

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE MESTRADO

**RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS E  
TURBIDEZ DA ÁGUA MEDIDA COM SENSOR DE  
RETROESPALHAMENTO ÓPTICO**

**DENIZE SAMPAIO CHAGAS**

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA

ABRIL - 2015



# **RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS E TURBIDEZ DA ÁGUA MEDIDA COM SENSOR DE RETROESPALHAMENTO ÓPTICO**

**DENIZE SAMPAIO CHAGAS**

Engenheira Agrônoma

Universidade do Estadual do Sudoeste da Bahia, 2013

Dissertação submetida ao Colegiado de Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração (Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

**Orientador: Prof. Dr. AUREO SILVA DE OLIVEIRA**

**Coorientador: Prof. Dr. HANS RAJ GHEYI**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA – 2015

## FICHA CATALOGRÁFICA

Chagas, Denize Sampaio

C426r      Relação entre concentração de sólidos suspensos e turbidez da água medida com sensor de retroespalhamento óptico / Denize Sampaio Chagas. – 2015

78f.

Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2015.

1. Qualidade da água. 2. Turbidímetro. 3. Nefelometria. 4. Turbidez da água. I. Oliveira, Aureo Silva de. II. Título.

CDU 556

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**COMISSÃO EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DA DISCENTE  
DENIZE SAMPAIO CHAGAS**

---

Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira  
Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas - UFRB  
Orientador

---

Prof. Dr. Thomas Vincent Gloaguen  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - UFRB  
Membro Externo

---

Prof. Dr. Tales Miler Soares  
Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas - UFRB  
Membro

Dissertação homologada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em ..... de .....de .....

Conferindo o Grau de Mestre em Engenharia Agrícola em.....

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais e irmão Rivanei Chagas Moreira, Angelita Sampaio Chagas e Alex Sampaio Chagas pela preocupação e dedicação que marcam a união de uma família, meu alicerce.

À tia Elizangela pelo companheirismo, amizade e incentivo repassados através da sabedoria de quem conhece os caminhos da verdade.

Aos meus amigos pelo companheirismo, amizade e incentivo e por muitas vezes me fizeram acreditar quando as dificuldades me faziam fraquejar.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela existência, fonte de toda sabedoria e pelos caminhos traçados que me fizeram evoluir como pessoa;

Aos meus pais, razão da minha existência e fonte de inspiração;

À toda a minha família: irmão, cunhada, avós, tias, tios e primos “alguns em especial” pelo apoio e dedicação;

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por proporcionar a oportunidade de aperfeiçoar meus conhecimentos teóricos;

À Empresa DANCO, por viabilizar a coleta do material utilizado no estudo;

Ao Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira, pelos conselhos, pela amizade, orientação e paciência, atributos que nortearam sua participação efetiva em todas etapas deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Hans Raj Gheyi, pela paciência, atenção e orientação, seus ensinamentos foram fundamentais para conclusão deste trabalho;

À Eng. Tatyana Keyty de Souza Borges, colega e amiga que me ensinou durante nossa convivência a importância da amizade, pelo apoio na coleta de dados e escrita do trabalho;

Ao Prof. Dr. Francisco Adriano Pereira, pelo apoio e ensinamentos durante o período de ingresso e parte do curso;

Ao Prof. Dr. Tales Miles Soares, pelo apoio e ensinamentos durante o período de transição de projeto e parte do curso;

Aos colegas de curso Mariana, Lenilson, Emerson, Diego, Nilson e João Paulo, Karla, Lucília, Neilon, Mairton, Nara, Adailton pela amizade e companheirismo, somente com e por vocês foi possível chegar ao fim dessa jornada, nos tornamos verdadeiros mosqueteiros e descobrimos cada vez mais o valor das amizades;

A minha colega de curso Marina A. Costa Lima, pela convivência fraterna, amizade;

Às amigas Leandra e Jaminny, pelo apoio, amizade e momentos de descontração (resenhas);

Aos funcionários da estação experimental, Joicilene (Lene), Edilson (Boi), Celina e Mairy pela amizade, apoio e ajuda indispensável;

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Sinceramente,  
**MUITO OBRIGADO!**

*“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano de verdade continua misterioso diante de meus olhos”.*

*(Isaac Newton)*

## SUMÁRIO

**RESUMO**

**ABSTRACT**

**INTRODUÇÃO** .....10

**DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS NA ÁGUA A PARTIR DA TURBIDEZ MEDIDA COM SENSOR DE RETROESPALHAMENTO ÓPTICO**  
.....16

**INFLUÊNCIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO NA TURBIDEZ DA ÁGUA**  
.....38

**CONSIDERAÇÕES FINAIS**.....71

## **RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS E TURBIDEZ DA ÁGUA MEDIDA COM SENSOR DE RETROESPALHAMENTO ÓPTICO**

Autor: Denize Sampaio Chagas  
Orientador: Aureo Silva de Oliveira  
Coorientador: Hans Raj Gheyi

### **RESUMO**

A turbidez é um parâmetro de qualidade da água que corresponde à redução da transparência do meio líquido, ela é promovida pelo material em suspensão, dificultando assim a passagem dos raios solares pela água. O tamanho das partículas pode interferir diretamente na turbidez, pois, partículas menores permanecem em suspensão enquanto que as maiores tendem a decantar gradativamente. Por impedir a passagem dos raios solares, águas com elevada turvação favorecem a demanda evaporativa. Além disso, a turbidez também pode interferir no ambiente aquático. Deste modo estudos que favoreçam a mensuração da mesma são de fundamental importância. Turbidímetros nefelométricos medem a turbidez com base no retroespalhamento da luz. Entretanto, o fabricante desses instrumentos recomenda uma calibração com amostras de sedimentos oriundas do local a ser estudado, para minimizar possíveis erros, e possibilitando assim, correlacionar a turbidez medida com a concentração de sólidos suspensos (CSS). Porém, a dificuldade em fazer com que o material seja mantido em suspensão é um entrave na calibração desses instrumentos. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou calibrar dois turbidímetros de retroespalhamento óptico, com auxílio de agitador eletromecânico projetado e construído com essa finalidade. Além disso verificou-se a influência das diferentes frações granulométricas (areia, silte e argila) nas taxas de turbidez. Obteve-se nesses estudos, modelos matemáticos com elevado coeficiente de determinação, além disso observou-se que os turbidímetros de retroespalhamento óptico apresentam respostas mais rápidas para as partículas de menor diâmetro.

**Palavras-chave:** turbidímetro, qualidade da água, nefelometria.

# **RELATIONSHIP BETWEEN THE CONCENTRATION OF SUSPENDED SOLIDS AND WATER TURBIDITY MEASURED WITH AN OPTICAL BACKSCATTER SENSOR**

Author: Denize Sampaio Chagas

Advisor: Aureo Silva de Oliveira

Co-advisor: Hans Raj Gheyi

## **ABSTRACT**

Turbidity is a measure of water quality corresponding to the reduction in the transparency of the liquid medium, it is promoted by the suspended material, thus obstructing the passage of sunlight by water. The particle size may directly interfere with turbidity therefore smaller particles remain in suspension while larger tend to gradually settle. For prevent the passage of sunlight, water with high turbidity favor evaporative demand. Furthermore, the turbidity can also interfere in the aquatic environment. Thus studies that support the measurement of same are of fundamental importance. Turbidity measuring nephelometric turbidity based on the backscattering of light. However, the manufacturer recommends a calibration of these instruments with sediment samples from the site to be studied to minimize possible errors, and thus enabling correlate turbidity measured with the concentration of suspended solids (CSS). However, the difficulty in getting the material is kept in suspension is an obstacle in the calibration of these instruments. In this context, this study aimed to calibrate two turbidity of optical backscatter, with the aid of electromechanical shaker designed and built for this purpose. Furthermore it verified the influence of the different size fractions (sand, silt and clay) in turbidity rates. Obtained these studies, mathematical models with a high coefficient of determination, furthermore observed that the present optical backscatter turbidity faster response for the particles of smaller diameter.

**Key-words:** turbidity, water quality, nephelometry

## INTRODUÇÃO

Dentre os recursos naturais, a água é o mais importante em todos os aspectos, considerada limitante para existência e desenvolvimento de vida no planeta terra, seu excesso causa inundações e calamidades ambientais e sua escassez provoca fome e miséria (Paz et al., 2000). O ciclo hidrológico está diretamente associado ao comportamento natural da água, no que diz respeito a sua ocorrência, transformações e relações com o ambiente (Lorenzon, 2011). Nesse contexto, torna-se essencial o monitoramento hidrológico e climático para avaliação do comportamento de cada variável deste ciclo.

As características da água variam de acordo com o seu local de origem bem como das interações homem-ambiente. As avaliações dessas características servem para mensurar os índices de qualidade da água, que podem ser de ordem física, química e biológica, e sua quantificação serve para avaliar as características desejáveis na água, em função dos usos preponderantes estabelecidos por normas definidas pela sociedade (Fay & Silva, 2006).

Fay & Silva, (2006), relatam ainda que, no que diz respeito a tais parâmetros, destacam-se os de ordem física, que compreendem: cor, sabor, odor, turbidez, temperatura, sólidos totais dissolvidos e dureza. Aos de natureza química ênfase para: pH (acidez e alcalinidade), metais (ferro e manganês), cloretos, nitrogênio (nutriente), fósforo (nutriente), oxigênio dissolvido, matéria orgânica, micropoluentes orgânicos e inorgânicos como metais pesados.

Assim, destaque para a turbidez, que corresponde à redução da transparência da água, sendo, promovida pelo material em suspensão. O material em suspensão provoca a reflexão da radiação, dificultando a passagem dos raios solares pela água (Tomazoni et al., 2005). O autor supracitado, ressalta ainda que, a quantificação de luz refletida pelas partículas suspensas possibilita a estimativa da quantidade dos sólidos suspensos na água.

A turbidez pode provocar desordem no ambiente aquático, devido a diminuição da penetração dos raios solares na água, provocando assim, alterações no sistema, proporcionando mudanças nas taxas fotossintéticas de macrófitas e algas sub-superficiais, além de favorecer a proliferação de cianobactérias produtoras de toxinas e reduzir a quantidade de oxigênio dissolvido, provocando assim a morte dos peixes (Fay & Silva, 2006). Além disso, a turbidez também pode estar associada a problemas como assoreamento de barragens e reservatórios, arraste de nutrientes e contaminantes, e degradação de ambientes aquáticos, pois estes estão associados ao transporte de sedimentos (Carreras, 2010).

As principais fontes geradoras de turbidez são as argilas, areias, matéria orgânica, material mineral, detritos e plânctons (Fay & Silva, 2006). A sedimentação proveniente do processo

erosivo e produtos agregados são carregados para os cursos d'água através do escoamento superficial, influenciado pelas condições locais e pela granulometria dos sedimentos (Silva Junior et al., 2012).

Segundo Tomazoni et al. (2005), os sedimentos fragmentados que se encontram em suspensão permanecem em constante mobilidade devida turbulência, as correntes convectivas da água e a repulsão provocada pelas cargas elétricas existentes na superfície das partículas, este processo proporciona o equilíbrio dinâmico entre as partículas, sendo que, as menores permanecem em suspensão e as maiores tendem a sedimentar gradativamente.

