou na seguinte equação potencial, proveniente da (**Equação 2**):

$$Q = 11,23(h - 0,59)^{1,52} \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que $a = 11,23$, $h_0 = 0,59$ e $n = 1,52$ e $Q =$ vazão (m^3/s); $h =$ cota correspondente à vazão; $h_0 =$ cota correspondente à vazão nula; e a , $n =$ constantes determinadas para o local.

Já as vazões que compreendem o intervalo de medição entre $10 m^3/s$ até $18 m^3/s$ foram realizadas durante um período em que o equipamento estava sem uma das antenas de rádio. Essa questão, como pode ser vista no próprio manual do M9, não impossibilita seu uso, mas leva a correção de posicionamento do GPS a erros sub-métricos, em contraste com o erro menor ou igual 3 cm, nos casos de funcionamento pleno (com computador e os dois GPS se comunicando).

O desvio absoluto médio resultou em 8% (**Figura 26**), valor aceitável pelos padrões da ANA, que considera a curva válida para valores de desvio até de 10%. Este valor limite não consta ainda em documentos oficiais, mas já está sendo colocado em prática na agência.

Infelizmente não foi possível obter dados de vazão que compreendessem o intervalo entre $18 m^3/s$ e $30 m^3/s$ e a extrapolação da curva foi feita por método logarítmico. Vale lembrar que atualmente o Distrito Federal passa por um período de crise hídrica, que pode ter repercutido na frequência e intensidade de chuvas (conforme será explorado em mais detalhes na Figura 28 e Figura 29), conseqüentemente dificultando o processo de amostragem em cotas mais altas. Existiu mais um fator de impacto para o problema na amostragem, que foi a grande frequência de chuvas durante as madrugadas.

Além do exposto, existe dificuldade por parte dos órgãos públicos, responsáveis pelo monitoramento, de realizar medições em eventos de chuva, ainda mais em um período de crise hídrica, em que as demandas prioritárias passam a ser quase que exclusivamente o monitoramento dos reservatórios de abastecimento atuais. Na verdade, a dificuldade relatada também é muito comum em pesquisas aqui no Distrito Federal também, como pode ser visto em outros trabalhos (BICALHO, 2006; AGUIAR, 2015; SOUZA, 2015). Logo, a curva-chave gerada nesse trabalho traz contribuições, considerando que foi realizada com base em

medições de vazões que nem sempre são fáceis de conseguir pelas empresas responsáveis, até em períodos de ausência de crise hídrica.

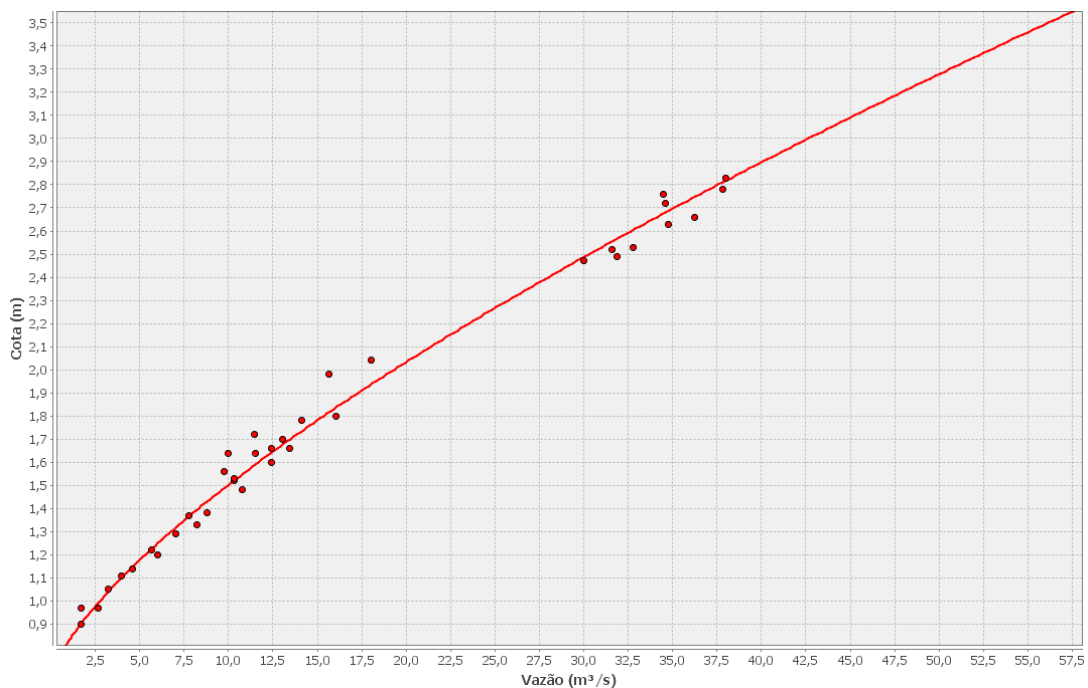


Figura 25: Curva-chave gerada no *software* SIADH 2.0. Os pontos representam medições de vazão realizadas e a linha representa a própria curva gerada.

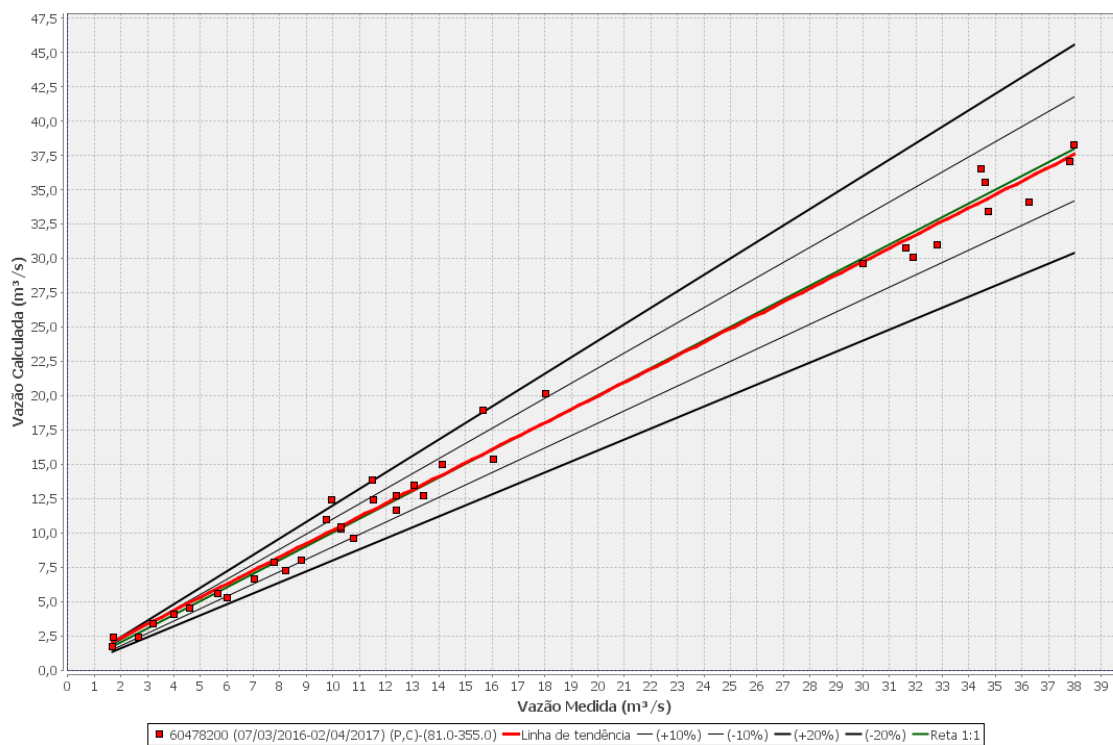


Figura 26: Gráfico feito no SIADH 2.0 exibindo relação entre vazão calculada e vazão medida. A comparação é feita a partir do desvio (%) e representada por linhas que indicam o quanto ocorreu de divergência em termos percentuais. Também mostra os valores da própria vazão calculada e medida.

Procedeu-se na comparação da curva-chave gerada pela CAESB com a curva-chave constituída no presente trabalho (**Figura 27**). A curva-chave da CAESB se baseou em medições até a cota máxima de 1,26 m, enquanto a outra curva-chave obteve medições em cotas expressivamente mais elevadas (até 2,83 m). Essa é a principal diferença entre as duas curvas-chave e o traçado delas começa a divergir justamente acima das cotas não medidas pela CAESB (**Figura 27**). Essa questão, que será abordada em mais detalhes nos resultados de descarga sólida, mostra-se muito importante para o cálculo da descarga sólida, visto que a taxa de água em um evento, conservando-se os outros parâmetros (tempo e concentração de sedimentos), influencia diretamente a quantidade de sedimentos suspensos.

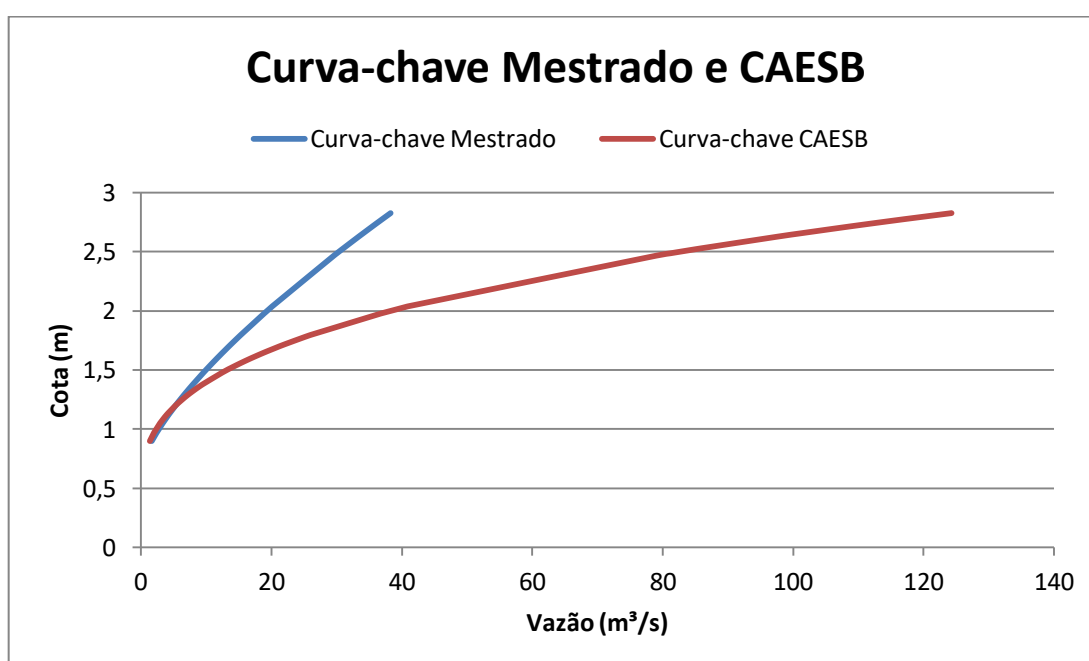


Figura 27: Comparação da curva-chave elaborada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) com a curva-chave constituída no presente trabalho. Para a curva-chave da CAESB, os parâmetros são os seguintes: $a = 10,65$; $h_0 = 0,42$ e $n = 2,8$. A curva-chave do presente trabalho de mestrado resultou em $a = 12,75$, $h_0 = 0,66$ e $n = 1,42$.

6.2.2 – Séries de vazão para os anos hidrológicos trabalhados

A partir da equação da curva-chave pode-se descrever a série de vazões diárias, ou até sub-diárias, ao longo dos anos hidrológicos trabalhados, e também as médias mensais. A partir da comparação dos gráficos da Figura 28 e Figura 29, é possível observar que o ano hidrológico de 2015-2016 foi contemplado com maiores vazões. O período compreendido entre 28/03/2016 até 10/05/2016 foi calculado a partir de cotas observadas, devido à ausência de dados do sensor de pressão para esse intervalo.

Os dados de pluviometria foram concedidos pela CAESB e são relativos à estação do Jockey Club (Cód. ANA 01547018). Trata-se de uma estação localizada a montante da estação Riacho Fundo Montante Zoo e está instalada na região da sub-bacia RF que corre somente o Córrego Vicente pires. Essa região é compreendida por maior impermeabilização do solo, quando comparada com o lado da sub-bacia em que o Córrego Riacho Fundo ainda não se encontrou com o Córrego Vicente Pires. Este córrego é o principal que corre nos limites das unidades administrativas do Guará e Taguatinga (**Figura 2**).

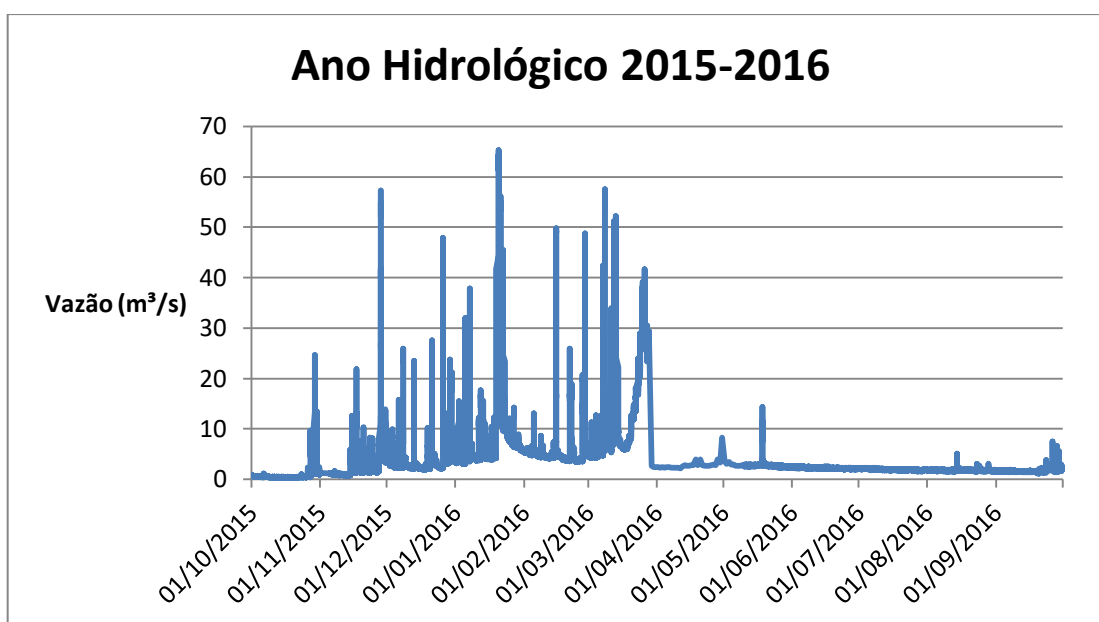


Figura 28: Série de vazões diárias para o ano hidrológico 2015-2016 da Estação 60478200 Montante Zoológico. Vazões no gráfico representadas a cada 15-30 minutos, com base em linígrafo.