Além disso a turbidez pode aumentar a demanda evaporativa, pois, como Oliveira et al. (2012) revelam, em grandes porções de água relativamente clara, há possibilidade de penetração da radiação solar na água, então, a massa hídrica armazena quantidades expressivas de energia, porém, quando há redução da transparência da água (turbidez) devido à absorção e espalhamento da luz por matéria em suspensão, altera a capacidade de armazenamento, devido a elevação da taxa evaporativa.

A água sem constituintes suspensos ou dissolvidos, possui uma baixa refletância mesmo na região do visível (Bias et al., 2013). Fay & Silva (2006) destacam que a técnica mais apropriada para mensuração da turbidez é a nefelometria, em que os valores são expressos em unidades nefelométricas de turbidez (NTU), a partir dessa metodologia é possível a verificação da quantidade de material sólido suspenso, a partir da luz dispersa.

Os aparelhos utilizados para medição de turbidez são os turbidímetros, eles medem tal parâmetro, a partir do comparativo do espalhamento de um feixe de luz ao passar pela amostra, com o espalhamento de um feixe de igual intensidade ao passar por uma suspensão padrão (Silva Juniores et al., 2012).

Pinheiro et al. (2013) afirmam que, de maneira geral não existe uma metodologia ideal para a mensuração da concentração de sólidos suspensos (CSS), porém há métodos que estimam a CSS indiretamente através da turbidez, estes ganharam aceitação dentre os vários métodos de monitoramento, por causa, principalmente, das dificuldades de se obter medidas diretas em um rápido espaço de tempo. As determinações obtidas com turbidímetros são feitas de modo mais fácil, melhoram a resolução das leituras e ainda podem ser aplicadas com poucas dificuldades, em seções sedimentológicas.

Os sensores ópticos de retroespalhamento possibilitam a obtenção de um registro contínuo de perda de solo, quando a CSS é bem relacionada com turbidez (Dabney et al., 2006). A tecnologia aplicada neste tipo de turbidímetro apresenta bons resultados em amostras de água

com altas taxas de turbidez, sendo capazes de detectar rápidas flutuações temporais da CSS, assim, a utilização desse tipo sensor de turbidez, tornaram-se ferramentas importantes e amplamente utilizadas para a determinação da CSS (Butt et al., 2002; Sutherland et al., 2000).

O princípio de funcionamento desses turbidímetros se baseia na iluminação da amostra de água, através da fonte de radiação existente no equipamento, fazendo com que o fotodetector convirja a luz irradiada para fotocorrente, assim, a radiação dispersa que retorna para o detector provoca uma correlação entre o nível de turbidez (NTU) e a voltagem medida (Campbell Scientific, 2012; Sea-Bird Electronics, 2010).

Os turbidímetros de retroespalhamento óptico vêm de fábrica previamente calibrados em substância química, para determinação da CSS, sem necessidade de novas calibrações, com formazina ou com estireno divinilbenzeno (SVDB), para o seu uso. Esses sensores de turbidez apresentam uma excelente resolução espacial, mesmo em ambientes turbulentos, no entanto, para a proporcionalidade entre a relação de saída do sensor e a CSS a ser medida, deve ser feita uma calibração com amostra de sedimentos do local a ser estudado (Sutherland et al., 2000; Butt et al., 2002).

De acordo com a Campbell Scientific (2012), há três métodos de calibração dos sensores de retroespalhamento óptico, utilizando sedimentos: (a) realizado no local de estudo (*in situ*), é o mais indicado, pois os dados obtidos são mais fidedignos, no entanto é o mais caro e demorado (b) com amostras de água e sedimentos coletadas na localidade a ser avaliada (*wet-sediment*), porém necessita de uma atenção maior quanto ao armazenamento da amostra, devendo ser mantida a uma temperatura de 4 °C, para evitar possíveis alterações bioquímicas na amostra, e (c) com sedimento seco e tratado oriundo do local a ser estudado (*dry-sediment*), método este que, pode provocar alterações na resposta do sensor, devido as alterações no tamanho das partículas, no entanto, é o método mais fácil de ser feito, uma vez que, a quantidade de sedimentos e o volume de água podem ser determinados com precisão. Os dois últimos métodos são realizados em laboratório.

A calibração dos turbidímetros é muito importante para a estimativa da CSS, pois possibilita minimizar possíveis erros embutidos. Contudo, a validade da calibração depende da compreensão do pesquisador, do ambiente que vai trabalhar, bem como das limitações do instrumento a ser utilizado (Conner & Visser, 1992; Navratil et al., 2011). Além disso, a tensão de saída desses instrumentos ópticos depende de outros parâmetros além da CSS, tais quais, design óptico, tamanho de partículas, forma e índice de refração e condições ambientais, podendo estes afetar a resposta do sensor (Conner & Visser, 1992; Sutherland et al., 2000).

Tendo em vista que a turbidez da água tende a aumentar com o aumento da concentração de sólidos suspensos, e que os turbidímetros de retroespalhamento óptico podem apresentar diferentes respostas para frações sedimentológicas de tamanho variado, o presente trabalho objetivou a calibração de dois turbidímetros de retroespalhamento óptico novos, para obtenção de um método em que possa estimar a concentração de sólidos suspensos através da turbidez, além de verificar a dinâmica sedimentológica das frações minerais (areia, silte e argila), e sua influência sobre a turbidez. O método de calibração utilizado foi o método do sedimento seco, para realização dos testes utilizou-se um agitador eletromecânico projetado e construído com essa finalidade.

### LITERATURA CITADA

BIAS, E. S.; BARBOSA, F. L. R.; BRITES, R. S. Emprego de imageamento passivo na análise da variabilidade espacial da turbidez no espelho d'água do Lago Paranoá, Distrito Federal. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Brasília, v. 18, n. 1, p. 55-64, jan./mar. 2013.

BUTT, T.; MILES, J.; GANDERTON, P.; RUSSELL, P. A simple method for calibrating optical backscatter sensors in high concentrations of non-cohesive sediments. **Marine Geology**, Reino Unido, v.192, p.419-424, jun./set. 2002.

CAMPBELL SCIENTIFIC. OBS-3+ and OBS300 suspended solids and turbidity monitors Operator's manual. <<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/obs-3+.pdf>>. 10 Fev. 2015.

CARRERAS, N. M. et al. The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Attert River catchment (Luxembourg). **Journal of Hydrology**, Luxembourg, v. 382, p. 49-63, 2010.

CONNER, C.S. AND DE VISSER, A.M. A laboratory investigation of particle size effects on an optical backscatterance sensor. **Marine Geology**, Amsterdam, v.108, p.151-159, fev./mai. 1992.

DABNEY, S. M.; LOCKE, M. A.; STEINRIEDE, R. W. **Turbidity sensors track sediment concentrations in runoff from agricultural fields.**In: Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC). Proceedings... Reno: JFIC, 2006. p. 345-352.

FAY, E. F.; SILVA, C. M. M. S. **Índice de uso sustentável da água (ISA – Água) na região do sub - médio São Francisco.** 1. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.p. 157.

LORENZON, A. S. **Processos hidrológicos em um fragmento de floresta estacional semidecidual no município de Viçosa, MG.** 2011. 71 f.Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa-MG.

NAVRATIL, O. et al. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. **Journal of Hydrology**, Genoble, v.398, p.246-259, out./nov. 2011.

OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. A. C.; OLIVEIRA, G. X. S.; BORGES, V. P. Evaporação da água de reservatórios: Medição e estimativa por métodos meteorológicos. In: Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações. INSA, p.44- 73, 2012.

PAZ, V. P. da; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.465 – 475, set./dez. 2000.

PINHEIRO, E. A. R.; ARAÚJO, J. C. DE; FONTENELE, S.DE B.; LOPES, J. W. B. Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida. **Water Resources and Irrigation Management**, Campina Grande, v.2, n.2, p.103-110, mar./ago. 2013.

SEA-BIRD ELECTRONICS. Entering calibration coefficients for Campbell Scientific/D&A OBS-3+ Optical Backscatter Sensor. **Application note N° 81**, Washington, D. C., 2010. 2p.

SILVA Junior, V. de P. E et al. Calibração de turbidímetro para estimativa da concentração de sedimento em suspensão como parâmetro de qualidade. In: **SIMPÓSIO DE**

RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE,11. 2012, João Pessoa. **Anais...Paraíba**, XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.

SUTHERLAND, T. F.; LANE, P. M.; AMOS, C. L.; DOWNING, J. The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. **Marine Geology**, Canadá, v.162, 587–597, 2000.

TOMAZONI, J. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. V. L.; ROSA FILHO, E. F. da.Utilização de medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica nas bacias dos rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha Rica e Jirau – sudoeste do estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v.57, p. 49-56, 2005.

## CAPÍTULO I

# **DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS NA ÁGUA A PARTIR DA TURBIDEZ MEDIDA COM SENSOR DE RETROESPALHAMENTO ÓPTICO**

---

<sup>2</sup> Artigo submetido à Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental

## **DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS NA ÁGUA A PARTIR DA TURBIDEZ MEDIDA COM SENSOR DE RETROESPALHAMENTO ÓPTICO**

Autor: Denize Sampaio Chagas

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

Coorientador: Hans Raj Gheyi

### **RESUMO**

A turbidez é um parâmetro de qualidade da água associado à transparência do meio, sendo expressa em unidade nefelométrica de turbidez (NTU). Turbidímetros nefelométricos medem a turbidez com base no retroespalhamento de radiação infravermelha. Esses instrumentos ópticos devem ser calibrados com amostras de sedimentos do local de interesse. Assim o presente trabalho objetivou a calibração de dois turbidímetros novos, com amostras de solo da margem de um açude da Fazenda Santo Antônio, Governador Mangabeira - BA. O desenvolvimento do experimento ocorreu no Laboratório de Solo e Água do Núcleo de Engenharia de Água e Solos- NEAS, da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, campus de Cruz das Almas. Os turbidímetros foram calibrados no interior de um reservatório de 100 L de capacidade, preenchido com 75 L de água destilada, ficando os leitores ópticos dos sensores de turbidez posicionados na localidade média do reservatório. As suspensões (solo + água) foram preparadas no interior do reservatório, onde foram homogeneizadas por meio de um agitador eletromecânico projetado e construído para esse fim. No teste realizou-se incrementos de 100 g de solo até acumular 2000 g. Após adição da massa por incremento, dez amostras de suspensão do interior do tanque foram retiradas por meio de dois drenos acoplados na parede do reservatório, posicionados na direção do leitor óptico dos turbidímetros. Após pesagem e secagem do material coletado, obteve-se a concentração real de sólidos suspensos na água (CSS). Ao final do experimento foi possível relacionar os dados de turbidez com a CSS e gerar modelos matemáticos de calibração com altos coeficientes de determinação ( $r^2 > 0,994$ ) para estimativas da CSS através da turbidez medida.

**Palavras-chave:** nefelometria, calibração, turbidímetro.

## **DETERMINATION OF SUSPENDED SOLID CONCENTRATION IN WATER FROM TURBIDITY MEASURED WITH OPTICAL BACKSCATTER SENSOR**

Author: Denize Sampaio Chagas

Advisor: Aureo Silva de Oliveira

Co-advisor: Hans Raj Gheyi

### **ABSTRACT**

Turbidity is a water quality parameter associated with the transparency of the medium, being expressed in nephelometric turbidity unit (NTU). Turbidity measuring nephelometric turbidity based on the backscattering of infrared radiation. These optical instruments must be calibrated with samples of sediment from the landmark. This study aimed calibration of two new turbidity meters, with soil samples from the edge of a pond of Fazenda Santo Antonio, Governador Mangabeira - BA. The development of the experiment occurred in the Soil and Water Laboratory Engineering Center of Water and Solos- NEAS, University Federal Reconcavo of Bahia, Cruz das Almas campus - Brazil. The turbidity was calibrated within a reservoir 100 L capacity, filled with 75 L of distilled water, while the optical reader of turbidity sensors positioned in the middle location of the reservoir. The suspensions (soil + water) were prepared in the tank where they were homogenized by means of an electromechanical shaker designed and constructed for this purpose. The test was carried out increments of 100 g of soil to accumulate 2000g. After addition of increasing mass per ten samples of the tank suspension were withdrawn by means of two drains coupled to the vessel wall, positioned towards the optical reader of turbidity. After weighing and drying the collected material, obtained the true concentration of suspended solids in the water (CSS). At the end of the experiment it was possible to relate the turbidity data with the CSS and generate mathematical models calibration with high coefficients of determination ( $r^2 > 0.994$ ) for estimates of CSS by turbidity measurement

**Key-words:** nephelometry, calibration, turbidimeter.

## 1.0. INTRODUÇÃO

A turbidez é caracterizada pela medição óptica da luz dispersa, resultante da interação entre a luz incidente e um material em partículas, que pode ser oriundo de matéria orgânica, partículas inorgânicas, silte, argila, areia, etc, numa amostra líquida (Sadar, 2002). Geralmente é quantificada pela passagem de um feixe de luz através de uma amostra de água, assim quantifica-se o espalhamento dos fótons (Marquis, 2005). O material particulado faz com que o feixe de luz incidente seja dispersado, ao invés de ser absorvido e transmitido em linha reta, logo, quanto maior a dispersão da luz, maior a turbidez (Yao et al., 2014).

A concentração de sólidos suspensos (CSS) influencia diretamente a turbidez, pois dificulta a penetração da luz na água. Problemas como assoreamento de barragens e reservatórios, arraste de nutrientes e contaminantes, e a degradação de ambientes aquáticos estão associados ao transporte de sedimentos (Carreras, 2010). Deste modo, estudos que avaliam o transporte de sedimentos em suspensão são importantes para a caracterização de bacias hidrográficas, bem como a quantificação dos impactos gerados pelo manejo do terreno, alterações antrópicas e para estimar a sedimentação de reservatórios, lagos e estuários (Fill & Santos, 2001).

Dentre os métodos de mensuração da turbidez, os automáticos conseguem uma representação mais fidedigna da dinâmica sedimentológica em diferentes níveis de descarga líquida, elevando assim a confiabilidade dos monitoramentos. Além disso, devido às dificuldades em se obter medidas diretas rapidamente, os métodos de estimativas indiretas através da turbidez, utilizando turbidímetros nefelométricos, tem ganhado aceitação dentre os diversos métodos de monitoramento (Pinheiro et al., 2013).

Sensores ópticos de retroespalhamento (turbidímetros) possibilitam a obtenção de um registro contínuo de perda de solo, quando a CSS é bem relacionada com turbidez (Dabney et al., 2006). Esses turbidímetros apresentam bons resultados em amostras com alta turvação, pois são capazes de solucionar rápidas flutuações temporais da CSS, tornando-se ferramentas importantes e amplamente utilizadas para a determinação da CSS (Butt et. al., 2002; Sutherland et al., 2000).

O funcionamento desses turbidímetros é baseado na iluminação da amostra de água, através da fonte de radiação do equipamento, fazendo o fotodetector convergir a luz irradiada para fotocorrente. Assim, a radiação dispersa que retorna para o detector provoca uma correlação entre o nível de turbidez, expresso em unidade nefelométrica de turbidez (NTU) e a voltagem medida (Campbell Scientific, 2012; Sea-Bird Electronics, 2010).

Para uma melhor proporcionalidade entre a relação de saída do sensor e a CSS a ser medida, recomenda-se uma calibração com amostras de sedimentos da localidade a ser estudada (Butt, et. al., 2002; Campbell Scientific, 2012). Estabelecendo-se assim uma relação matemática entre a tensão de saída (V) e a turbidez da amostra (NTU), bem como uma relação entre os valores de turbidez e a CSS (Sea-Bird Electronics, 2010; St-Hilaire. et. al. 2006).

Existem três técnicas básicas de calibração dos sensores de retroespalhamento óptico, com a utilização de sedimentos: (a) realizada no local de estudo, (b) com amostras de água e sedimentos coletados na localidade a ser avaliada, (c) com sedimento seco e tratado oriundo do local a ser estudado. Os dois últimos métodos são laboratoriais. Destaque para o método do sedimento seco, que é o método mais fácil de ser realizado, uma vez que a quantidade de sedimentos e o volume de água podem ser determinados com precisão (Campbell Scientific, 2012).

Navratil et al. (2011) afirmam que é importante a calibração dos turbidímetros para a estimativa da CSS, com o intuito de minimizar possíveis erros embutidos, pois, por meio da calibração é possível combinar flutuações de turbidez, incertezas de amostragem, laboratoriais, e influência de outros fatores que podem contribuir para a atenuação da luz, tais como, tamanho de partícula, forma e mineralogia. Nesse contexto, considerando a dificuldade logística para a realização dos métodos *in situ* e wet-sediment, o presente estudo objetivou a calibração de dois turbidímetros novos, utilizando o método do sedimento seco, com o auxílio de um agitador eletromecânico elaborado e construído com esta finalidade.

## **2.0. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Local de estudo**

O experimento foi conduzido no Laboratório de Água e Solos do Núcleo de Água e Solo (NEAS) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) campus de Cruz das Almas.

As amostras de solo utilizadas para determinação da turbidez, foram coletadas às margens de um açude da Fazenda Santo Antônio, que fica localizada no município de Governador Mangabeira (12°37' S, 39°03' W, 220 m), Bahia. A Fazenda Santo Antônio é propriedade da empresa DANCO Comércio e Indústria de Fumos Ltda, parceira do NEAS/UFRB em muitas pesquisas.

O clima da região, conforme a classificação de Koppen, é do tipo Am, caracterizado por clima de bosque chuvoso quente e úmido, com temperatura média de 25 °C; o solo da área

experimental é classificado como Latossolo Amarelo Distroceso típico, com relevo plano (Schmidt, 2008).

## 2.2. Descrição do experimento

### 2.2.1. Coleta e Preparo das amostras

#### 2.2.1.1. Solo

Amostras de solo foram coletadas em cinco diferentes pontos da margem do açude, de maneira a representar toda a área, a uma profundidade de 0 a 0,10 m.

O solo coletado foi levado para o Laboratório de Água e Solos do NEAS/UFRB e colocado para secar em estufa a uma temperatura de 105°C, por um período de 24 h. Posteriormente procedeu-se com o destorroamento e homogeneização da amostra (Figura 1). Parte da amostra foi encaminhada para o Laboratório de Solos da EMPRAPA Mandioca e Fruticultura, onde foram realizadas análises física (Anexo I) e química (Anexo II).

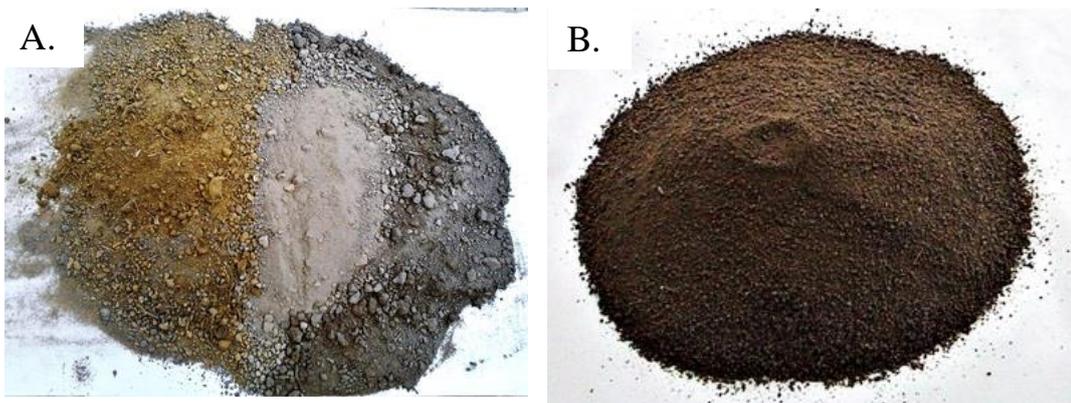


Figura 1. Solo coletado em diversos pontos das margens do açude (A). Solo seco, homogeneizado e destorreado (B)

De acordo com a análise laboratorial realizada, o solo utilizado foi classificado como franco-argilo-arenoso, com composição granulométrica expressa na Tabela 1, e com densidade de partículas- 2,46 kg dm<sup>-3</sup>.

Tabela 1. Composição granulométrica (g kg<sup>-1</sup>) do solo utilizado, dispersão feita com NaOH

Composição granulométrica (g kg <sup>-1</sup> )	
Areia muito grossa	60
Areia grossa	160
Areia media	209
Areia fina	147

Areia muito fina	76
Silte	128
Argila	214

Na análise química destaque para o teor de ferro- 1133,56 mgdm<sup>-3</sup> e matéria orgânica- 22 g kg<sup>-1</sup>.

### 2.2.1.2. Água

Foi utilizado neste estudo 75 L de água destilada, que foram colocadas dentro do reservatório de um agitador eletromecânico, para variação da turbidez, através de incrementos de solo.

A cada incremento de solo foi retirado um total de 1500 mL da suspensão (solo + água), para manter o volume de água constante dentro do reservatório, foi feita a reposição da amostra retirada do reservatório na mesma proporção, antes da preparação da suspensão seguinte. Tal procedimento foi repetido até a última concentração nominal (S20), correspondente a 2000 g 75 L<sup>-1</sup> de água.

Realizou-se a medição do pH-7,4 e da condutividade elétrica- 36,2 µS cm<sup>-1</sup> da água utilizada no estudo, antes da realização do teste para verificação das características da água.

### 2.2.2. Sensor de turbidez: características e curvas de calibração do fabricante

As leituras automáticas da turbidez foram realizadas por meio de dois turbidímetros novos (modelo OBS 3+, número de série - NS 9118 e 9119, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA), conectados a um coletor de dados (modelo CR 1000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA), alimentado por uma bateria de 12 V. Estes sensores realizam a medição de até 4000 NTU, emitindo radiação para detectar sua dispersão pelas partículas em suspensão na água. Cada um deles possui 0,141 m de comprimento, com 0,025 m de diâmetro, e é constituído por um diodo emissor infravermelho, com um comprimento de onda de operação de 850 ± 5 nm, e possuem alta capacidade de resposta, devido à sensibilidade a variação de turbidez (Figura 2).