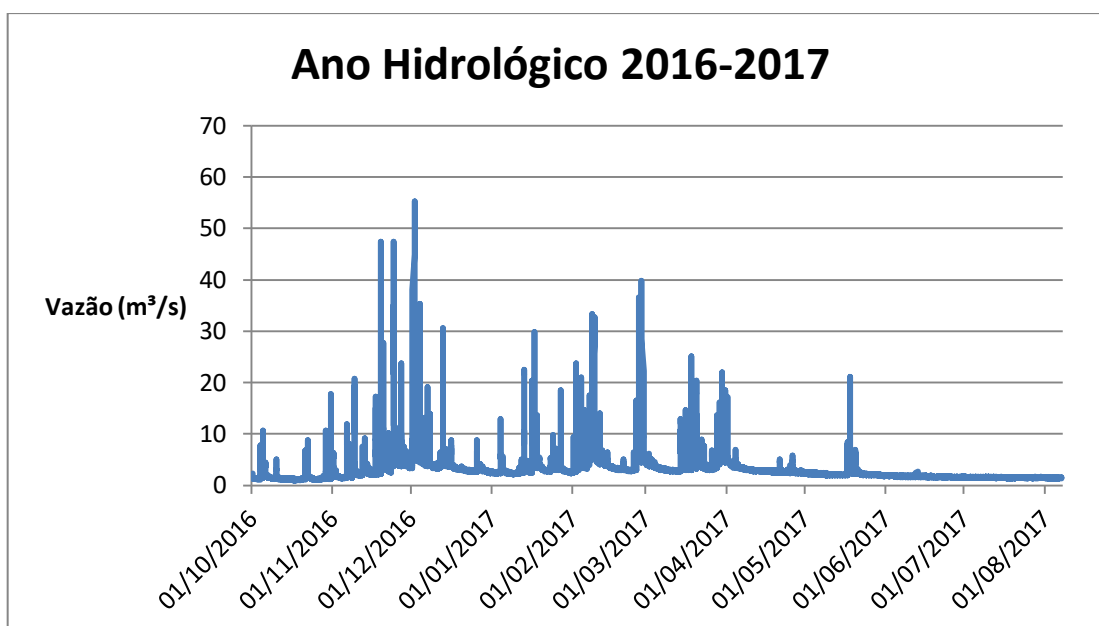


Figura 29: Série de vazões diárias para o ano hidrológico 2016-2017 da Estação 60478200 Montante Zoológico. Vazões no gráfico representadas a cada 15-30 minutos, com base em linígrafo.

As médias mensais (**Figura 30**) são comparadas entre os dois anos hidrológicos, mostrando que as vazões médias para cada mês foram próximas, com as exceções dos meses de Janeiro e Março, meses esses com maiores quantidades de chuva. Os resultados mostraram que no ano hidrológico 2015-2016 as contribuições maiores ocorreram nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, com maior pico médio mensal de vazão em Março. Já o ano 2016-2017, obteve maiores vazões médias mensais em Novembro, Dezembro e Fevereiro.

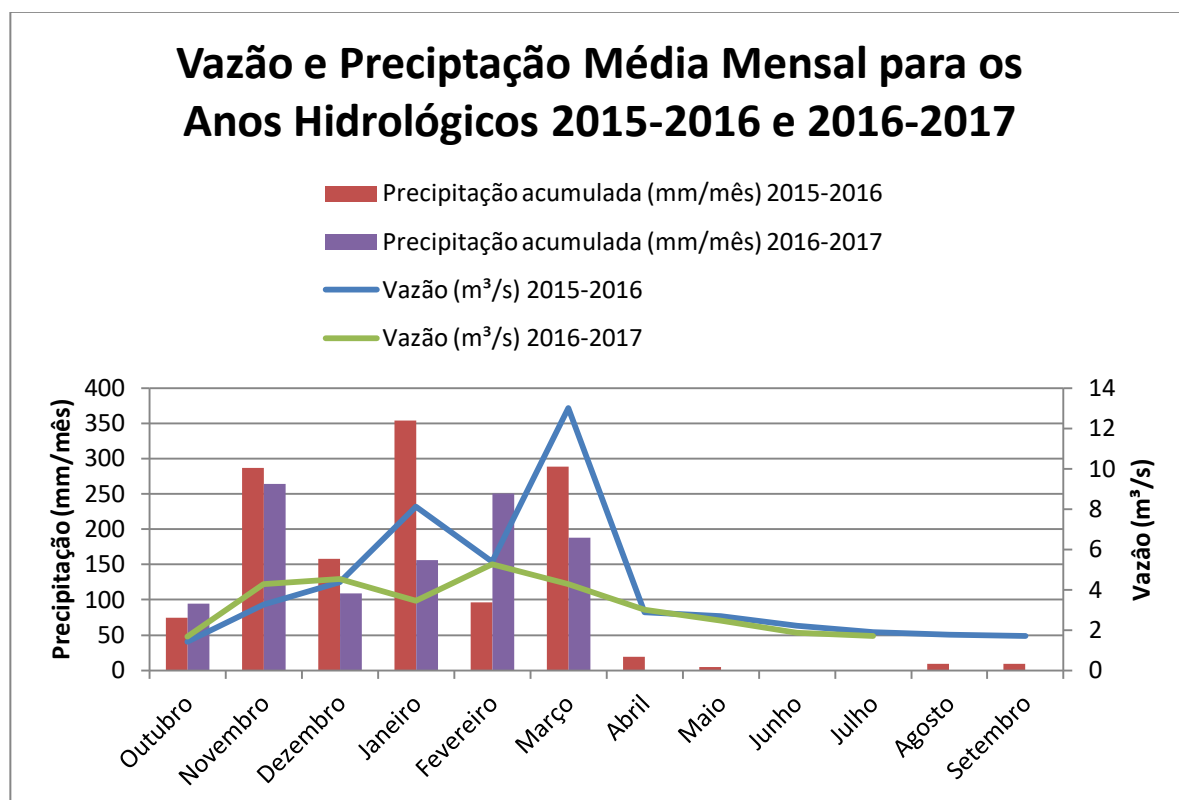


Figura 30: Gráfico das vazões médias mensais e precipitação total mensal acumulada dos anos hidrológicos 2015-2016 e 2016-2017.

No entanto, a análise do período compreendido entre 2006 a 2017 (**Figura 31**) vai ao encontro da descrição (FERRANTE; RANCAN; NETTO, 2001) de maiores valores de chuva para o trimestre Novembro, Dezembro e Janeiro, ainda que a precipitação mensal média de novembro para o período considerado tenha sido um pouco superior ao mês de dezembro.

Quando comparamos a precipitação total acumulada mensal com a vazão média mensal percebemos que existem casos que parecem a princípio inconsistentes, como o fato do maior pico de vazão do ano 2015-2016 no mês de março não coincidir com a maior vazão acumulada mensal, que foi em Janeiro. Outro caso aparentemente inconsistente, para o ano hidrológico 2016-2017 é o fato do valor da precipitação total acumulada ter aumentado entre Dezembro e Janeiro, mas a vazão média ter diminuído. No entanto, os casos de

“inconsistência” são explicados pelo fato de que somente uma estação pluviométrica foi utilizada como fonte dos dados e também devido as chuvas terem ocorrido de forma isolada, conforme pode ser observado nas atividades de campo, cobrindo somente partes da bacia.

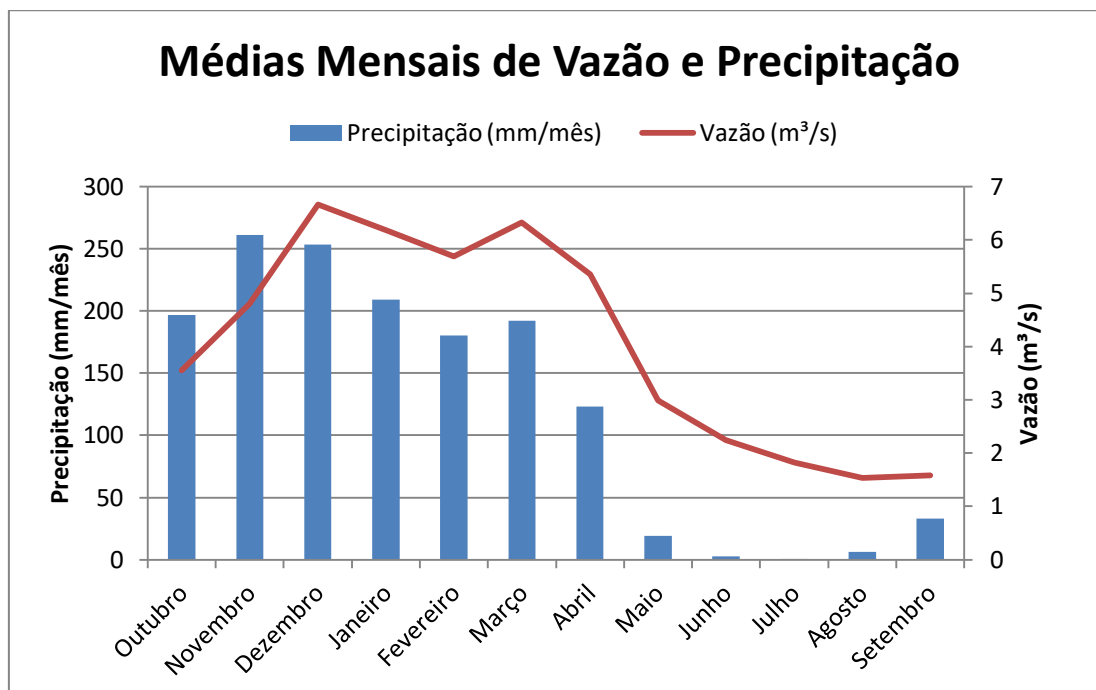


Figura 31: Gráfico das vazões médias mensais e precipitação média mensal total dos anos 2006 a 2017.

6.3 – Sedimentologia

Este tópico abordará os resultados de quantidade de sedimentos e mineralogia dos sedimentos em suspensão. Serão mostrados os resultados de variação da concentração e vazão ao longo do tempo, efeito histerese, descarga sólida, correlação turbidez concentração e minerais presentes nos sedimentos suspensos.

6.3.1 – Concentração e descarga sólida

Durante o andamento do trabalho percebeu-se que muitos eventos de cheia atingiam seu pico em 30 minutos e assim a programação do amostrador automático foi alterada para o intervalo de 15 minutos. Na etapa de laboratório também houve uma mudança: o turbidímetro do Laboratório de Geoquímica se limitava a medições máximas de 461 NTU, valor constantemente ultrapassado durante eventos de cheia no Córrego RF. As amostras que ultrapassavam esse valor eram diluídas, algo que acaba alterando a confiança nos valores. Assim, o parâmetro de turbidez passou a ser medido no Laboratório de Saneamento Ambiental, da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. O equipamento utilizado neste laboratório era um HACH 2100N IS.

A coleta de sedimentos resultou em 25 campanhas de campo, com um total de 30 eventos registrados. Desses, 15 eventos ocorreram no total para cada método de amostragem (amostragem fixa e amostragem a 40 cm de profundidade da superfície), os quais 215 amostras foram coletadas com o método fixo e 198 com amostragem com flutuação.

Após analisar os dados coletados de concentração e vazão, percebeu-se que não foi possível estabelecer curvas-chave de sedimentos, devido à baixa correlação obtida entre os dados de cota e concentração (**Figura 32** e **Figura 33**). Ainda que não seja possível a utilização da curva-chave de sedimentos, as mesmas figuras mostram que houve melhora na correlação dos dados, com o uso da amostragem de cota variável, dado que o coeficiente de correlação quase dobrou, passando de $R^2 = 0,28$ para $R^2 = 0,45$. Outra questão importante a se considerar, que possivelmente influenciou na baixa correlação foi o fato de os registros do linígrafo não terem sido feitos no mesmo instante da amostragem de sedimentos em suspensão.

Nesse sentido, para representar a cota amostrada dos sedimentos, foram feitas médias entre os valores de cota com horários adjacentes as coletas de água com sedimentos. Existe um modo de melhorar essa situação, com uso de interpoladores, como curvilínea, linear, spline interpolante cúbica, la grange, as quais seriam verificadas e testadas. No entanto, por uma questão de tempo, não foi possível aplicar nenhuma delas, sendo uma sugestão para trabalhos futuros.

A seguir, são mostrados os gráficos de eventos de chuva, com representação dos sedimentogramas e hidrogramas em conjunto, de modo a explicitar a variação da concentração de sedimentos e vazão ao longo do tempo. Foram escolhidos dois eventos, um de cada método de amostragem, para representar os demais e serem discutidos.

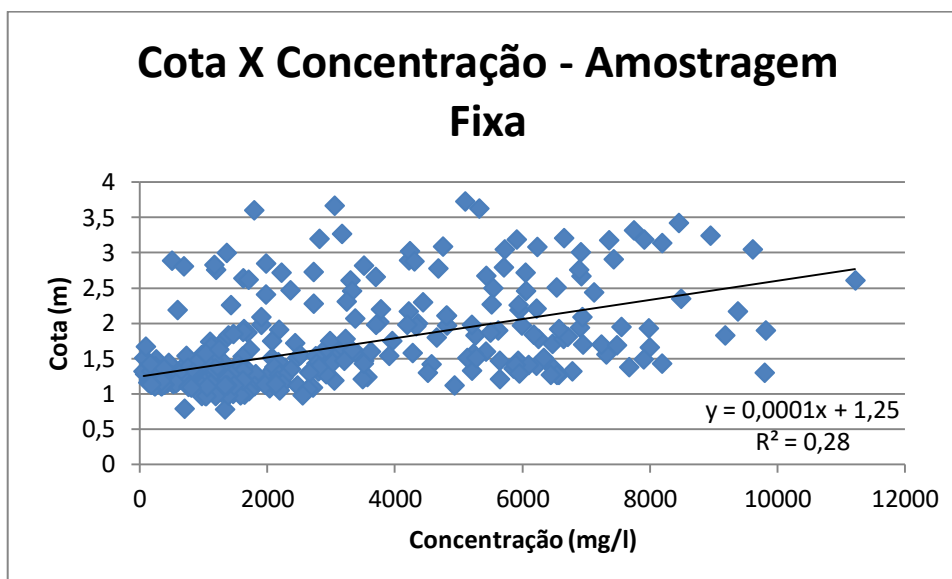


Figura 32: Gráfico de dispersão entre cota e concentração por método de amostragem fixa. Fonte: Aguiar (2015) e próprio autor.

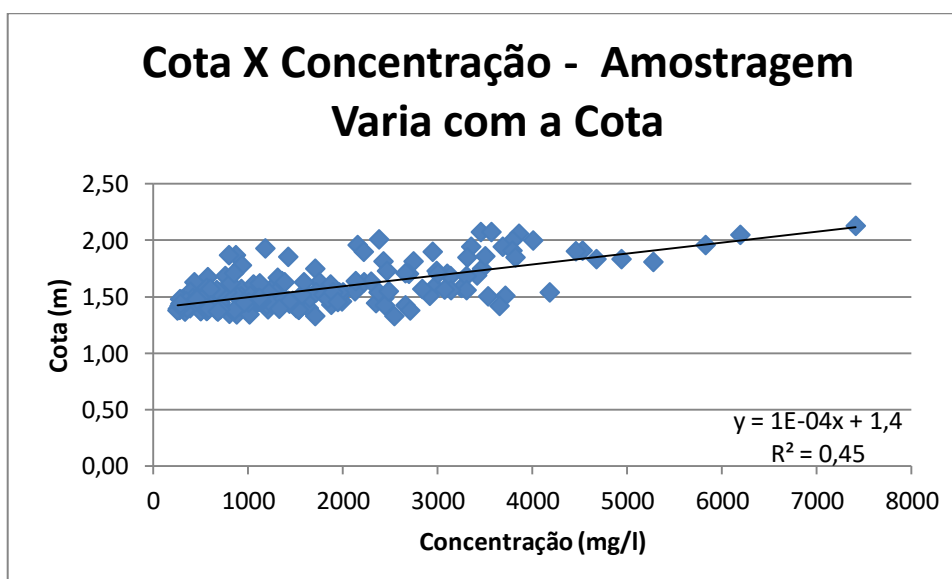


Figura 33: Gráfico de dispersão entre cota e vazão. Dados levantados a partir de amostragem variando com a cota.