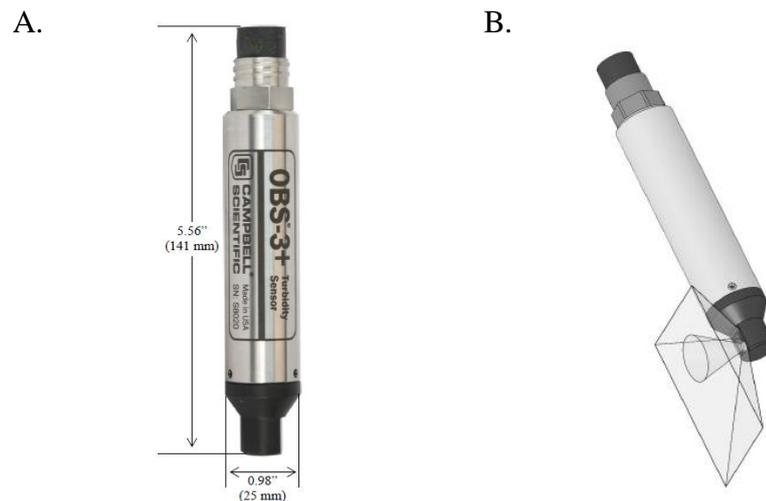


Figura 2. Turbidímetro OBS 3+ (A) e esquema da orientação do sensor óptico do turbidímetro (B) Fonte: Campbell Scientific (2012)

Esses equipamentos já vêm com curva de calibração em volts (Tabela 2), para baixos e altos valores de turbidez, realizada pelo fabricante com uma solução padrão de formazina, conforme as equações abaixo, para os turbidímetros identificados doravante como T9118 (NS 9118) e T9119 (NS 9119).

Tabela 2. Calibração de fábrica dos turbidímetros OBS3+ NS9118 e NS9119

Turbidímetro	Faixa de turbidez (NTU)	A	B	C
T9118	0 - 1000	7,1455	$1,7696 \times 10^2$	$-5,0479 \times 10^{-1}$
	0 - 4000	$1,0166 \times 10^2$	$7,2450 \times 10^2$	-2,6770
T9119	0 - 1000	6,6601	$1,7663 \times 10^2$	$-4,6439 \times 10^{-1}$
	0 - 4000	$9,6960 \times 10^1$	$7,1973 \times 10^2$	-2,4715

$Y = AX^2 + BX + C$ ,  $Y =$  turbidez (NTU) e  $X =$  sinal do sensor (V).

As curvas de calibração do fabricante podem ser observadas no Anexo III.

### 2.2.3. Definição das concentrações nominais de sólidos em suspensão

Para a definição das concentrações de sólidos suspensos na água, foi realizado um estudo preliminar com amostra de solo, em que foi determinado os pares ordenados da curva de calibração, ou seja,  $CSS = f(NTU)$ , a Tabela 3 mostra os valores das concentrações nominais em cada suspensão. Os valores foram selecionados de forma que chegasse o mais próximo do limite superior estabelecido pelo fabricante dos turbidímetros, até uma faixa de 4000 NTU, entretanto, deveriam ficar abaixo disso.

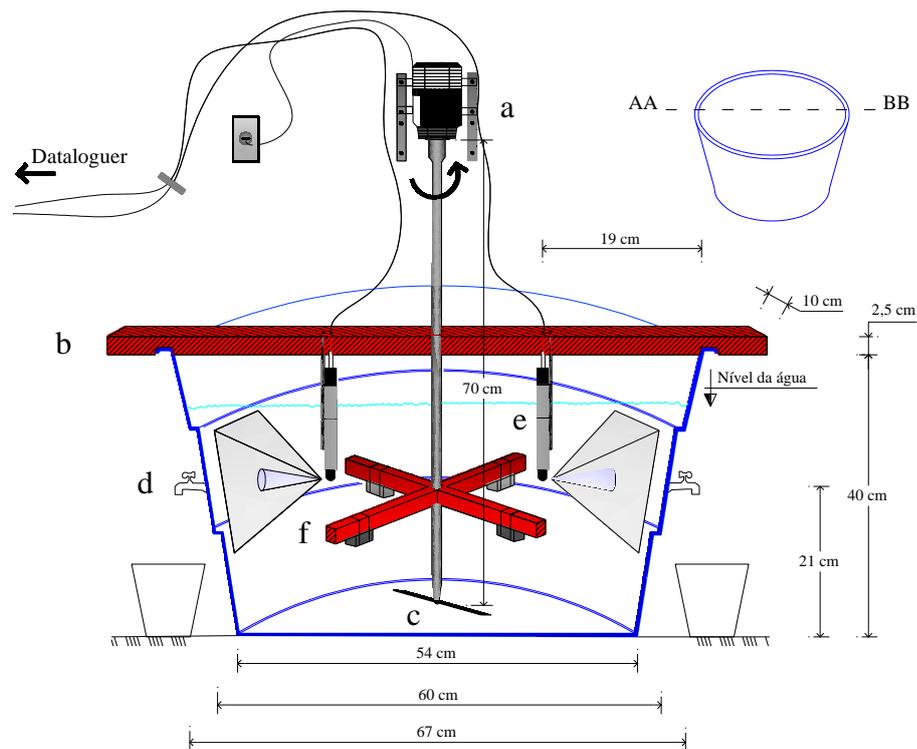
Tabela 3. Concentração nominal de sólidos em suspensão, em (g de solo L<sup>-1</sup> de água), preparadas para varia a turbidez, de forma que o valor da turbidez aproximasse de 4000 NTU.

Suspensão	Solo (g L <sup>-1</sup> )
S0	0
S1	1,3
S2	2,7
S3	4,0
S4	5,3
S5	6,7
S6	8,0
S7	9,3
S8	10,7
S9	12,0
S10	13,3
S11	14,7
S12	16,0
S13	17,3
S14	18,7
S15	20,0
S16	21,3
S17	22,7
S18	24,0
S19	25,3
S20	26,7

#### 2.2.4. Medições de turbidez

As medições de turbidez foram realizadas dentro do reservatório de um agitador eletromecânico, com capacidade máxima de 100 L, este foi preenchido com 75 L de água destilada. O reservatório do agitador possuía as seguintes dimensões: profundidade 0,41 m, diâmetro menor 0,54 m, diâmetro maior 0,73 m e coloração azul. O agitador contava ainda com um motor de indução (1590 rpm) e um eixo central conectado ao motor na sua extremidade superior, e duas aletas agitadoras na extremidade inferior.

A Figura 3 mostra o protótipo do agitador, podendo ser observado as dimensões e o posicionamento das partes que o compõe.



**a** – Motor de indução; **b**- Barra transversal de madeira; **c**- Aletas; **d**- Drenos para coleta do material; **e**- Turbidímetros (modelo OBS 3+); **f** – Base de madeira para dar estabilidade ao agitador, formato de “cruz”

Figura 3. Corte vertical do agitador eletromecânico com indicação das dimensões e detalhes do interior

Os turbidímetros T9118 e T9119 ficaram submersos na água até o ponto médio da profundidade do reservatório d'água, presos a um suporte de madeira apoiado na borda do reservatório. Os medidores de turbidez ficaram espaçados a 0,2 m um do outro e posicionados de tal maneira que os dois sensores (fontes de radiação Infravermelha) ficaram orientados para lados opostos, de forma a evitar interferência de um em relação ao outro. Esse arranjo experimental conjugado ao tamanho do reservatório garantiu uma distância suficiente da parede do reservatório (0,19 m) dos sensores, evitando portanto, interferência da parede nas leituras de turbidez, visto que, o fabricante recomenda um distanciamento mínimo de 5 cm.

Observa-se na Figura 4A a estrutura utilizada para as medições de turbidez, sendo esta composta pelo agitador, coletor de dados, computador e os turbidímetros. A Figura 4B, mostra o agitador funcionando com água apenas.

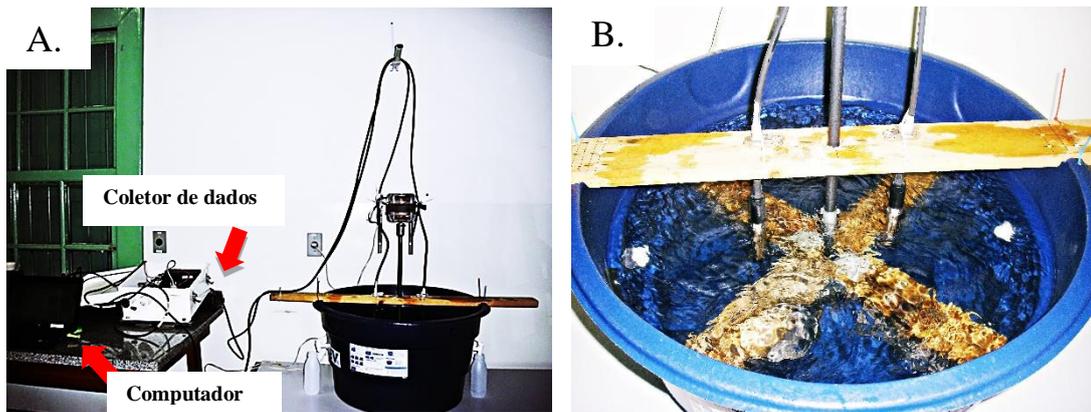


Figura 4. Estrutura para medição da turbidez com auxílio de um agitador eletromecânico (A) Agitador funcionando contendo 75 L de água (B)

Para a variação da turbidez foram realizados acréscimos de 100 g do solo coletado, aumentando assim a concentração de sólidos suspensos na água do reservatório. Os incrementos de 100 g de solo foram efetuados individualmente por vinte vezes, o que proporcionou uma quantidade final de solo no tanque de 2000 g. Os incrementos de solo foram homogeneizados pelo agitador eletromecânico, que manteve os sólidos em suspensão (Figura 5).



Figura 5. Incrementos de solo durante o funcionamento do agitador

Uma vez mergulhados na suspensão (água + solo) e devidamente conectados ao coletor de dados os sensores de turbidez realizaram medições de turbidez (NTU). Obteve-se um valor de turbidez a cada 45 segundos, após sua estabilização dos turbidímetros. Para cada suspensão procedeu-se com a coleta de dados por um período de 10 minutos com o agitador ligado e, mais

10 minutos com o motor desligado, para não forçar o motor. Para cada suspensão somou-se um tempo total de 21 minutos por teste (considerando 1 minuto de intervalo).

### 2.2.5. Determinação da concentração de sólidos suspensos

Para a determinação da concentração de sólidos suspensos (CSS) foram coletados em cada suspensão uma amostra total de 1500 mL, coletadas individualmente em porções de 150 mL de suspensão, sendo 5 amostras (750 mL) coletadas na direção de leitura do sensor T9118 e 5 na direção de leitura do sensor T9119. A coleta foi feita em recipiente plástico (polietileno), através de drenos (torneiras plásticas) acopladas ao reservatório do agitador, posicionadas na altura do leitor óptico dos turbidímetros (Figura 6).