Durante o trabalho, observou-se que muitos dos eventos ocorrem com um padrão, em que dois picos de cheia aparecem no hidrograma (Figura 34 e Figura 35). Quando esse padrão ocorre também é possível observar que sempre existe um pico com vazão inferior ao outro pico. Uma hipótese para explicar esse fenômeno seria com relação à origem da água e sedimentos. Nesse sentido, o menor pico seria relativo à parte da bacia menos impermeabilizada, anterior à confluência do Córrego RF com o Vicente Pires. O pico maior

de vazão poderia ser explicado pelo escoamento superficial decorrente da região da sub-bacia do RF mais impermeabilizada, em que passa somente esse segundo córrego. Recentemente pluviógrafos tem sido instalados na sub-bacia, algo que poderá, em trabalhos futuros, auxiliar melhor a compreensão desse fenômeno. Na Figura 35 vemos que no segundo pico de vazão não há pico de concentração em conjunto, possivelmente devido a lavagem de todo sedimento disponível em uma parte mais impermeabilizada da bacia, podendo ter sido uma chuva que diminuiu consideravelmente ou cessou durante pequeno intervalo de tempo no mesmo local.

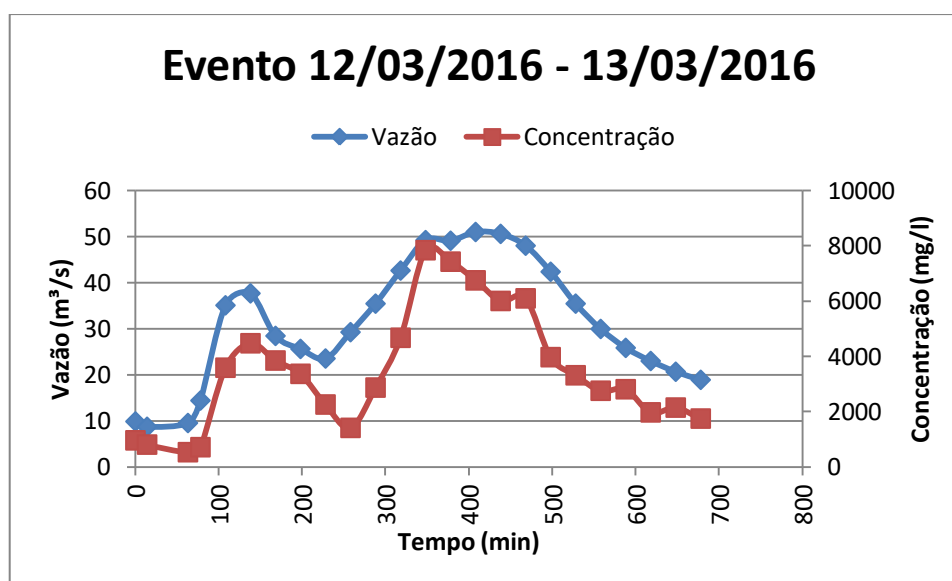


Figura 34: Sedimentograma e hidrograma de evento ocorrido durante período em que a amostragem era feita de forma fixa. No gráfico, cada ponto quadrado representa uma amostra, registrada por linígrafo, no caso do hidrograma e por amostrador automático ISCO 6712 no sedimentograma.

Observando os gráficos de concentração e vazão, ao longo do tempo, nota-se que as principais diferenças observadas entre os dois métodos de amostragem devem-se as durações de tempo, vazões alcançadas e concentrações. Estes parâmetros foram maiores nos resultados obtidos quando a amostragem que estava sendo realizada era a com o filtro fixo de coleta do amostrador automático. Apesar de ser esperado que a quantidade de sedimentos seja maior com o método fixo, devido ao fato das partículas mais densas e com maior massa estarem mais perto do fundo, os parâmetros de duração dos eventos e quantidade de chuva acabaram sendo muito distintos entre os anos hidrológicos, considerando que durante o ano hidrológico em que o método de amostragem fixo foi aplicado choveu mais (ano hidrológico anterior à crise hídrica no Distrito Federal).

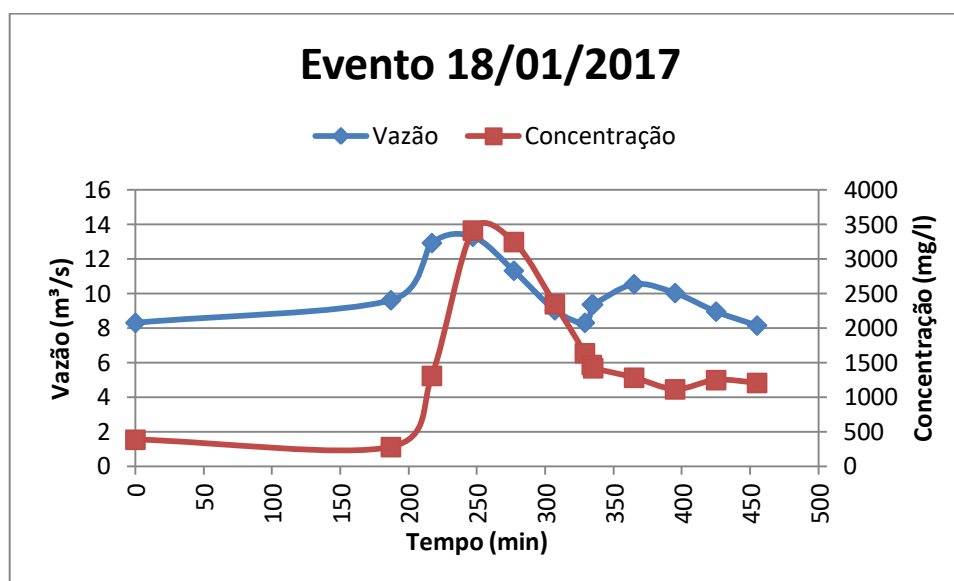


Figura 35: Sedimentograma e hidrograma de evento ocorrido durante período em que a passou a ser feita a 40 cm de profundidade da superfície, com filtro do amostrador flutuando. No gráfico, cada ponto quadrado representa uma amostra, registrada por linígrafo, no caso do hidrograma e por amostrador automático ISCO 6712 no sedimentograma.

Um caso especial ocorreu devido ao fato do sedimentograma não seguir o mesmo padrão do hidrograma (**Figura 36**). Este fato refere-se ao evento extremo do ano hidrológico 2015-2016, em que a água inundou o amostrador automático. É possível observar na Figura 36 que na ascensão do hidrograma, até 40 m³/s, o sedimentograma e hidrograma aumentam com correlação positiva, tendo um padrão similar, um ao outro. Esse tipo de situação, em que o aumento da vazão é seguido pelo aumento da concentração de sedimentos, assim como a diminuição da vazão implica na diminuição da quantidade de sedimentos, é observada em todos ou outros eventos, com exceção deste. O que nos leva a crer que possa haver subestimação das concentrações relatadas após 40 m³/s.

Para comparação e exemplificação, serão descritos e discutidos estudos com uso de amostradores automáticos ISCO, que trabalharam com quantificação de sedimentos em suspensão, em algumas bacias hidrográficas de tamanhos próximos a sub-bacia do RF. Gao e Josefson (2012), em uma bacia de 311 km² na região central do estado de Nova Iorque, encontraram uma concentração máxima de 4,8 g/L, na primavera. O pico de vazão máximo durante essa estação foi de 97,71 m³/s. De Girolamo; Pappagallo e Lo Porto (2015) registraram concentração máxima de 7,13 g/L, durante o período chuvoso, associado com uma vazão máxima de 23,5 m³/s. No entanto, um evento de chuva no verão com valor de precipitação muito superior à média mensal de precipitação atingiu concentração máxima de 37,6 g/L. O estudo foi realizado em uma bacia com área de 72 km². Ziegler et al. (2014) pode identificar concentração máxima de 15,9 g/L, com 19,9 m³/s de pico de vazão máxima,

durante um evento na bacia Mae Sa (74 km²) na Tailândia. Este estudo, porém, foi realizado com amostragens manuais na superfície do rio. No entanto, trata-se de estudos com bacias com características ambientais diferentes, o que justifica a diferença nas concentrações (Tabela 4).

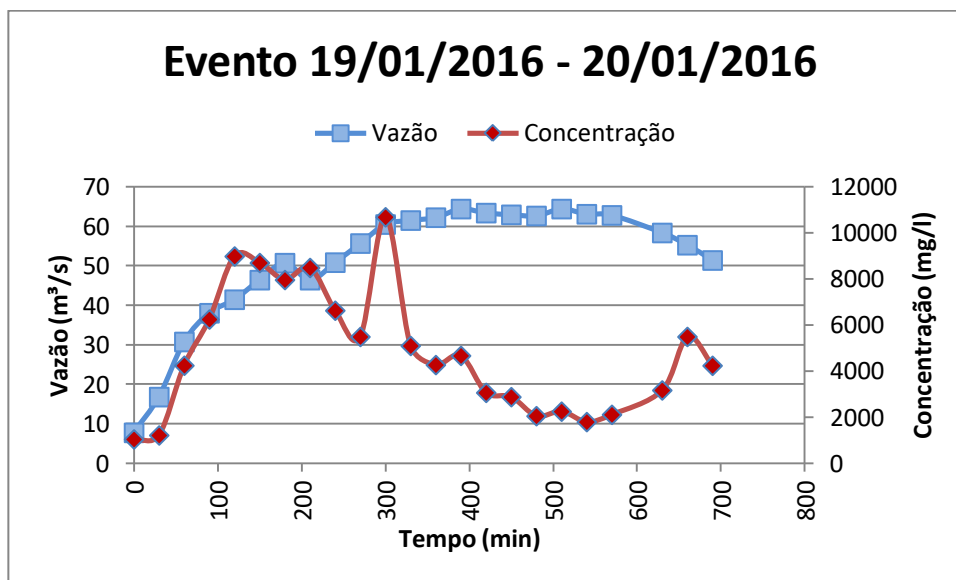


Figura 36: Sedimentograma e hidrograma de evento extremo em que o amostrador automático foi inundado, comprometendo as amostras. No gráfico, cada ponto quadrado representa uma amostra, registrada por linógrafo, no caso do hidrograma e por amostrador automático ISCO 6712 no

O rio com maiores concentrações de sedimento no mundo é o Rio Amarelo, na China, com uma média anual de 37,6 g/L (SHEN; JULIEN, 1992). Segundo Xu (2002), na região central desse rio ou em alguns de seus tributários, é comum que a concentração de sedimentos atinja 300 g/L em tempestades relativamente fortes, enquanto que hiperconcentrações máximas de até 1000g/L já foram encontradas também nesses locais.

Tabela 4 – Resumo das concentrações máximas de sedimentos em suspensão encontradas em outros trabalhos que utilizaram amostradores automáticos do tipo ISCO.

Área (km ²)	Q máximo (m ³ /s)	Concentração máxima (mg/L)	Evento anômalo (mg/L)	Autores	Características que influenciam a quantidade de sedimentos
311	97,71	4797	-	Gao e Josefson (2012)	Bacia rural
72	23,5	7300	37600	De Girolamo; Pappagallo e Lo Porto (2015)	Região montanhosa
74	19,9	15900	-	Ziegler et al. (2014)	Bacia atingida por monções e ciclones
752.443	-	300.000	1.000.000	Shen; Julien (1992); Xu (2002)	Tipo de solo, relevo montanhoso
171,26	64,44	11345	10691	Próprio autor	Urbanização intensa

No presente estudo, no Córrego RF, as três formas de histerese mais comuns (MINELLA et al., 2011) foram vistas em eventos (**Figura 37** a **Figura 39**). O tipo de histerese predominante foi a no sentido anti-horário, indicando que existe uma tendência das fontes dos sedimentos estarem localizadas em locais mais distantes (como as vertentes). O laço no sentido horário ocorreu somente no evento de 16/01/2017. O laço em formato de oito foi o segundo mais frequente, indicando a possibilidade de que as fontes de sedimentos nesses eventos foram tanto o próprio leito do córrego quanto fontes mais distantes na sub-bacia do RF. Estes resultados estão de acordo com Aguiar (2015).

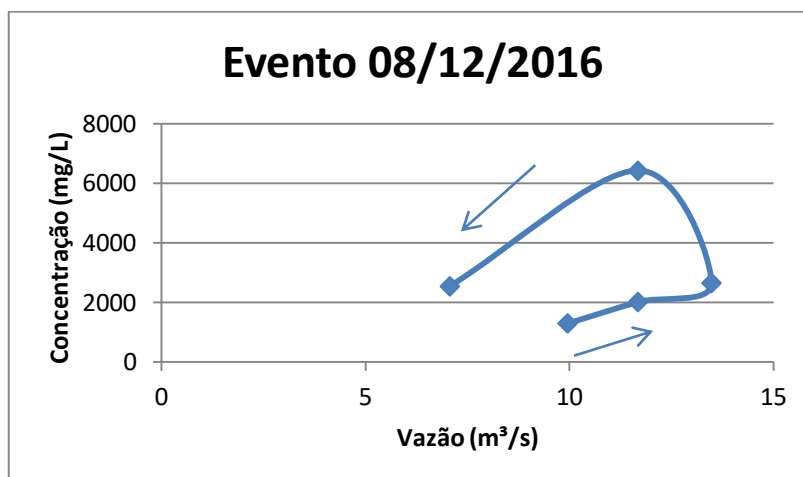


Figura 37: Laço de histerese anti-horário no evento do dia 08/12/2016. Cada ponto no laço representa uma amostra coletada, com intervalo de 30 minutos entre cada uma.

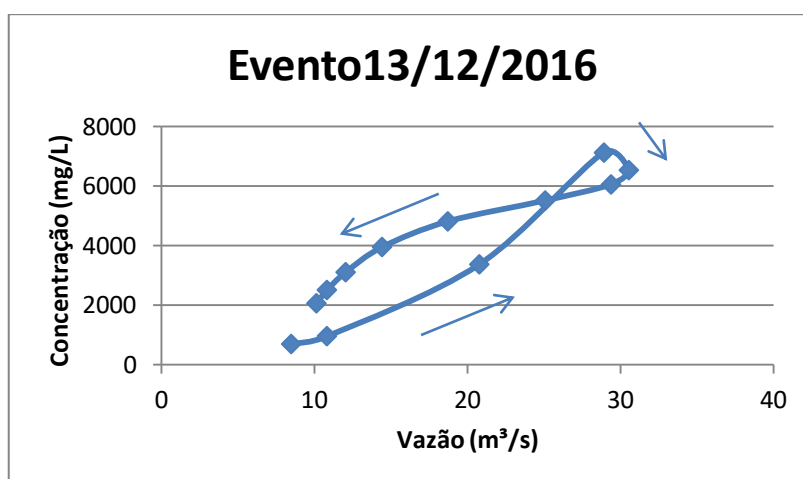


Figura 38: Laço de histerese em formato de oito no evento do dia 13/12/2016. Cada ponto no laço representa uma amostra coletada, com intervalo de 30 minutos entre cada uma.

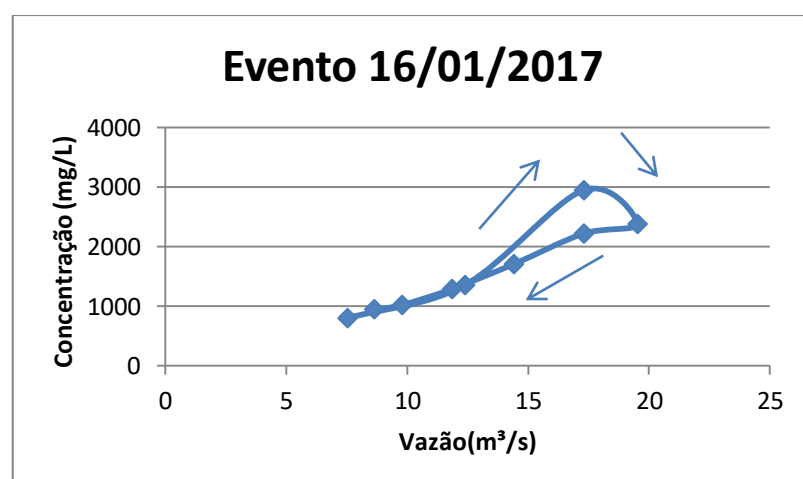


Figura 39: Laço de histerese sentido horário no evento do dia 16/01/2017. Cada ponto no laço representa uma amostra coletada, com intervalo de 30 minutos entre cada uma.

Considerando agora os resultados de descarga sólida, a maior quantidade de sedimento em um evento com amostragem que varia com a cota, resultou em um total de 1258,43

toneladas e a menor quantidade foi de 43,01 toneladas. Na amostragem fixa, o maior valor ficou em 10142 toneladas enquanto o menor valor foi de 47,14.

O histograma da Figura 40 e a Tabela 5 mostram a frequência absoluta dos valores de descarga sólida total por evento, em que cada intervalo de classe é um quartil.

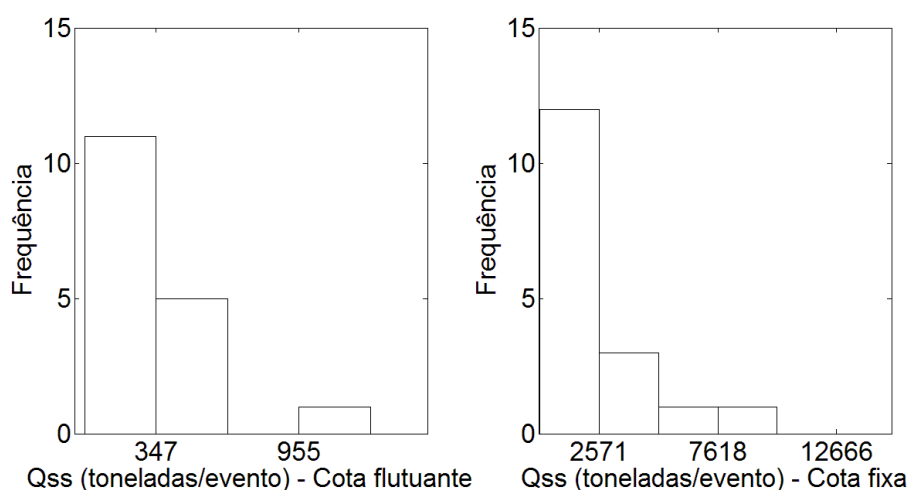


Figura 40: Histograma mostrando a frequência absoluta do número de eventos com valor de descarga sólida dentro de cada intervalo de classe.

Tabela 5 - Tabela mostrando os valores dos quartis, para os dois métodos de amostragem.

Quartis Cota Fixa			Quartis Cota Flutuando		
Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
201,29	688,07	2775,28	108,95	254,75	400,86

Os dados de descarga sólida total por evento (**Figura 41**) são visivelmente mais dispersos com o método de amostragem fixa, ao contrário dos dados que foram obtidos a partir do método de amostragem com a cota variando, conforme já mostrado nos gráficos de dispersão (**Figura 32 e Figura 33**).

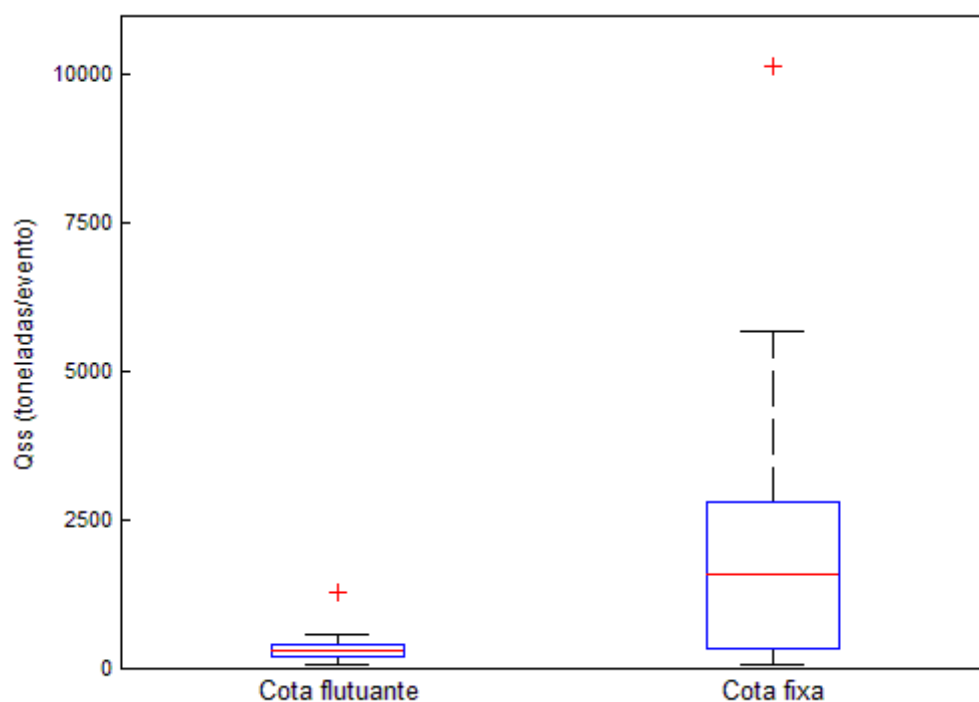


Figura 41: Boxplot mostrando a variabilidade dos valores de descarga de sedimento total de cada evento, em toneladas, com os dados obtidos neste trabalho.

Os pontos em sinal de cruz, na cor vermelha, correspondem aos eventos de maior quantidade de sedimentos. Foram os eventos de maior vazão, para ambos os métodos de amostragem. No caso da variação com a cota, o evento foi do dia 13/01/2017, com pico de vazão próximo a 23 m³/s. Para essa metodologia de amostragem foi o segundo maior evento (em termos de pico de vazão) em que foi possível fazer amostragem de sedimento. O maior evento com amostragem foi o do dia 17/01/2017, chegando a 29 m³/s de pico de vazão, mas foi um evento com menor duração. Assim, o evento do dia 13/01/2017 durou 450 minutos enquanto o outro durou 180 minutos no total.

A cruz vermelha na representação do método de amostragem fixa corresponde ao evento de maior vazão do ano hidrológico 2015-2016. Ocorreu entre os dias 19/01/2016 e 20/01/2017, com duração de 690 minutos. Seu pico de vazão atingiu 64m³/s. Foi um evento tão intenso que a água do córrego subiu na tubulação da mangueira do amostrador automático e invadiu a manilha, transbordando as amostras contidas no equipamento e diminuindo seus volumes



Figura 42: Imagens relacionadas ao evento extremo ocorrido entre os dias 19 e 20 de janeiro de 2016. (A) amostras foram inundadas com a cheia (B) Estação 60478200 Montante Zoo inundada, foto tirada com córrego já na depleção (C) cerca que protegia a estação derrubada (D) guincho sem cabo de aço e com base torta devido a destruição do cabo com a cheia. Fonte: próprio autor.

A Tabela 6 e a Tabela 7 comparam a quantidade total de sedimentos por evento, utilizando a curva-chave da CAESB e a curva-chave gerada neste trabalho. Os dados indicam que há uma superestimação de sedimentos quando a curva-chave da CAESB é utilizada como base. Segundo Ndomba, Mtalo e Killingtveit (2008) é comum que países em desenvolvimento possuam dificuldades de manter monitoramento de sedimentos fluviais, inclusive, muitas vezes o monitoramento deixa de ser efetuado.

Tabela 6 – Vazão máxima calculada (Q, em m³/s). Descarga Sólida total (toneladas) para cada evento, com o método de amostragem com a cota fixa.

Data do Evento	Qss CAESB	Q Máxima CAESB	Qss	Q Máxima
14/01/2016	56,90	14,91	47,14	10,81
19/01/2016 - 20/01/2016	43302,77	317,73	10141,99	64,44
20/01/2016 - 21/01/2016	703,69	45,27	378,46	21,40
21/01/2016 - 22/01/2016	15597,86	238,13	4557,27	55,01
26/01/2016 - 27/01/2016	532,04	23,04	386,32	14,22
05/02/2016	242,73	19,34	174,14	12,75
15/02/2016	4820,58	184,48	1564,73	47,77
21/02/2016 - 22/02/2016	1341,57	62,95	688,07	25,96
11/03/2016 - 12/03/2016	4569,03	95,09	1998,99	32,91
12/03/2016 - 13/03/2016	19801,40	207,68	5668,16	51,01
25/03/2016	8463,84	127,22	2775,28	38,81
08/12/2016	627,54	21,13	438,91	13,48
13/12/2016	4358,27	83,43	1849,47	30,54
04/01/2017	282,73	18,69	201,29	12,48

Os estudos publicados envolvendo o cálculo de sedimentos em suspensão por evento não são muito comuns. López-Tarazón et al. (2009), trabalhou com amostrador automático ISCO e amostras manuais com integração em uma bacia montanhosa na Espanha (445 km²). Apesar de ter avaliado a variabilidade espacial da concentração de sedimentos ao longo da seção transversal, com uso de amostrador US DH59, que variou entre 4 a 14% em relação à média de 50 amostras, não foi possível estabelecer também uma curva-chave de sedimentos, devido a dispersão dos dados de cota concentração. Desse modo, em López-Tarazón et al. (2009), ocorreu uma variação de picos de cheia entre 29 m³/s e 88 m³/s e total produzido de sedimentos entre 426 toneladas e 86 430 toneladas. Rovira e Batalla (2006), em uma bacia na Espanha (894 km²), com dados de sedimentos em suspensão com vazões de 10,1 m³/s até 196,8 m³/s, relataram quantidade por evento com variação de 64 toneladas (pico de 10,9 m³/s) chegando a 61 245 toneladas (196,8 m³/s).

Tabela 7 - Vazão máxima calculada (Q, em m³/s). Descarga Sólida total (toneladas) para cada evento, com o método de amostragem com a cota variando.

Data do Evento	Qss CAESB	Q Máxima CAESB	Qss	Q Máxima
13/01/2017	2323,24	47,57	1258,43	22,03
16/01/2017	666,22	38,80	384,30	19,52
16/01/2017 - 17/01/2017	297,33	29,97	195,57	16,71
17/01/2017	604,19	80,12	254,75	29,84
18/01/2017	481,01	20,68	346,34	13,30
24/01/2017	136,89	12,79	108,95	9,79
27/01/2017	707,83	35,48	400,86	18,51
01/02/2017 - 02/02/2017	329,21	29,40	246,71	16,52
03/02/2017 - 04/02/2017	1052,66	43,41	566,74	20,87
04/02/2017	123,78	14,54	94,43	10,63
Evento 1 - 07/02/2017	922,45	32,34	554,21	17,50
Evento 2 - 07/02/2017	294,51	15,66	214,94	11,15
11/02/2017	526,79	22,55	361,92	14,04
28/03/2017	127,72	21,60	95,22	13,66
28/03/2017 - 29/03/2017	52,44	12,30	43,01	9,54

Trata-se de rios que alcançam vazões mais altas que o Córrego Riacho Fundo e, de modo geral, comparando eventos com picos máximos de vazão próximos, tanto em López-Tarazón et al. (2009) quanto em Rovira e Batalla (2006) ocorrem maior transporte de sedimentos que no Córrego Riacho Fundo. O Rio Amarelo, exportador de sedimentos com maiores concentrações do mundo, em dois eventos excepcionalmente extremos chegou a produzir $20,8 \times 10^8$ toneladas (REN; SHI, 1986).

Com relação aos dados de outros trabalhos citados aqui, quanto à concentração de sedimentos e quantidade produzida por evento, devem-se considerar as diferenças das características ambientais das bacias citadas, como, por exemplo, relevo, clima, tipo e cobertura do solo. Apesar de parte considerável dos trabalhos terem descrito concentrações e quantidades maiores que os resultados mostrados neste trabalho, o histórico de assoreamento do braço do RF mostra uma situação preocupante, que ainda permanece em andamento. Justamente por isso e devido à ausência de informações de quantidade de sedimentos e vazão em cotas altas no Córrego RF, anterior a esse trabalho, é possível reconhecer a importância que as informações geradas nesta pesquisa trouxeram para a região de Brasília. Nesse sentido, o conhecimento da quantidade de sedimentos transportada pelo córrego é um indicativo básico sobre a necessidade de concentrar ações para mitigar o assoreamento do Lago Paranoá.

Levando-se em consideração a questão de planejamento é melhor trabalhar com uma superestimativa a uma subestimativa de total exportado de sedimento para um reservatório. Porém, apesar de a curva-chave da CAESB estar superestimando a quantidade de água, não há monitoramento efetivo de sedimento nas cotas mais altas. Considerando que a sub-bacia do RF possui parte considerável de sua área total intensamente urbanizada, aumentando o escoamento superficial e diminuindo a infiltração de água (com possíveis consequências para o fluxo de base), pode ser que o uso da curva-chave da CAESB prejudique o cálculo do balanço hídrico do Lago Paranoá, algo que poderia ser examinado detalhadamente em outros trabalhos.

Para complementar as informações já adquiridas, recomenda-se que em trabalhos futuros seja feita a caracterização granulométrica para posteriores cálculos do volume total que os sedimentos estão subtraindo do volume de água a cada ano no reservatório do Lago Paranoá.

6.3.2 – Correlação turbidez

Conforme já descrito, os dados de turbidez medidos pela sonda foram medidos *in situ*, a 40 cm de profundidade da superfície e a concentração foi obtida em laboratório. Assim, a comparação entre turbidez e concentração revela uma boa correlação entre os dados (**Figura 43**). Nela, aproximadamente 92% por cento da variação da concentração pode ser explicada pela variação da turbidez. Tal resultado é um indicativo da viabilidade de monitoramento da quantidade de sedimentos no Córrego Riacho Fundo, a partir do monitoramento da turbidez. No entanto, é necessário que haja um aumento no esforço amostral, na coleta de dados, assim como uma análise da granulometria e composição dos minerais nos sedimentos para uma comparação mais precisa.

Neste trabalho, ocorreu uma série de problemas operacionais com a sonda, relacionados à alimentação da bateria no painel solar, sendo necessária a utilização de pilhas em alguns momentos. Algumas tentativas foram feitas no sentido de resolver esses problemas (como troca da bateria e controlador de carga), mas o problema persistiu e não foi solucionado a tempo. Este fato culminou na perda de registro de muitos dados e deste modo apenas dois eventos foram usados como base para a correlação. Foram problemas diferentes dos enfrentados por Aguiar (2015), que acabou por perder muitos dados devido ao modo como a sonda estava instalada. No entanto, o valor máximo que pode ser medido pela sonda Hydrolab DS5X é de 3000 NTU, valor que no laboratório observou ser constantemente superado. Esta limitação fez parte de ambos os trabalhos.