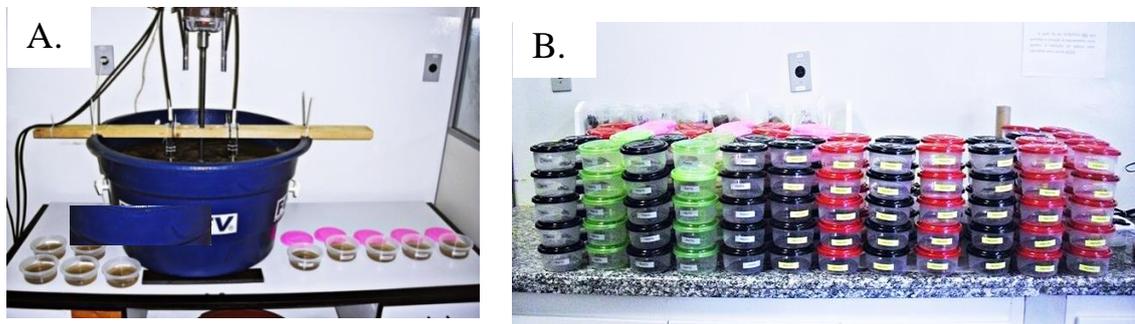


Figura 6. Coleta das 10 amostras de 150 mL para cada suspensão de solo (A) Recipientes (polietileno) utilizados para coleta da suspensão, somatório total 200 (B)

Todos os recipientes utilizados para a coleta, sendo dez por suspensão, somando um total de 200, foram individualmente pesados vazios, em balança de precisão (10 mg de resolução) para determinação da massa do recipiente ( $M_r$ ). A cada coleta da suspensão (150 mL) foi feita a pesagem do material coletado ( $M_{rs}$ ) referente a massa da suspensão ( $M_s$ ) juntamente com o recipiente, sendo:

$$M_{rs} = M_r + M_s \quad \text{Eq. 5}$$

Após obtenção de  $M_{rs}$ , os recipientes foram colocados em estufa de circulação forçada para secagem a 80 °C, por um período de 48 h, tempo suficiente para evaporação total da água nos contidas nos recipientes.

Depois da evaporação total da água contida no interior dos recipientes realizou-se nova pesagem para obtenção da massa do recipiente mais solo seco ( $M_{rSS}$ ), dada pela soma da massa do recipiente com a massa de solo seco ( $M_{ss}$ ), ou seja:

$$M_{rSS} = M_r + M_{ss} \quad \text{Eq. 6}$$

Em seguida, determinou-se a massa de água no recipiente ( $M_{ag}$ ), através da relação:

$$M_{ag} = M_{rs} - M_{rSS} \quad \text{Eq. 7}$$

Obteve-se a massa de solo seco foi pela diferença entre  $M_{rSS}$  e  $M_r$ , têm-se:

$$M_{ss} = M_{rSS} - M_r \quad \text{Eq. 8}$$

Na sequência, a concentração real de sólidos suspensos ( $CSS_r$ ) foi determinada individualmente em cada recipiente a partir da seguinte relação:

$$CSS_r = \frac{M_{ss}}{V_{ag}} \quad \text{Eq. 9}$$

Sendo o volume de água ( $V_{ag}$ ) obtido através da seguinte equação:

$$V_{ag} = M_{ag} \times d_{ag} \quad \text{Eq. 10}$$

O volume de água ( $V_{ag}$ ) também pode ser considerado apenas como a  $M_{ag}$ , já que tratar-se de água destilada considera-se a densidade da água ( $d_{ag}$ ) igual a  $1 \text{ kg L}^{-1}$ .

A CSS obtida dessa forma corresponde à CSS real no agitador, no momento da leitura da turbidez. Portanto, a CSS real é o valor a ser correlacionado com o sinal do sensor (V) e a turbidez (NTU) baseada na equação de calibração do sensor fornecida pelo fabricante.

Para evitar possíveis erros, descartou-se as primeiras amostras coletadas em cada dreno, pois apresentaram valores maiores que os demais. Tal evento ocorreu devido ao arranjo experimental do agitador, que favoreceu o acúmulo de sedimentos nos drenos a cada incremento de solo, nas primeiras amostras. Para todas as suspensões aplicou-se esse mesmo procedimento.

## 2.2.5. Tratamento matemático-estatístico

### 2.2.5.1. Análise dos dados

A análise estatística dos dados incluiu:

(1) Confronto entre a concentração nominal ( $CSS_n$ ) e a concentração real de sólidos suspensos na água ( $CSS_r$ ). Esse confronto incluiu análise de regressão com a ferramenta ANÁLISE DE DADOS da planilha eletrônica EXCEL e o uso do indicador estatístico denominado índice de Willmott,  $d$  (Willmott et al., 1985);

O índice de Willmott varia de zero para nenhuma concordância a 1, quando a concordância perfeita. De acordo com Lopes et al. (2014), valores de  $d$  acima de 0,75 são satisfatórios e seu valor pode ser determinado como se segue:

$$d = 1 - \frac{\sum(Pi - Oi)^2}{\sum(|Pi - O| + |Oi - O|)^2} \quad (11)$$

sendo:

$Pi$  = valor estimado

$Oi$  = valor observado

$O$  = média do valor observado

O distanciamento entre os valores da  $CSS_n$  e  $CSS_r$  foi verificado através do erro relativo (ER) em cada suspensão, utilizando a Equação 12:

$$ER = \left( \frac{(CSS_{real} - CSS_{nominal})}{CSS_{nominal}} \right) * 100 \quad (12)$$

(2) Os dados de turbidez da água e de concentração de sólidos suspensos foram submetidos a uma análise de regressão utilizando-se a mesma ferramenta citada acima. Do relatório de ANOVA da regressão extraíram-se as constantes do modelo de regressão os respectivos testes estatísticos de significância do modelo.

(3) Por último, a análise dos dados incluiu a determinação de um fator  $F$  para estimativa da CSS. Como uma forma alternativa para a obtenção da CSS, calculou-se o  $F$ , pois trata-se de um modelo matemático mais simples que os gerados pelas regressões. Assim, proporciona-se duas formas obtenção da CSS. O fator  $F$  para a estimativa da CSS em função da turbidez medida,

para o tipo de solo utilizado, se deu baseado na metodologia de Tomazoni et al. (2005), conforme a Equação 13:

$$F = \frac{CSS}{TB} \quad (13)$$

Onde:

Css= Concentração de sólidos suspensos ( $\text{g L}^{-1}$ );

TB= Turbidez (NTU)

Posteriormente, determinou-se a média-aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) do fator F. Admitiu-se que o CV ideal do fator não deveria ultrapassar 30%.

### 3.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise das concentrações de sólidos suspensos

Os vinte incrementos de 100 g de solo, até uma porção de 2000 g no reservatório, possibilitaram a verificação do aumento da turbidez, juntamente com a concentração real, que apresentou valores abaixo da concentração nominal (Tabela 4).

Tabela 4. Concentração nominal, concentração real média, desvio padrão e seus respectivos coeficiente variação (CV) e Erro Relativo (ER)

Suspensão	C. Nominal ( $\text{g L}^{-1}$ )	Concentração Real		
		Média / Desvio Padrão ( $\text{g L}^{-1}$ )	CV %	ER %
S0	0	0	0	0
S1	1,33	1,06 ± 0,18	17	20
S2	2,67	2,07 ± 0,23	11	22
S3	4,00	3,00 ± 0,23	8	25
S4	5,33	4,20 ± 0,38	9	21
S5	6,67	5,17 ± 0,28	5	22
S6	8,00	6,05 ± 0,57	9	24
S7	9,33	7,02 ± 0,67	10	25
S8	10,67	8,37 ± 1,38	16	22
S9	12,00	9,32 ± 1,04	11	22
S10	13,33	9,60 ± 0,95	10	28
S11	14,67	10,91 ± 1,19	11	26
S12	16,00	11,38 ± 1,5	13	29
S13	17,33	11,85 ± 0,59	5	32
S14	18,67	13,66 ± 1,67	12	27
S15	20,00	13,98 ± 1,09	8	30

S16	21,33	15,29 ± 1,90	12	28
S17	22,67	15,88 ± 1,25	8	30
S18	24,00	17,74 ± 2,68	15	26
S19	25,33	18,28 ± 2,44	13	28
S20	26,67	18,94 ± 1,54	8	29

Verifica-se ainda que os valores da concentração real ficaram baixo da concentração nominal, apresentando desvio-padrão máximo de 2,68 g L<sup>-1</sup>. Os coeficientes de variação entre as amostras estiveram na margem de 5 a 16 %.

O erro relativo expressa, em percentual, o quanto a concentração real se afasta da concentração nominal, sendo determinado através da relação entre a diferença da concentração real e concentração nominal, pela concentração nominal. Os valores do erro relativo entre as amostras variaram entre 20 a 30 %.

Os valores da concentração real de sólidos suspensos (CSS real) e da concentração nominal de sólidos suspensos (CSS nominal), apresentaram uma correlação linear, com coeficiente de determinação ( $r^2= 0,997$ ), como pode ser observado na Figura 7.

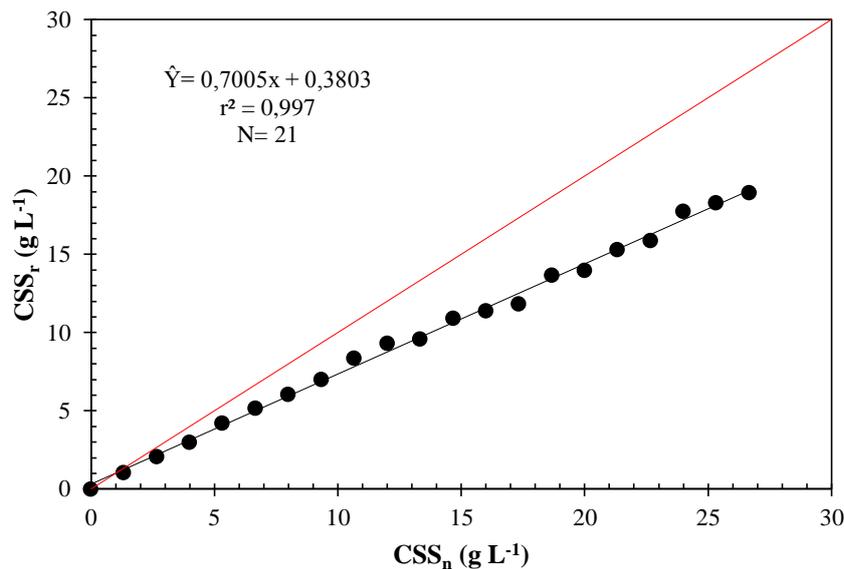


Figura 7. Relação entre a concentração nominal de sólidos suspensos e a concentração real média de sólidos suspensos

A Figura 7 mostra uma boa correlação entre os valores da concentração nominal de sólidos suspensos e a concentração real de sólidos suspensos, entretanto, nota-se, através da reta de 1:1, que a CSS real apresentou valores mais baixos que a CSS nominal. Ainda sobre o afastamento da CSS real e da CSS nominal, o índice de Willmott encontrado indica uma boa concordância

entre os dados, pois o valor encontrado foi de  $d = 0,89$ , sendo neste caso satisfatório, pois se aproximou de 1 e acima do valor considerado satisfatório ( $d = 0,75$ ).