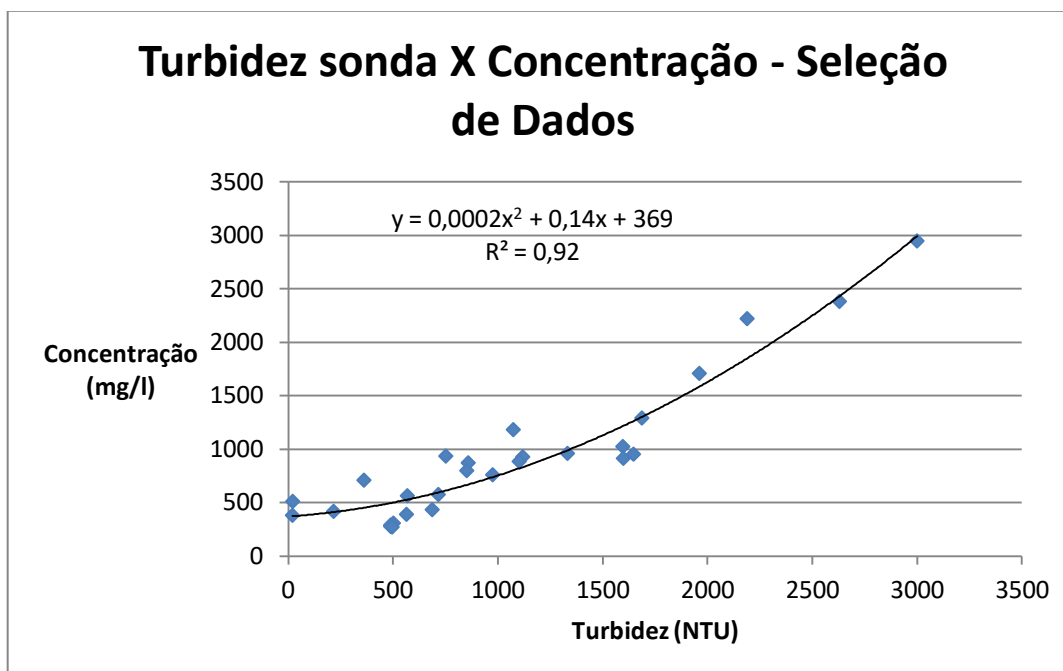


Figura 43: Gráfico de dispersão turbidez medidos pela sonda multiparamétrica e concentração obtida por amostrador automático ISCO 6712. Foram utilizadas 28 amostras para comparação.

Aguiar (2015) alcançou uma relação $R^2 = 0,92$, o mesmo valor observado aqui, entre concentração e turbidez, com a mesma sonda, na mesma estação (60478200 Montante Zoo). Porém, no caso de Aguiar (2015), a sonda foi instalada de modo fixo e com dados de apenas um evento, haja vista que apenas um em oito eventos obteve uma boa correlação entre os dados. Diferente de Aguiar, todos dados registrados pela sonda, dentro dos limites de detecção desta, puderam ser correlacionados.

Ziegler et al., (2014) trabalharam com a estimativa de concentração a partir de dados de turbidez, em uma bacia na Tailândia. De modo análogo ao realizado neste trabalho, o registro de dados de turbidez foi feito entre 10 - 20 cm da superfície da água, com auxílio de um cano PVC apoiado em uma ponte. Esse cano servia como veículo para a passagem do turbidímetro, que descia preso a uma corda. Para amostragem de água e sedimentos foi feita coleta manual em recipientes. A relação entre turbidez e concentração alcançou um bom resultado de regressão, a partir de um modelo exponencial, em que $R^2 = 0,87$.

6.3.3. - Composição mineral

Para a composição mineral, dois conjuntos de amostras, de datas e metodologia distintas foram selecionados, mas que atingiram vazões máximas próximas (próximas a 30 m³/s). Um dos conjuntos refere-se à data de 11/03/2016 (**Figura 44**) e suas amostras foram coletadas com amostragem fixa. O outro conjunto, de 17/01/2017 (**Figura 45**), foi resultado de amostragem em função da variação da cota.

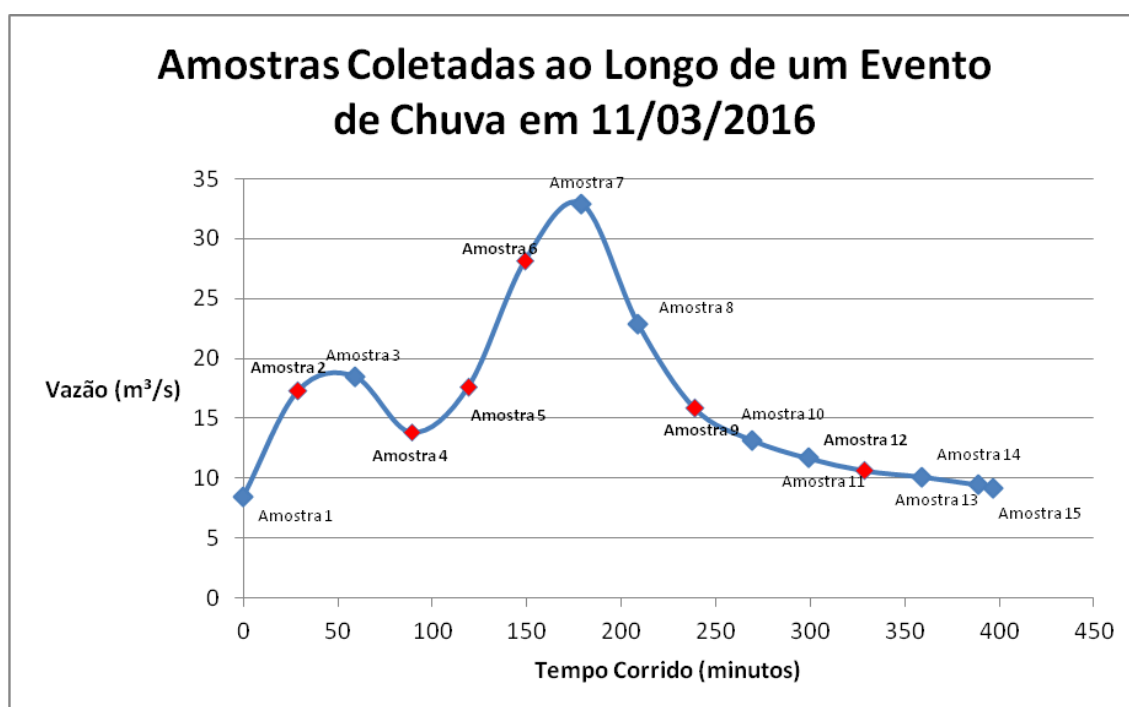


Figura 44: Gráfico mostra a representatividade das amostras escolhidas ao longo de um evento de chuva de Março de 2016 no Córrego Riacho Fundo – Brasília, Distrito Federal. Foram escolhidas aleatoriamente as amostras de número 2, 4, 5, 6, 9 e 12 para a realização do presente estudo.

A partir da Difractometria de Raios-X foi determinado a presença dos seguintes minerais (**Tabela 8** e **Tabela 9**) (Ver também difratogramas, **Figura 46 a 56, em ANEXO**): Saponita ($d \sim 14,3 \text{ \AA}$), Vermiculita ($d \sim 14 \text{ \AA}$, sendo possível sua interpretação no difratograma a partir da comparação entre as lâminas normal e adição de glicerol, além da aplicação de zoom no *software* JADE 9.0), Ilita ($d \sim 10 \text{ \AA}$), Muscovita ($d \sim 10 \text{ \AA}$), Caolinita ($d \sim 7 \text{ \AA}$), Gibbsita ($d \sim 4,8 \text{ \AA}$), Diásporo ($d \sim 4,7 \text{ \AA}$), Quartzo ($d \sim 3,3 \text{ \AA}$ e $4,2 \text{ \AA}$), Rutilo ($d \sim 3,24 \text{ \AA}$). Além disso, foi identificado Hematita ($d \sim 2,69 \text{ \AA}$). Há indício de detecção de Anatásio próximo aos picos secundários da Caolinita e também há indício de Goethita próximo a picos de Quartzo ($d \sim 4,2$).

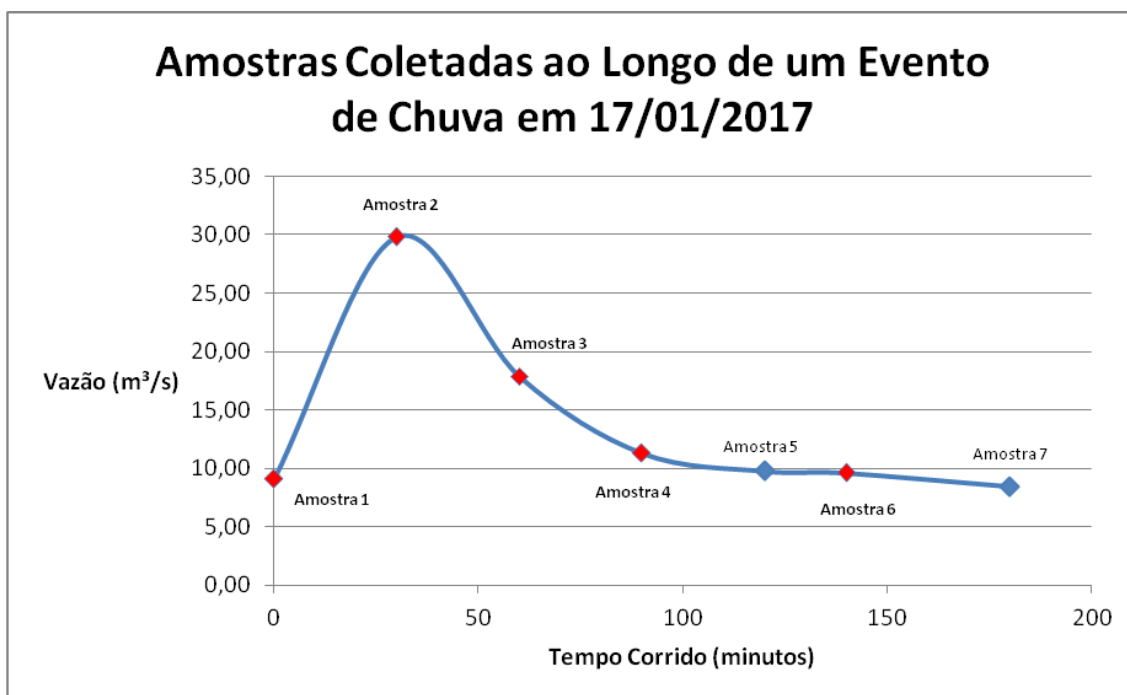


Figura 45: Gráfico mostra a representatividade das amostras escolhidas ao longo de um evento de chuva de Janeiro de 2017 no Córrego Riacho Fundo – Brasília, Distrito Federal. Foram escolhidas aleatoriamente as amostras de número 1, 2, 3, 4 e 6 para a realização do presente estudo.

O conjunto de amostras do dia 11/03/2016 e uma das amostras do dia 17/01/2017 (amostra 4) não apresentaram a ausência dos picos de intensidade da Caolinita após aquecimento. Esse fato evidencia a presença de um tipo de Caolinita bem cristalizada, com estrutura bem definida, de modo que seria necessário temperatura mais elevada para desaparecimento total dos registros de intensidade provindos da reflexão dos Raios-X nos planos cristalinos.

É possível notar, quanto ao evento do ano de 2016 (acompanhar difratogramas **em ANEXO**), que os picos de intensidade da Ilita são maiores que os da Gibbsita (em $n=1$, sendo n =ordem de difração), mas vão diminuindo progressivamente ao longo do evento enquanto os de Gibbsita aumentam. Este processo continua até que o pico desse mineral ultrapasse o da Ilita. Este fato é um indicativo de que a contribuição a partir das rochas é maior no início e menor no final do evento, tendo mais influência do solo a posteriori.

Tabela 8 – Minerais identificados com o método de amostragem fixa.

Evento 11/03/2016	Amostra 2	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 9	Amostra 12
Hematita	X	X	X	X	X	X
Ilita	X	X	X	X	X	-
Caolinita	X	X	X	X	X	X
Diásporo	-	-	-	-	-	X
Quartzo	X	X	X	X	X	X
Muscovita	-	-	-	-	-	X
Rutilo	X	X	X	X	X	X
Gibbsita	X	X	X	X	X	X
Vermiculita	-	-	-	X	X	-
Saponita	-	-	-	-	-	X

Nota: X indica presença do mineral na amostra.

- Ausência do mineral na amostra.

Tabela 9 - Minerais identificados com o método de amostragem com a cota variável e filtro flutuando na superfície da água.

Evento 17/01/2017	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 6
Hematita	X	X	X	X	X
Ilita	-	-	-	-	-
Caolinita	X	X	X	X	X
Diásporo	X	X	X	X	X
Quartzo	X	X	X	X	X
Muscovita	X	X	X	X	X
Rutilo	X	X	X	X	X
Gibbsita	X	X	X	X	X
Vermiculita	-	-	-	-	-
Saponita	-	-	-	-	X
Anatásio	X	X	X	X	-

Nota: X indica presença do mineral na amostra.

- Ausência do mineral na amostra.

A fonte da Muscovita identificada nas amostras de 17/01/2017 pode ser de detritos de construção, fato que só pode ser confirmado por análise de ardósias da sub-bacia.

Com excessão do mineral Saponita, todos os demais minerais identificados aqui já foram encontrados na região estudada, sejana própria Sub-bacia do RF ou nos sedimentos de fundo do braço do LP, que é abastecido pelo Córrego RF (MOREIRA; BOAVENTURA, 2003; MAIA et al., 2005; GIOIA et al., 2006; ECHEVERRIA, 2007; DIAS,2017). No entanto, esses trabalhos mostram que existem proporções diversas (constituente maior, menor e traço) entre os tipos de minerais encontrados, sendo a Ilita, Caolinita, Quartzo e Gibbsita os mais abundantes.

É importante dizer que dentre as pesquisas supracitadas, nem todas obtiveram exatamente os mesmos resultados. Sendo assim, o mineral Vermiculita, por exemplo, somente foi encontrado por Maia et al. (2005). A presença do Diásporo não chegou a ser confirmada em Echeverria (2007), apesar de seu indício no Córrego Guará (componente da Sub-bacia do RF), mas apareceu como resultado em Gioia et al. (2006).

De modo geral os resultados dos difratogramas foram bastante semelhantes quanto aos minerais identificados. Porém, a Saponita só foi vista em uma amostra de cada dia e o Diásporo, presente em todas as amostras do evento de 2017, indicou presença somente em uma amostra do evento do ano de 2016. Outro fato a ser considerado foi à presença de Vermiculita em somente duas amostras de 11/03/2016. Esses fatos mostram a importância do uso do amostrador automático ao longo de um evento de chuva para levantamento de minerais que ocorrem com menor frequência, em transporte fluvial, na sub-bacia.

Os minerais aqui identificados estão de acordo com a geologia e solos da região (REATTO et al. 1999; CAMPOS; FREITAS, 1998; REATTO et al. 2004; CAMPOS et al. 2013).