### 3.2. Relação entre a concentração de sólidos suspensos e a turbidez

Ao correlacionar os dados brutos do sensor (V) e a concentração de sólidos suspensos ( $\text{g L}^{-1}$ ), o modelo matemático que melhor ajustou os dados foi o linear (Figura 8A). Entretanto, ao correlacionar o sinal do sensor com os valores de turbidez medidos, o modelo quadrático foi o que melhor ajustou os dados (Figura 8B), tal qual o modelo de calibração de fábrica.

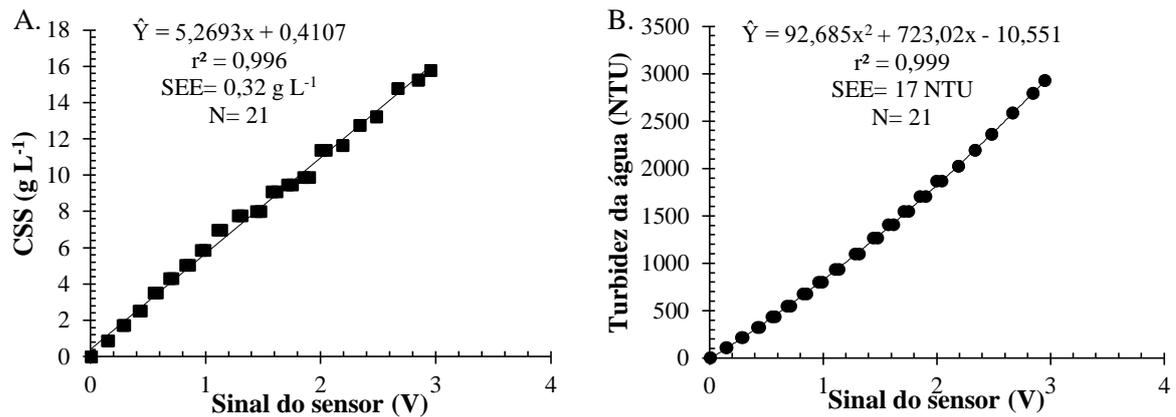


Figura 8. A- Concentração de sólidos suspensos e o sinal do sensor. B- Correlação entre a turbidez média da água e o sinal do sensor

Observa-se na Figura 8 que, em ambos os casos, houve uma boa correlação, obtendo-se altos coeficientes de determinação ( $r^2 = 0,996$  e  $0,999$ ). Logo, pode se dizer que 99% das variações da concentração de sólidos suspensos e da turbidez, respectivamente, são explicados pelas variações do sinal do sensor.

Os dados de turbidez utilizados são referente a média dos valores obtidos pelos dois turbidímetros, estes apresentaram desvio-padrão mínimo de  $0,7 \text{ NTU}$  e máximo de  $136 \text{ NTU}$  para valores de turbidez 3 e  $2030 \text{ NTU}$  respectivamente.

A correlação entre os resultados da CSS e da turbidez da água permitiu estimar a CSS, em que encontrou-se uma correlação significativa ( $p < 0,05$ ), sendo constatado que, a equação polinomial de segundo grau (Figura 9), foi aqui melhor ajustou os dados; corroborando com os resultados encontrados por Navratil et al. (2011). No entanto, esse resultado está em desacordo com o obtido por Pinheiro et al. (2013), que encontraram o melhor ajuste da curva de calibração com a equação polinomial de terceiro grau.

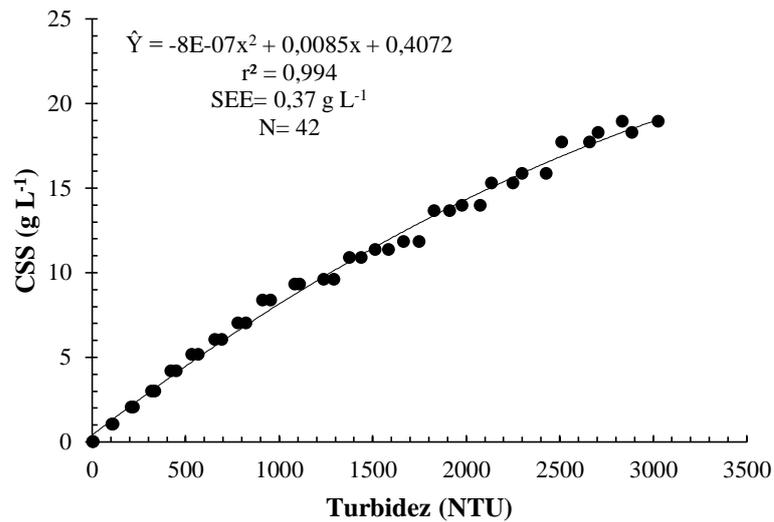


Figura 9. Correlação entre a turbidez média da água e a concentração de sólidos suspensos

A análise do erro padrão da estimativa é importante pois auxilia no ajuste da linha da regressão, ou seja, revela quanto a regressão descreve as variações na variável dependente. Assim, o erro padrão da regressão foi de  $0,37 \text{ g L}^{-1}$ . Minella et al. (2008) encontraram erros padrão de até  $208 \text{ mg L}^{-1}$  em calibrações realizadas *in situ*.

Concomitante ao proposto pelo modelo matemático ajustado, Tomazoni et al. (2005) propõe que a estimativa da CSS seja feita de forma mais simplificada, em que a partir de um fator F, multiplicado pelo valor turbidez. Na Tabela 5 são apresentados a média aritmética, desvio-padrão e CV para os dados relativos ao fator F em cada suspensão analisada.

Tabela 5. Resumo dos dados para obtenção do fator de conversão  $\text{g L}^{-1}/\text{NTU}$  (Fator F)

Suspensão	Dados relativos ao fator $F = \frac{CSS \text{ (g L}^{-1}\text{)}}{\text{Turbidez (NTU)}}$			
	Turbidez (NTU)	Média do fator	Desvio-padrão	CV %
S0	3,17	0	0	0
S1	107,79	0,0098	0,0004	4
S2	213,74	0,0097	0,0004	4
S3	324,60	0,0092	0,0003	4
S4	434,55	0,0097	0,0004	4
S5	549,06	0,0094	0,0004	4
S6	674,48	0,0090	0,0004	4
S7	800,12	0,0088	0,0003	4
S8	932,70	0,0090	0,0003	3
S9	1095,75	0,0085	0,0001	2
S10	1264,93	0,0076	0,0002	3
S11	1405,79	0,0078	0,0002	3

S12	1548,00	0,0074	0,0002	3
S13	1705,13	0,0070	0,0002	4
S14	1868,50	0,0073	0,0002	3
S15	2026,07	0,0069	0,0002	3
S16	2191,10	0,0070	0,0003	4
S17	2362,68	0,0067	0,0003	4
S18	2584,61	0,0069	0,0003	4
S19	2794,57	0,0065	0,0003	5
S20	2929,63	0,0065	0,0003	5
Média		0,0076	0,0018	28

Ao relacionar a CSS com a turbidez, obtêm-se o fator F, que serve para estimar a quantidade de sólidos em suspensão, quando não for possível a obtenção deste dado, principalmente em condições de campo. É válido ressaltar que este fator foi calculado apenas com solo franco-argilo-arenoso, portanto, pode ser limitado para este tipo de solo.

O valor médio do fator (F= 0,076) pode ser usado pra estimar a CSS numa faixa de turbidez que varia de 3 a 2930 NTU. Entretanto, o fator F médio tende a subestimar valores da CSS quando a turbidez for baixa e superestimar a CSS quando a turbidez for alta, apresentando assim valores de CSS mais próximo do real quando for uma faixa média de turbidez. Portanto é recomendado usar o fator F encontrado para cada faixa de turbidez.

Tomazoni et al. (2005), utilizando medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica, afirmam que o coeficiente de variação ideal do fator F não deve ultrapassar 30 %. Na Tabela 5, verifica-se que os coeficientes de variação encontrados foram baixos, variando de 2 a 5 %, exceto para o fator F médio, que apresentou CV de 28 %, aproximando-se do limite ideal, o que talvez explique essa tendência a sub e superestimar valores da CSS. No entanto, o CV ainda se encontra abaixo do limite, o tornando propício para o uso.

Analisando as duas formas de estimativa da CSS verifica-se certa diferença nos valores, sendo que a CSS encontrada por meio da equação apresenta valores mais fidedignos a concentração real, enquanto que na CSS obtida por meio do fator F médio apresenta uma tendência a sub e superestimar valores, como pode ser observado na Figura 10.

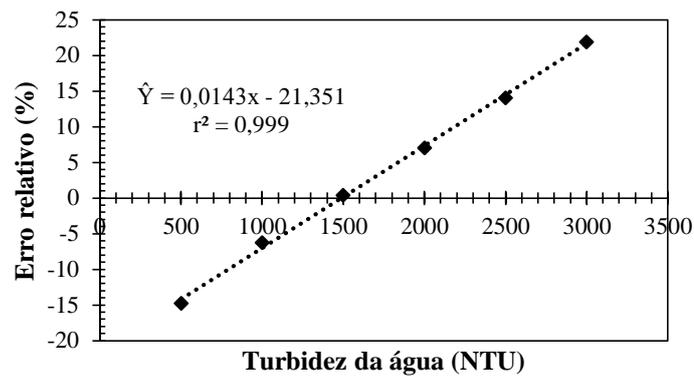


Figura 10. Correlação entre a turbidez da água e o erro relativo entre a concentração nominal e a concentração real ( $ER = [(CSS_f - CSS_r) / CSS_r] * 100$ )

Nesse caso o erro relativo expressa o percentual da diferença entre a CSS obtida através da equação da regressão e da CSS obtida com a utilização do fator F médio, em função da turbidez.

#### 4.0. CONCLUSÕES

1. A calibração em laboratório utilizando o método do sedimento seco, realizada com o auxílio de um agitador eletromecânico, gerou equações representativas para a estimativa da concentração de sólidos suspensos para o tipo de solo utilizado.
2. A turbidimetria pode ser utilizada para estimativa da CSS desde que os turbidímetros estejam devidamente calibrados.
3. A utilização do agitador eletromecânico possibilitou simular eventos de alta turbulência com elevada concentração sólidos suspensos.
4. Os dois métodos avaliados, ambos podem ser utilizados para estimativa da CSS. Entretanto a utilização do fator F médio, apresenta uma tendência a sub e superestimar valores em determinados momentos.

#### 5.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Butt, T.; Miles, J.; Ganderton, P.; Russell, P. A simple method for calibrating optical backscatter sensors in high concentrations of non-cohesive sediments. *Marine Geology*, v.192, p.419-424, 2002.

Campbell Scientific. OBS-3+ and OBS300 suspended solids and turbidity monitors Operator's manual. <<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/obs-3+.pdf>>. 10 Fev. 2015.

Carreras, N. M.; Udelhoven, T.; Krein, A.; Gallart, F.; Iffly, J. F.; Ziebel, J.; Hoffmann, L.; Pfister, L.; Walling, D. E. The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Attert River catchment (Luxembourg). *Journal of Hydrology*, v. 382, p. 49-63, 2010.

Dabney, S. M.; Locke, M. A.; Steinriede, R. W. Turbidity sensors track sediment concentrations in runoff from agricultural fields. In: Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC). Proceedings... Reno: JFIC, 2006. p. 345-352.

Fill, H. D.; Santos, I. Estimativa de concentração de sedimentos em suspensão através da profundidade de Sechi. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Língua Oficial Portuguesa. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2001. p.1-9.

Lopes, F. B.; Barbosa, C. C. F.; Novo, E. M. L. de M.; Andrade, E. M. de; Chaves, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiper espectral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.13-19, 2014.

Marquis, P. Turbidity and Suspended Sediment as Measures of Water Quality. *Streamline Watershed Management Bulletin*, v.9, p.21-23, 2005.

Minella, J. P. G.; Merten, G. H.; Reichert, J. M.; Clarke, R. T. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. *Hydrological Processes*, v.22, p.1819-1830, 2008.

Navratil, O.; Esteves, M.; Legout, C.; Gratiot, C.; Nemery, J.; Willmore, S.; Grangeon, T. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology*, v.398, p.246-259, 2011.

Pinheiro, E. A. R.; Araújo, J. C.; Fontenele, S. de B.; Lopes, W. B. Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida. *Water Resources and Irrigation Management*, v.2, p.103-110, 2013.

Sadar, M. Turbidity instrumentation - an overview of today's available technology. In: *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*, 2002, Reno.

Sea-Bird Electronics. Entering calibration coefficients for Campbell Scientific/D&A OBS-3+ Optical Backscatter Sensor. Application note N° 81, Washington, D. C., 2010. 2p.

St-Hilaire, A.; Courtenay, S. C.; Delgado, C. D.; Pavey, B.; Ouarda, T. B.M.J.; Boghen, A.; Bernard, B. Suspended sediment concentrations downstream of a harvested peat bog: Analysis and Preliminary Modelling of Exceedances Using Logistic Regression. *Canadian Water Resources Journal* v. 31, p. 139-156, 2006.

Tomazoni, J. C.; Mantovani, L. E.; Bittencourt, A. V. L.; Rosa Filho, E. F. da. Utilização de medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica nas bacias dos rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha Rica e Jirau – sudoeste do estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, v.57, p. 49-56, 2005.

Willmott, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, R. E.; Feddema, J. J.; Klink, K. M.; Legates, D. R.; Rowe, C. M.; O'donnell, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v.90, p.8995-9005, 1985.

Yao, M.; Nan, J.; Chen, T. Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes. *Desalination* v.354, p. 116-124, 2014.

## **CAPÍTULO II**

### **INFLUÊNCIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO NA TURBIDEZ DA ÁGUA**

---

<sup>3</sup> Artigo a ser submetida ao Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental

## INFLUÊNCIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO NA TURBIDEZ DA ÁGUA

Autora: Denize Sampaio Chagas

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

Coorientador: Hans Raj Gheyi

### RESUMO

A turbidez é um parâmetro de qualidade da água, associado a transparência do meio e diretamente influenciada pela concentração de sólidos suspensos. Partículas menores permanecem em suspensão, enquanto que as partículas maiores tendem a decantar mais rapidamente, assim, influenciam diferentemente na turbidez. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência de três frações granulométricas (FG1 = silte + argila; FG2 = areia fina + areia muito fina e FG3 = areia grossa + areia média) na determinação da turbidez da água medida com dois turbidímetros de retroespalhamento óptico. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Água e Solos do Núcleo de Engenharia de Água e Solos- NEAS, da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, campus de Cruz das Almas. As suspensões (FG + água) foram preparadas individualmente no interior de um reservatório preenchido com 75 L de água destilada, a homogeneização do material foi feita com auxílio de um agitador eletromecânico projetado e construído para esse fim. Os turbidímetros foram posicionados na parte média do reservatório, com os leitores ópticos orientados para as paredes do mesmo. Três baterias de testes foram realizadas. A massa total de cada FG foi dividida em 20 incrementos e adicionados individualmente FG1 = 50 g/incremento, FG2 = 130 g e FG3 = 225 g. Após adição da massa por incremento, dez amostras de suspensão do interior do reservatório foram retiradas por meio de dois drenos, posicionados na direção dos leitores ópticos dos turbidímetros. Após pesagem e secagem do material coletado, obteve-se a concentração real de sedimentos na água (CSS). Modelos de regressão com altos coeficientes de determinação ( $r^2 > 0,98$ ) foram obtidos para os sensores, relacionando a CSS e a turbidez da água em todas as frações granulométricas. Observou-se que os turbidímetros apresentaram maior sensibilidade para partículas de menor diâmetro.

**Palavras-chave:** turbidímetro, granulometria, retroespalhamento óptico.

## INFLUENCE OF SOIL GRAIN SIZE IN WATER TURBIDITY

Author: Denize Sampaio Chagas

Advisor: Aureo Silva de Oliveira

Co-advisor: Hans Raj Gheyi

### ABSTRACT

Turbidity is a measure of water quality, associated transparency of the medium and directly influenced by the concentration of suspended solids. Smaller particles remain in suspension, while larger particles tend to settle faster, thus influencing differently in turbidity. The objective of this study was to evaluate the influence of three size fractions (silt + clay = FG1; FG2 = sand + very fine sand and coarse sand FG3 = + medium sand) in determining the turbidity of the water turbidity measured with two optical backscatter. The study was conducted in Water Engineering Laboratory of Soil and Water Engineering Center and Solos- NEAS, Federal University of Reconcavo of Bahia, Cruz das Almas campus, Brazil. The suspensions (FG + water) were prepared individually in the interior of a tank filled with 75 L of distilled water, homogenizing the material was made with the aid of an electromechanical shaker designed and constructed for this purpose. The turbidity were positioned in the middle part of the reservoir, with optical readers oriented walls thereof. Three batteries of tests were performed. The total mass of each FG was divided into 20 increments FG1 and individually added = 50 g / increment, FG3 FG2 = 130 g = 225 g. After addition of increasing mass per ten samples of the suspension inside the reservoir were removed through two drains, positioned towards the optical reader of turbidity. After weighing and drying the collected material, obtained the actual concentration of sediment in water (CSS). Regression models with high coefficients of determination ( $r^2 > 0.98$ ) were obtained for the sensors, relating the CSS and the turbidity of the water in all size fractions. It was noted that the turbidity had higher sensitivity to particles of smaller diameter.

**Key-words:** turbidimeter, particle size, optical backscatter.

## 1.0. INTRODUÇÃO

A turbidez é caracterizada pela passagem de um feixe de luz através de uma amostra de água, ela pode ser medida pela quantificação do espalhamento dos fótons (Marquis, 2005). Assim o material particulado existente em uma amostra de água fará com que o feixe de luz incidente seja dispersado em outras direções, ao invés de ser absorvido e transmitido em linha reta. Quanto maior o nível de dispersão da luz, maior a turbidez (Sadar, 2002; Yao et al., 2014).

Existe uma proporcionalidade entre a turbidez e a concentração de sólidos em suspensão (CSS) na água. Assim, muitos problemas como assoreamento de barragens e reservatórios, arraste de nutrientes, de contaminantes e degradação de ambientes aquáticos são associados ao transporte de sedimentos (Fill & Santos, 2001).

Além disso a distribuição do tamanho das partículas de sedimento nos oceanos e estuários, altera o transporte dos sedimentos e as relações com a turbidez, assim o conhecimento da distribuição do tamanho das partículas dos sedimentos, bem como sua composição, torna-se importante para prever práticas de gestão, mais eficientes (Dabney et al. 2006).

Dentre os métodos de mensuração da turbidez, os automáticos conseguem uma representação mais fidedigna da dinâmica sedimentológica (Pinheiro et al., 2013). Destaque para os turbidímetros de retroespalhamento óptico, que tem como princípio de funcionamento baseado na medição da luz refletida nas partículas em suspensão na amostra de água (Ferreira, 2013).

A relação entre o sinal dos sensores de turbidez e a concentração do sedimento é diretamente proporcional, para grande parte dos materiais particulados em suspensão. No entanto, a tensão de saída dos instrumentos ópticos, depende não apenas da concentração de sólidos suspensos (CSS), mas, de vários parâmetros como, design óptico, tamanho de partícula, cor, forma e índice de refração, bem como das condições ambientais (Sutherland et al., 2000; Dabney et al., 2006; Conner & Visser, 1992; Ferreira, 2013).

Em estudos realizados sobre a influência do tamanho das partículas com relação à resposta dos sensores de retroespalhamento óptico, Conner & Visser (1992) verificaram que quando há diminuição do tamanho de partícula (50-20  $\mu\text{m}$ ) a resposta do sensor aumenta em mais de 70%, entretanto quando a redução do tamanho de partícula é de 300 para 200  $\mu\text{m}$  a resposta dos turbidímetros aumenta em menos de 30%. Os autores supracitados afirmam ainda que a tensão de saída dos OBS é proporcional à intensidade de partículas retroespalhadas a partir do meio em a amostra se encontra. Assim, espera-se uma relação inversamente proporcional entre a resposta do sensor e o tamanho das partículas.

As partículas pequenas possuem um menor comprimento de onda do que a luz incidente. Assim, a intensidade de luz dispersa pelas pequenas partículas é aproximadamente igual em todas as direções, já a luz que é difundida pelas partículas maiores é muito mais intensa em direção frontal do que em outras direções (Yao et al., 2014).

Clifford et al. (1995) verificaram que o tamanho da partícula influencia muito na resposta dos sensores, podendo apresentar um fator de variação até quatro vezes maior que o esperado. Confirmando o que Conner & Visser, (1992) propõe, em que a sensibilidade dos turbidímetros ópticos com relação ao tamanho da partícula é a fonte dominante do erro da CSS, assim, para a determinação de uma relação entre o tamanho de partícula e uma resposta sensor de turbidez mais rápida, é necessário eliminar todos fatores exceto o tamanho de partícula.

Desta maneira, para uma correta correlação entre o sinal do OBS e a concentração de sólidos suspensos, torna-se necessário a realização de um procedimento de calibração do turbidímetro, pois a calibração desse equipamento, para a estimativa da CSS, é um passo importante para minimizar possíveis erros (Ferreira, 2013; Navratil, 2011).

De acordo com a Campbell Scientific (2012), existem três técnicas básicas de calibração do sensor de retroespalhamento óptico com a utilização de sedimentos: (a) realizada no local de estudo (*in situ*), (b) com amostras de água e sedimentos coletadas na localidade a ser avaliada (*wet-sediment*) e (c) com sedimento seco e tratado oriundo do local a ser estudado (*dry-sediment*), este método é o mais fácil de ser realizado, uma vez que a quantidade de sedimentos e o volume de água podem ser determinados com precisão. Os dois últimos métodos são realizados em laboratório.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi verificar o efeito do tamanho de três diferentes frações granulométricas, sobre a resposta de dois turbidímetros de retroespalhamento óptico, utilizando o método de calibração do sedimento seco, com auxílio de um agitador eletromecânico, construído para essa finalidade.