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Foi possível construir uma curva-chave adequada para medição de vazão em cheias. A partir disso concluiu-se que o uso da curva-chave da CAESB superestima a quantidade de sedimentos nos eventos de cheia.
- Assim, este trabalho reforça a importância de se medir vazões mais altas, para o estabelecimento de uma boa curva-chave e consequentemente resultando em cálculos mais precisos de descarga sólida. Este trabalho contribuiu com a geração de dados sedimentométricos para o reservatório do Lago Paranoá, com uma frequência de amostragem e representatividade de cotas ainda não observadas até o momento presente. O monitoramento da quantidade de sedimentos é essencial para o planejamento de vida útil de um reservatório e consequente necessidade de aplicação de políticas públicas para mitigar a erosão e transporte de sedimentos.
- Foram identificados diversos minerais com o uso do amostrador automático, com uma diversidade não encontrada em um único trabalho, de todos que já foram feitos no Córrego RF e braço do RF no lago.
- O amostrador automático revelou-se como um bom instrumento a ser utilizado em eventos de cheia. Apesar de não ter sido possível estabelecer uma curva-chave de sedimentos, mesmo com a modificação na amostragem, que passou a variar de acordo com a cota, a 40 cm de profundidade da superfície, deve-se considerar a importância que o método apresenta no monitoramento dos eventos de cheia. A importância do uso do amostrador também se soma a um cenário de disponibilidade hídrica frágil do DF, visto a importância que se tem em conhecer a variação espacial de sedimentos, devido ao assoreamento no Lago Paranoá e consequente perda de volume do reservatório. O monitoramento da quantidade de sedimento transportada pelo Córrego RF não tem sido bem sucedido por meio de outros métodos e o uso do amostrador automático acaba facilitando o acompanhamento de cheias, em um país que apresenta dificuldades em manter o monitoramento de sedimentos fluviais.
- Devido à necessidade de visitas frequentes ao local de amostragem, a rápida resposta da sub-bacia do Riacho Fundo às chuvas, necessidade de coletas frequentes, demanda de coleta em função do tempo, o uso de amostradores manuais (como os que tem sido utilizados pelas empresas responsáveis por monitoramento, a partir dos métodos consagrados) torna-se inviável. Esse fato (inviabilidade de uso de amostradores manuais) reforça a importância do uso do amostrador automático no Córrego Riacho Fundo.

- Provavelmente o uso de métodos de interpolação estatística possa diminuir a dispersão dos dados de vazão e concentração, algo que fica como recomendação para trabalhos futuros.
- Foi possível obter uma boa correlação entre turbidez e concentração, mas é necessário que os problemas de infraestrutura na estação 60478200 Montante Zoo sejam corrigidos para aumentar o número de dados e conseqüentemente a confiabilidade para cálculo de concentração a partir do monitoramento da turbidez. Ainda, devem-se adquirir informações da granulometria dos sedimentos para aplicar ao modelo de cálculo.

REFERÊNCIAS

- ADASA. **Edital de Pregão Eletrônico Nº 08/2015**. Disponível em: <http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/6Transparencia/6.1LicitacoesEmAndamento/2015/PregaoEletronico08_2015/PE08_2015_ManutencaoRede.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2017.
- _____. **Poluição difusa deu origem à mancha verde e a morte de peixes no Paranoá**. 2016. Disponível em: <<http://www.adasa.df.gov.br/587-poluicao-difusa-deu-origem-a-mancha-verde-e-a-morte-de-peixes-no-paranoa>>. Acesso em: 28 jul. 2017.
- _____. **Notícia de 15/03/2017**. Disponível em: <<http://www.adasa.df.gov.br/651-esta-disponivel-o-recurso-para-a-obra-de-captacao-de-agua-no-lago-paranoa>>. Acesso em: 07 jun. 2017.
- ALVES, V.R.E.; CAVALCANTI, C. G. B.; MATTOS, S. P. Análise comparativa de parâmetros físicos, químicos e biológicos em um período de 24 horas no Lago Paranoá, Brasília, DF, Brasil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 2, n. 1, p. 199-218, 1988.
- ANA. **Orientações para Operação de Estações Hidrométricas** / Agência Nacional de Águas (ANA), Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília: ANA, SGH, 2012. 52 p.
- AGUIAR, M. R. F. **Análise da Descarga Sólida em Suspensão na Bacia do Córrego Riacho Fundo (DF)**. 2015. Dissertação (Mestrado. Programa de Geociências Aplicadas), Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- ANNUNCIACÃO, D. L. R. et al. **Avaliação Espacial e Temporal da qualidade da água do córrego Riacho Fundo - DF através do IQA (Índice De Qualidade Da Água)**. 2011. VII Simpósio Internacional de Qualidade da Água, Porto Alegre – RS, 2011.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres, 1985.
- BEUSELINCK, L. et al. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catenav*. 32, n. 3, p. 193-208, 1998.
- BICALHO, C. C. **Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio descoberto**. 2006. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- BOITEN, W. Discharge Measurements. In: BOITEN, W. **Hydrometry**. Holanda, Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, Cap 4, 2003.
- BORTOLUZZI, E. C.; POLETO, C. Metodologias para Estudos de Sedimentos: Ênfase na proporção e na Natureza Mineralógica das Partículas. In: POLETO, C.; MERTEN, G.H. (ORG). **Qualidade dos Sedimentos: Revisado e Ampliado**. Porto Alegre: ABRH, 2013. cap. 3, p. 81-116.
- BOUYOUCUS, G. J. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, v. 54, p. 464-465, 1962.
- BROOKS, K. N.; FFOLLIOTT, P. F.; M., J. A. **Hydrology and the Management of Watersheds**. John Wiley & Sons, 2012.
- CAESB. **Medição de Velocidades em Cursos D'água através de Molinete Hidrométrico**. PO.SGH-702 – Revisão 01. 2012.

_____. Qualidades das águas do lago Paranoá. **Boletim eletrônico**. 2013a. Disponível em: <<http://www3.caesb.df.gov.br/conteudo/produtosServicos/qualidadeAgua.asp>>. Acesso em: 5 nov. 2015.

_____. **Sinopse do Monitoramento Sedimentométrico na Caesb – Ano 2013**. 2013b.

_____. **Análise Sedimentométrica pelo Método da Filtração**. Sistema de Gestão Hídrica. PO.SGH – 079. Rev.:00. 2013c.

_____. **Análise Sedimentométrica pelo Método Evaporação**. Sistema de Gestão Hídrica. PO. SGH – 090 Rev.: 00. 2014a.

_____. **Determinação de Turbidez em Água**. Sistema de Gestão Hídrica. PO. SGH – 030 Rev.: 04. 2014b.

_____. Artigo do Presidente da Caesb Maurício Luduvic publicado no Correio Braziliense em 16/01/2017. **Boletim eletrônico**. Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/component/content/article/27-portal/567-seca-2016-2017-outras-informacoes.html>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

CAILLÈRE, Simonne; HÉNIN, Stéphane. **Clay minerals. II**. Classification and nomenclature. No. Ed. 2. Masson, 1982.

CAMPOS, J.E.G.; FREITAS-SILVA, F.H. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB. **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal, parte I**, 1998. p. 86.

CAMPOS, J. E. G. et al. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. **Brazilian Journal of Geology**, 43(3), 2013. p. 461-476.

CAPOZZOLI, U. Crise Anunciada. **Scientific American Brasil**: Edição Especial Água. São Paulo, nº 63, 2015. p. 3.

CARMOUZE, Jean-Pierre. **O metabolismo dos ecossistemas aquáticos**: fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas. Edgard Blucher, 1994.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro. Brasil, Ministério de Minas e Energia. 1994. 372p.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro. Editora Interciência. 2. ed. Ampliada. 2008. 599p.

CARVALHO, N. O. et al. **Guia de práticas sedimentométricas**. Aneel, 2000a.

_____. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Aneel. 2000b.

CARVALHO, A. M. **Estudo geoquímico da qualidade da água da bacia do Riacho Fundo-DF**. Dissertação (Mestrado do Instituto de Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CARVALHO, N.O; MASSERA DA HORA, M.A.G. Hidrossedimentometria In: POLETO, C.(ORG). **Sedimentologia Fluvial**: Estudos e Técnicas, 2013.

CHEVALLIER, P. Aquisição e Processamento de Dados. In: TUCCI, C.E.M (ORG). **Hidrologia**: Ciência e Aplicação. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2012. p.500-507.

CHOAS, M. L. L. et al. Integração entre dados alfanuméricos e espaciais da universidade de Brasília com objetivo de auxiliar na Gestão Administrativa. **RBC. Revista Brasileira de Cartografia (Online)**, v. 64, 2012. p. 1-14.

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.

COLLISCHONN, W; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Porto Alegre: UFRGS. Apostila. 2008.

COSTA, Normara Yane Mar da. **Estudo geoquímico e de contaminantes emergentes na bacia do lago Paranoá**. Dissertação (Mestrado do programa de Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

D'ALKMIN TELLES, D. **Ciclo Ambiental da Água: da Chuva à Gestão**. In: D'ALKMIN TELLES, D. 2012. 504 p.

DE GIROLAMO, A. M.; PAPPAGALLO, G.; PORTO, A. Lo. Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). **Catena**, v. 128, p. 135-143. 2015.

DIAS, D. F. **Processos Geoquímicos na Interface Sedimento-Água no Braço Riacho Fundo do Lago Paranoá – DF**. Dissertação (Mestrado – Instituto de Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília – Distrito Federal. 88p. 2017.

DICK, D. P.; MARTINAZZO, R. Matéria Orgânica em Ambientes Terrestres e Aquáticos: Compartimentos, Composição e Reações. In: POLETO, C. & MERTEN, G.H. (ORG). **Qualidade dos Sedimentos: Revisado e Ampliado**. Porto Alegre: ABRH. 2013.cap. 4.

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. In: JACCON, G.; CUDO, K.J. (org). **Curva-chave: Análise e Traçado**. 1989.

ECHEVERRIA, Rosângela Martines. **Avaliação de impactos ambientais nos tributários do lago Paranoá, Brasília-DF**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2007.

EDWARDS, K.; GLYSSON, G. D. **Field methods for measurement of fluvial sediment**. US Geological Survey, Open-File Report 86-531. Reston, Virginia. USA, 1999.

FABRIS, J. D; VIANA, J. H. M.; SCHAEFER, C. E. G.R; WYPYCH, F.; STUCKI, J. W. Métodos Físicos de Análises em Mineralogia do Solo. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F (ORG). **Química e Mineralogia do Solo – Parte I – Conceitos Básicos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. cap 10. p.646-649. 2009.

FARIAS, G. C. **Autor da fotografia** com a legenda: “ Levantamento do perfil topográfico na estação 60478200 Montante Zoo, com nível óptico, pelo método de Nivelamento Geométrico por Visadas Extremas em junho de 2017”. 2017.

FERRANTE, J.E.T; RANCAN, L.; NETTO, P.B. Meio Físico. In: FONSECA, F.O (ORG). **Olhares sobre o Lago Paranoá**. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Brasília, cap. 4, 2001.

FRANZ, C. et. al. Assessment and evaluation of metal contents in sediment and water samples within an urban watershed: an analysis of anthropogenic impacts on sediment and water quality in Central Brazil. **Environ Earth Sci**, v.72, p.4873–4890. 2014.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. **Diretrizes para projetos físicos de unidades de controle de zoonoses e fatores biológicos de risco**. Brasília: Funasa, 44 p. 2003.

GAMA, I. **Perfil Ambiental dos Recursos Hídricos no Centro-Oeste expandido**. In: XIII Encontro Nacional de Estudos Populacionais. Ouro Preto, 2002

GAO, P. Understanding watershed suspended sediment transport. **Progress in Physical Geography**, v. 32, n. 3, p. 243-263. 2008.

GAO, P.; JOSEFSON, M. Temporal variations of suspended sediment transport in Oneida Creek watershed, central New York. **Journal of Hydrology**, v. 426, p. 17-27. 2012.

GETTEL, M., GULLIVER, J. S., KAYHANIAN, M., DeGROOT, G., BRAND, J., MOHSENI, O., & ERICKSON, A. J. Improving suspended sediment measurements by automatic samplers. **Journal of Environmental Monitoring**, 13(10), 2703-2709. 2011.

GIOIA, S.M.C.L. et al. Sources of anthropogenic lead in sediments from an artificial lake in Brasília—central Brazil. **Science of the Total Environment**, **356**, 125–142. 2006.

GONÇALVES, T.D.; ROIG, H.L.; CAMPOS, J.E. G. Sistema de informação geográfica como ferramenta de apoio à outorga dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 169-180. 2009.

GUIMARÃES, R. F. et al. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1, p. 99-108, 2003.

GUIMARÃES, M. **Estudo dos processos de hidrossedimentometria do exutório do riacho fundo no Lago Paranoá, DF**. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental) Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2011, 91p.

HOROWITZ, A. J. **A primer on sediment-trace element chemistry**. 2ed. Chelsea, EUA: Lewis Publishers. 136p, 1991.

_____. Estimating suspended sediment and trace element fluxes in large river basin: methodological considerations as applied to the NASQAN programme. **Hydrological Processes**. 15, p. 1107 – 1132, 2001.

_____. Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element and nutrient fluxes. **Science of the Total Environment**, v. 400, n. 1, p. 315-343, 2008.

JULIEN, P.Y. Erosion and Sedimentation. In: JULIEN, P.Y. (ORG). **Cambridge University Press**. 280p, 1998.

LEFRANÇOIS, J. et al. Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. **Hydrological processes**, 21(21), 2923-2933. 2007.

LEWIS, J.; EADS, R. Turbidity-controlled suspended sediment sampling. **Watershed Management Council Networker**, v. 6, n. 4, 1996.

LOPES, G. R., TÁVORA, B. E., SANTOS, R. D., & KOIDE, S.. **Estudo sobre correlação entre turbidez e sólidos em suspensão para estimativa da vazão sólida em uma pequena bacia**.XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2009

LÓPEZ-TARAZÓN, J. A. et al. Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: the River Isábena (Southern Pyrenees). **Geomorphology**, 109(3), 210-221. 2009.

MAIA, P. D. et al. Estudo mineralógico dos sedimentos de fundo do Lago Paranoá, Distrito Federal. **Brazilian Journal of Geology**, 35(4), 535-541, 2005.

MAIA, P. D.; BOAVENTURA, G. R.; PIRES, A. C. B. Distribuição Espacial de Elementos-Traço em Sedimentos do Lago Paranoá- DF, Brasil. **Geochimica brasiliensis**, v. 20, n. 2, 2006.

MANTOURA, R.F.C; MARTIN, J.M.; WOLLAST, R.; **Ocean margin processes in global change**. Mantoura, R.F.C. Martin, J.-M.; Wollast, R. (eds). Chichester: John Wiley and Sons, 1991, 469p.

MEDEIROS, Paulo Ricardo Petter et al. Aporte de sedimentos em suspensão no baixo Rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 15, n. 1, p. 42-53, 2011.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: **National conference on clays and clays minerals**. 1958. p. 317-327.

MENEZES, Paulo Henrique Bretanha Junker. **Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do Lago Paranoá**. 2010. ix, 123 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

MINELLA, J. P.G; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, 2011.

MINELLA, J. P.G. et al. **Efeito histerese na produção de sedimentos em bacia sob intenso processo erosivo**. Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. In: LIMA, J.E.F.W. e LOPES, W.T.A. Ed. ABRH. Brasília. Cap.2. 2011.

MOREIRA, R. C. A., **Referência Geoquímica regional para a Interpretação das Concentrações de Elementos Químicos em Sedimentos na Bacia do Lago Paranoá – DF**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geologia, Departamento de Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2002. 112p.

MOREIRA, Ricardo Cosme Arraes; BOAVENTURA, Geraldo Resende. Referência geoquímica regional para a interpretação das concentrações de elementos químicos nos sedimentos da bacia do Lago Paranoá–DF. **Química Nova**, v. 26, n. 6, p. 812-820, 2003

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use**. McGraw Hill Professional. 1997

MUELLER, D.S.; WAGNER, C.R. Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat: U.S. **Geological Survey Techniques and Methods** 3A–22, 72 p., 2009. Disponível em: <<http://pubs.water.usgs.gov/tm3a22>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

NDOMBA, P. M.; MTALO, F. W.; KILLINGTVEIT, Å. Developing an excellent sediment rating curve from one hydrological year sampling programme data: approach. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 2, n. 1, 2008.

OLIVEIRA, E. N. **Impacto de Barragens Sobre a Dispersão de Matéria e a Sustentabilidade da Pluma Costeira do Rio São Francisco (AL/SE). Análise Espacial e Temporal por Sensoriamento Remoto**. Dissertação (Pós-Graduação em Geociências)- Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2009.

OLIVETTI, D.: Depoimento[abril 2017 data aproximada]. Brasília: Unb, 2017.

PIMENTA, J. L. F. Comparação dos processos de medição de descarga líquida. **A Água em Revista**, Belo Horizonte, ano 4, n. 7, p.58-62, maio 1996.

POLETO, Cristiano; MERTEN, Gustavo Henrique. **Qualidade dos Sedimentos: Revisado e Ampliado**. Porto Alegre: ABRH, 2013. 397 p.

REATTO, A. et al. **Variabilidade mineralógica de latossolos na Bacia do Rio Jardim, DF**. Brasília: Embrapa Cerrados, 1999.

REATTO, A. et al. **Mapa pedológico digital: SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese de texto explicativo**. Planaltina-DF: Embrapa-CPAC 31p. (documentos/Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; n. 120), 2004.

REN, M. E., & SHI, Y. L. Sediment discharge of the Yellow River (China) and its effect on the sedimentation of the Bohai and the Yellow Sea. **Continental Shelf Research**, 6(6), 785-810. 1986

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. 2005. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado, IG/UnB-Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil.

ROIG, H.L. et. al. Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte de sedimentos no Lago Paranoá. **Anais. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

ROVIRA, A; BATALLA, R. J. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN). **Geomorphology**, v. 79, n. 1, p. 58-71, 2006.

SANTOS et al. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 372p, 2001.

SHEN, H. W.; JULIEN, P. Y. Erosion and Sediment Transport. In: MAIDMENT, D.R. (ORG). **Handbook of Hydrology**. Cap. 12. 1992.

SOUZA, E. **Autor da fotografia** com a legenda: Instalação e melhoramento da infraestrutura: tubos PVC para passagem de fios ligados ao painel solar na foto A e instalação da bateria ligada ao painel solar na foto B. Fotos C e D instalação de infraestrutura para flutuação filtro do amostrador automático ISCO 6712 (C) e da sonda multiparamétrica Hydrolab DS5X (D). 2017 a.

SOUZA, E. **Autor da fotografia** com a legenda: Foto do ano 2017 mostrando erosão na margem esquerda (retângulo vermelho), próxima à Estação Fluviométrica Riacho Fundo Montante Zoológico EPIA 003, Código ANA 60478200..Foto tirada de cima de ponte, localizada a montante da estação, na rodovia DF-003 (Estrada Parque Indústria e Abastecimento – EPIA). 2017 b.

SOUZA, E. **Autor da fotografia** com a legenda: Medição de descarga líquida com uso do M9 River Surveyor®, da Sontek, no Córrego Riacho Fundo, Estação fluviométrica 60478200 (Código ANA) Montante Zoológico. 2017 c.

SOUZA, I. C. D. **Aspectos da morfometria de drenagem e produção de sedimentos em relação a variante chuva x vazão de diferentes trechos da Bacia do Ribeirão do Gama—Distrito Federal nos anos de 2014 a 2015**. Brasília, 2015.

STOTT, T. Impacts of constructing a rural cycle way on suspended sediment transport processes. **Catena**, [S.l.], v.68, p.16-24, 2006.

TE CHOW, V. **Applied hydrology**. Tata McGraw-Hill Education, 1988.

VANONI, V.A. Sedimentation Engineering. **ASCE Manual and reports on Engineering Practice**, NY. 1977.

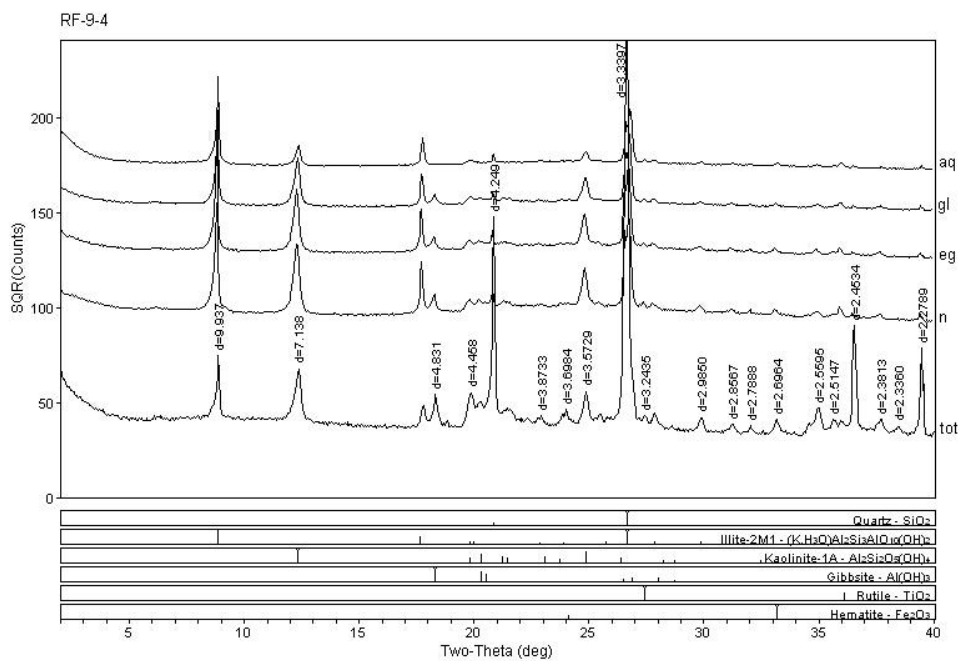
VEIGA, L.A.K; ZANETTI, M.A.Z; FAGGION, P.L. **Fundamentos de Topografia**. Engenharia Cartográfica e de Agrimensura. Universidade Federal do Paraná, 2012.

WILLIAMNS, G.P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in Rivers. **Journal of Hydrology**, v.11, n.1-4, p.89-106, 1989.

XU, J. Implication of relationships among suspended sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: the Yellow River basin, China. **Catena**, v. 49, n. 4, p. 289-307, 2002.

ZIEGLER, A. D. et al. Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: Hysteresis, variability, and uncertainty. **Journal of hydrology**, 519, 2020-2039. 2014.

ANEXOS: Difratomogramas de identificação dos minerais presentes nos eventos analisados dos dias 11/03/2016 e 17/01/2017.



Campus Univ Darcy Ribeiro

[RAIO-X]IG Wednesday, May 24, 2017 03:25p (MDI/JADEB)

Figura 46: Difrátograma mostrando os resultados relativos à amostra 2, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Ilita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Rutilo, e Hematita. Possível detecção de Anatásio (próximo ao pico n=2 da Caolinita) e Goethita (d~4,15-4,19).

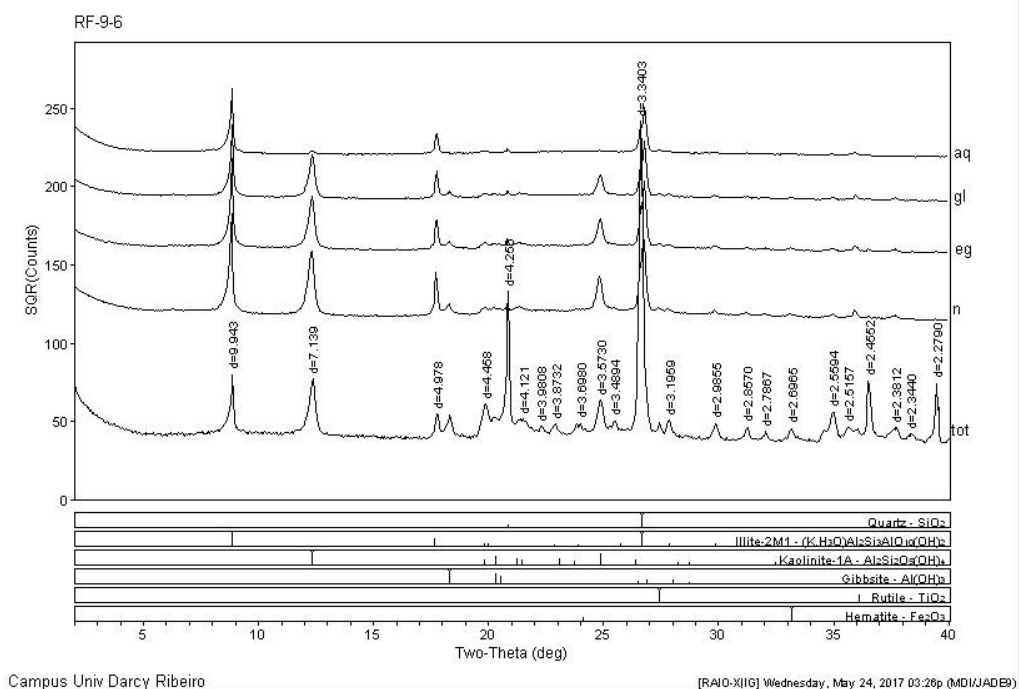


Figura 47: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 4, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Ilita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Hematita e Rutilo. Possível detecção de Anatásio (próximo ao pico n=2 da Caolinita) e Goethita (d~4,15-4,19).

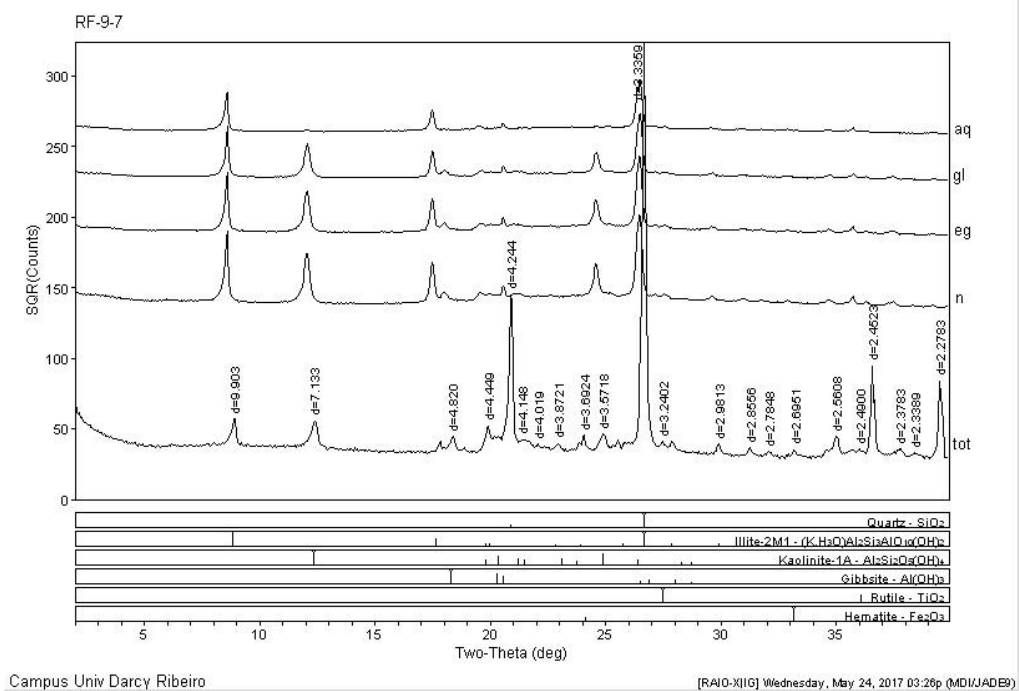


Figura 48: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 5, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Ilita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Hematita e Rutilo. Possível detecção de Anatásio (próximo ao pico n=2 da Caolinita) e Goethita (d~4,15-4,19).

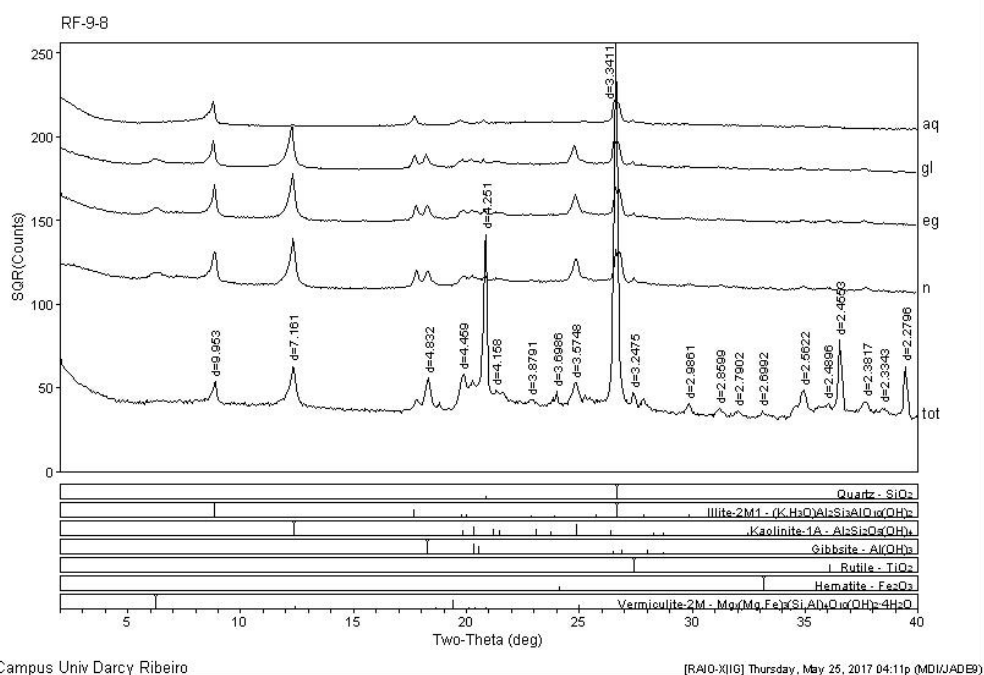


Figura 49: Difratograma mostrando os resultados relativos à amostra 6, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Vermiculita, Ilita , Caolinita , Gibbsita , Quartzo , Rutilo ($d=3,2475 \text{ \AA}$), Hematita. Possível detecção de Anatásio (próximo ao pico n=2 da Caolinita) e Goethita ($d\sim 4,15-4,19$).

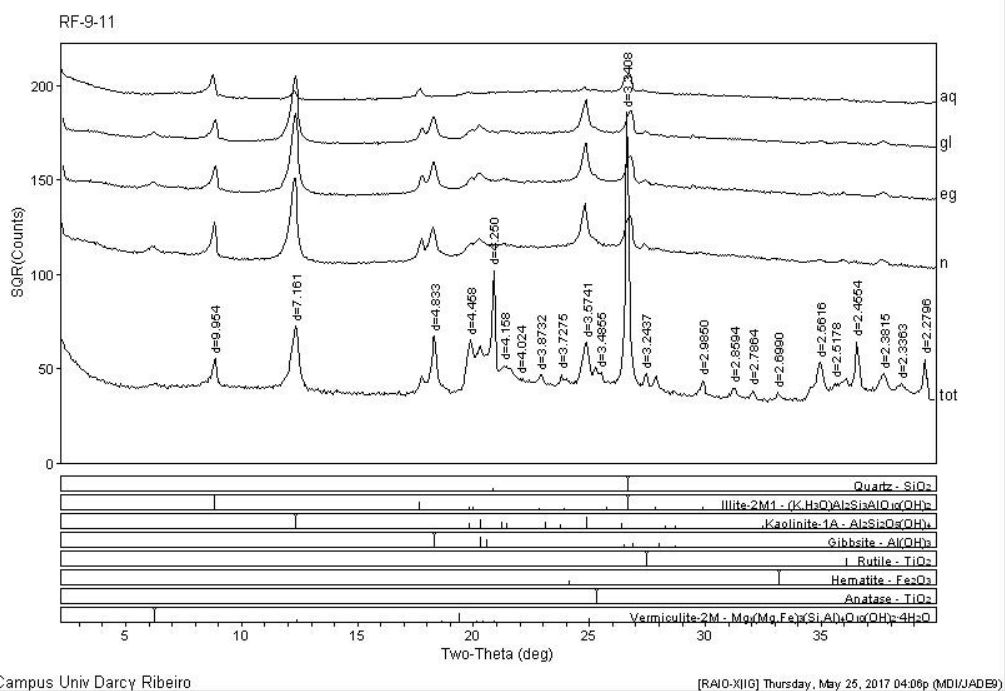


Figura 50: Difratograma mostrando os resultados relativos à amostra 9, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Vermiculita, Ilita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Rutilo e Anatásio. Possível detecção de Goethita ($d\sim 4,15-4,19$).

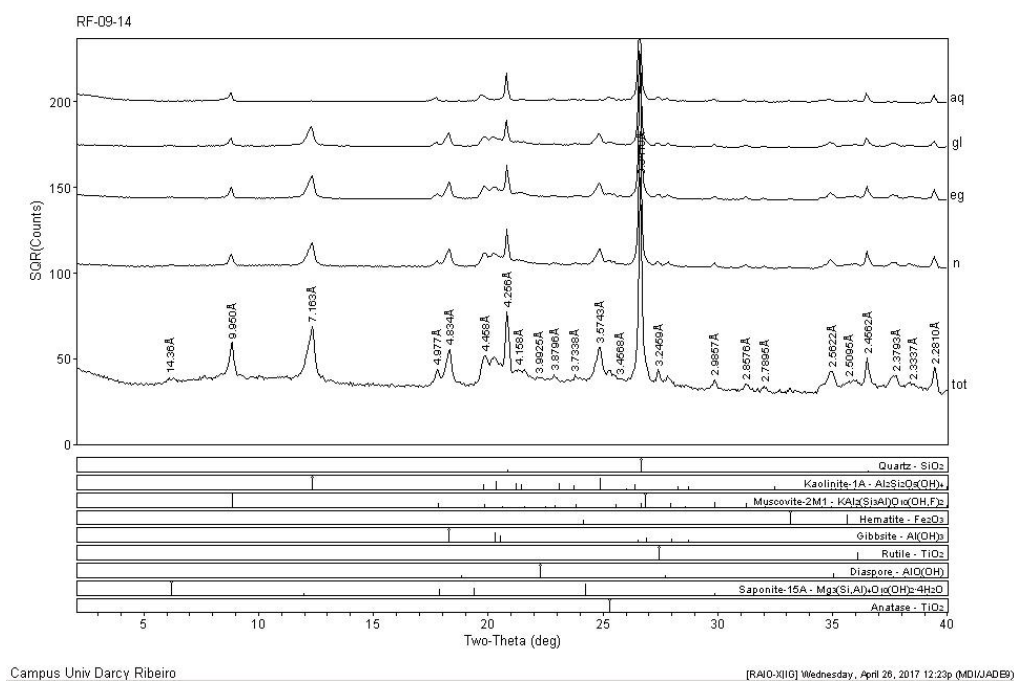


Figura 51: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 12, da data 11/03/2016, no qual foram identificados os minerais Saponita , Muscovita , Hematita , Caolinita , Gibbsita , Quartzo , Diásporo, Rutilo e Anatásio. Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).

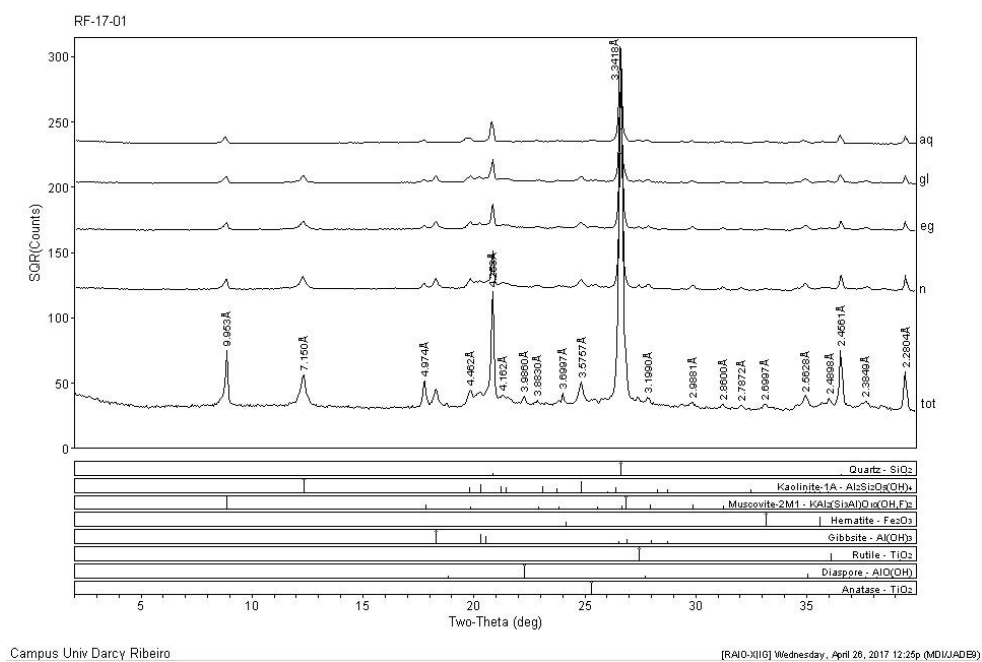
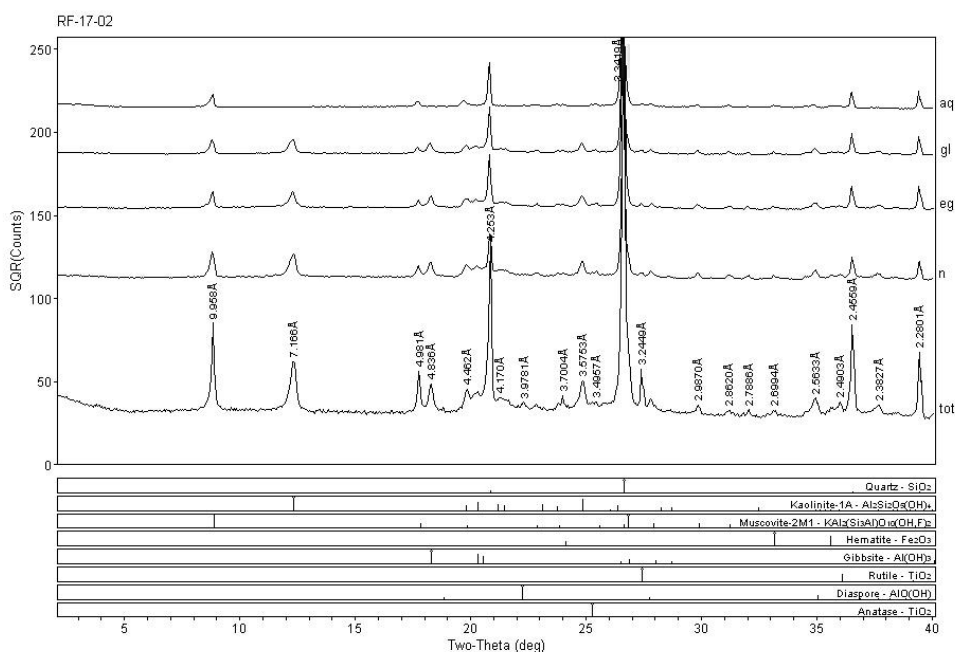


Figura 52: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 1, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Muscovita , Hematita , Caolinita , Gibbsita , Quartzo , Diásporo, Rutilo e Anatásio. Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).

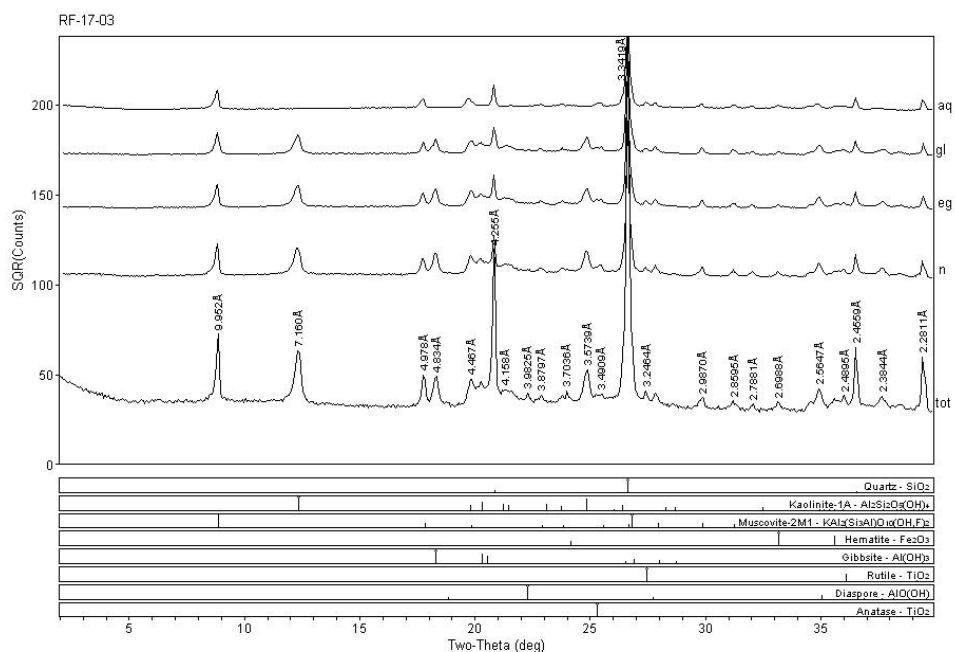


Campus Univ Darcy Ribeiro

[RAIO-X]IG Wednesday, April 26, 2017 12:28p (MDI/UADEB)

Figura 53: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 2, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo, Rutilo e Anatásio.

Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).

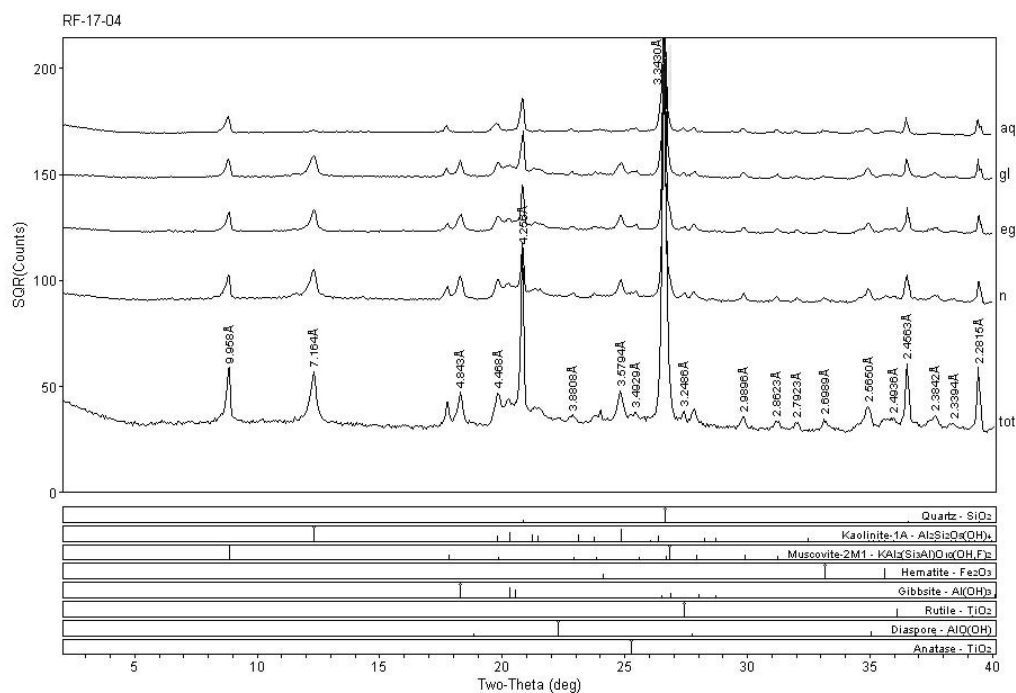


Campus Univ Darcy Ribeiro

[RAIO-X]IG Wednesday, April 26, 2017 12:30p (MDI/UADEB)

Figura 54: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 3, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo, Rutilo e Anatásio.

Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).

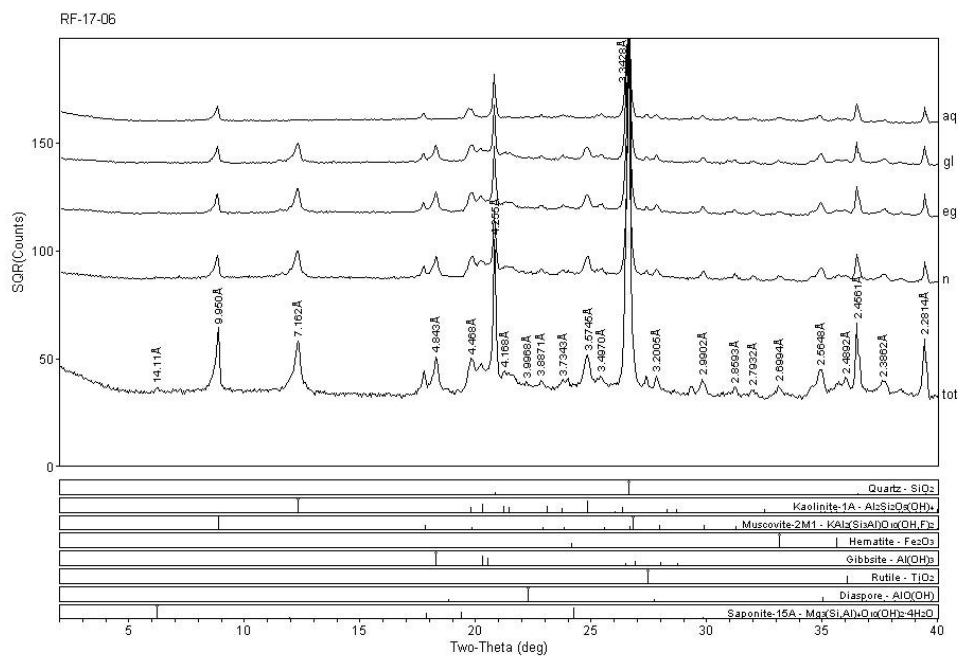


Campus Univ Darcy Ribeiro

[RAIO:XII]G Wednesday, April 26, 2017 12:32p (MDI/JADEB)

Figura 55: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 4, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo, Rutilo e Anatásio.

Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).



Campus Univ Darcy Ribeiro

[RAIO:XII]G Wednesday, April 26, 2017 12:34p (MDI/JADEB)

Figura 56: Difratoograma mostrando os resultados relativos à amostra 6, da data 17/01/2017, no qual foram identificados os minerais Saponita, Muscovita, Hematita, Caolinita, Gibbsita, Quartzo, Diásporo e Rutilo.

Possibilidade não confirmada de detecção de Goethita (d~4,15-4,19).