## **2.0. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Local de estudo**

A condução do experimento se deu no Laboratório de Água e Solos do Núcleo de Água e Solo (NEAS) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) campus de Cruz das Almas.

Para a determinação da turbidez, foi utilizado amostras de solo que foram coletadas às margens de um açude pertencente a Fazenda Santo Antônio, que fica localizada no município de Governador Mangabeira (12°37' S, 39°03' W, 220 m), Bahia. A Fazenda Santo Antônio é propriedade da empresa DANCO Comércio e Indústria de Fumos Ltda, parceira do NEAS/UFRB em muitas pesquisas.

A região possui clima do tipo Am, caracterizado por clima de bosque chuvoso quente e úmido, com temperatura média de 25 °C, de acordo com a classificação de Koppen; o solo da área estudada é classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso típico, com relevo plano (Schmidt, 2008).

## **2.2. Descrição do experimento**

### **2.2.1. Coleta e Preparo das amostras**

#### **2.2.1.1. Água**

Para a variação da turbidez, foi utilizado neste estudo 75 L de água destilada dentro do reservatório de um agitador eletromecânico, a variação da turbidez se deu através de incrementos de determinadas frações granulométricas, ao todo três tipos de frações separadas por tamanho, que serão melhor descritas no próximo tópico.

Realizou-se três testes, cada um com uma fração granulométrica diferente. Em cada teste eram realizados incrementos com determinada quantidade da fração avaliada. A cada incremento realizado (total de vinte), foi retirado um total de 1500 mL da suspensão (fração granulométrica + água), para manter o volume de água constante dentro do reservatório, a cada amostra retirada, foi feita a reposição da amostra retirada do reservatório na mesma proporção, antes da preparação da suspensão seguinte. Tal procedimento foi repetido até a última concentração nominal (S20).

Realizou-se a medição do pH- 7,4 e da condutividade elétrica- 36,2  $\mu\text{S cm}^{-1}$  da água utilizada no estudo, antes da realização do teste para verificação das características da água.

#### **2.2.1.2. Frações granulométricas**

O solo utilizado foi coletado em cinco diferentes pontos da margem do açude, representando assim toda a área, a uma profundidade de 0 a 0,10 m.



O solo fracionado foi separado em três partes distintas, sendo, o material que passou pela peneira com malha de 270 mesh, classificado como silte + argila (FG1). O material retido na peneira de malha igual a anterior é areia fina + areia muito fina (FG2). Já o que ficou retido na peneira de 65 mesh é areia grossa + areia média (FG3). A separação nessas classes foi baseada no sistema americano de classificação do solo (Estados Unidos, 1951). Em que, as frações mineralógicas são caracterizadas pelo tamanho das partículas, no qual, o silte + argila possuem partículas com tamanho entre 0,05 a 0,001 mm; areia fina + areia muito fina (0,2 a 0,05 mm) e areia grossa + areia média (2 a 0,2 mm).

Posteriormente ao fracionamento, as frações FG2 e FG3, passaram por um processo de lavagem, para garantir que o silte e a argila impregnado na amostra fosse eliminado. Ainda com o auxílio das peneiras para análise granulométrica, a FG2 foi lavada na peneira com malha de 270 mesh e a FG3 foi lavada na peneira com malha de 65 mesh, assim o material retido nessas duas peneiras foi novamente seco em estufa, para então ser utilizado em seus respectivos testes. A lavagem desse material se deu para que o silte e a argila impregnada nas partículas maiores, não viesse a interferir dos dados de turbidez. A Figura 2 mostra a diferença entre as três frações utilizadas.



Figura 2. Frações Granulométricas: Silte + Argila (A). Areia fina + Areia muito fina (B). Areia grossa + Areia média (C)

A Figura 2A mostra a fração silte + argila. Já na Figura 2B e 3C pode ser visto a areia fina + mais areia muito fina (FG2) e areia grossa + areia média (FG3), após ser lavada e seca.

### 2.2.2. Sensor de turbidez: características e curvas de calibração do fabricante

As medições da turbidez foram realizadas por dois turbidímetros novos (modelo OBS 3+, número de série - NS 9118 e 9119, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA), estes foram conectados a um coletor de dados (modelo CR 1000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA), e alimentado por uma bateria de 12 V. Este tipo sensor realiza medição de até 4000

NTU, através da emissão de uma radiação infravermelha, que detecta a intensidade da luz dispersada pelas partículas que estão em suspensão na água. Cada um desses sensores possuem 0,141 m de comprimento, com 0,025 m de diâmetro, e são constituídos por um diodo emissor infravermelho, com um comprimento de onda de operação de  $850 \pm 5$  nm, com alta capacidade de resposta, devido à sensibilidade a variação de turbidez.

Os sensores de turbidez já vêm calibrado de fábrica, a calibração é feita com uma solução padrão de formazina, conforme as equações abaixo, para os turbidímetros T9118 e T9119. As curvas de calibração utilizam o sinal bruto do sensor (V) que é convertido em um valor de turbidez (Tabela 1), a partir a concentração do material utilizado, as curvas são para baixos e altos valores de turbidez.

Tabela 1. Equações de calibração de fábrica dos turbidímetros OBS3+ NS9118 e NS9119

Turbidímetro	Faixa de turbidez (NTU)	A	B	C
T9118	0 - 1000	7,1455	$1,7696 \times 10^2$	$-5,0479 \times 10^{-1}$
	0 - 4000	$1,0166 \times 10^2$	$7,2450 \times 10^2$	-2,6770
T9119	0 - 1000	6,6601	$1,7663 \times 10^2$	$-4,6439 \times 10^{-1}$
	0 - 4000	$9,6960 \times 10^1$	$7,1973 \times 10^2$	-2,4715

$Y = AX^2 + BX + C$ , Y = turbidez (NTU) e X = sinal do sensor (V)

As curvas do fabricante podem ser observadas no Anexo III.

#### 2.2.4. Definição das concentrações nominais de sólidos em suspensão

Determinou-se a quantidade do material fracionado utilizado a partir de estudos e testes, que possibilitaram prever uma quantidade desse material que chegasse a um valor de turbidez que fosse o mais próximo do limite de detecção dos turbidímetros (4000 NTU). Considerou-se que esses instrumentos possuem diferentes respostas para partículas de tamanho variado, as quantidades dos incrementos realizados diferiram de acordo com o a fração granulométrica.

Os incrementos das frações granulométricas FG1, FG2 e FG3 foram realizados nas quantidades de 50 g, 100 g e 150 g do material, respectivamente, sendo o procedimento realizado vinte vezes, em cada teste. Nas FM2 e FM3 a quantidade de incremento foi duplicada em relação ao valor inicial, a partir da suspensão S11, devido à baixa resposta do sensor ao tipo de partícula (Tabela 2).

Tabela 2. Concentração nominal de sólidos em suspensão, em g de solo 75 L<sup>-1</sup> de água, preparadas para que o valor da turbidez se aproxime de 4000 NTU.

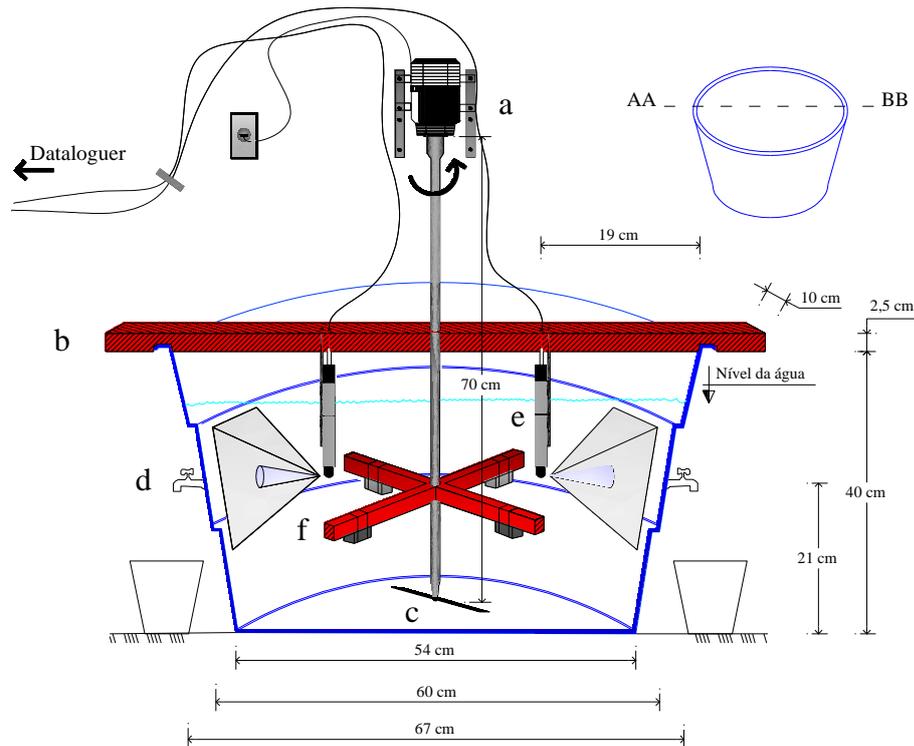
<b>Suspensão</b>	<b>FG1 (g 75 L<sup>-1</sup>)</b>	<b>FG2 (g 75 L<sup>-1</sup>)</b>	<b>FG3 (g 75 L<sup>-1</sup>)</b>
S0	0	0	0
S1	50	100	150
S2	100	200	300
S3	150	300	450
S4	200	400	600
S5	250	500	750
S6	300	600	900
S7	350	700	1050
S8	400	800	1200
S9	450	900	1350
S10	500	1000	1500
S11	550	1200	1800
S12	600	1400	2100
S13	650	1600	2400
S14	700	1800	2700
S15	750	2000	3000
S16	800	2200	3300
S17	850	2400	3600
S18	900	2600	3900
S19	950	2800	4200
S20	1000	3000	4500

FG1= silte + argila, FG2= areia fina + areia muito fina, FG3= areia grossa + areia média

### 2.2.6. Medições de turbidez

Realizou-se as medições de turbidez dentro do reservatório de um agitador eletromecânico, que possui capacidade máxima para 100 L, este foi preenchido com 75 L de água destilada. O reservatório do agitador possuía as seguintes dimensões: profundidade 0,41 m, diâmetro menor 0,54 m, diâmetro maior 0,73 m e cor azul escuro. O agitador possui também, um motor de indução (1590 rpm) e um eixo central conectado ao motor na sua extremidade superior, e duas aletas agitadoras na extremidade inferior.

A Figura 3 mostra o protótipo do agitador, em que é possível observar as dimensões e o posicionamento das partes que o compõe.



**a** – Motor de indução; **b**- Barra transversal de madeira; **c**- Aletas; **d**- Drenos para coleta do material; **e**- Turbidímetros (modelo OBS 3+); **f** – Base de madeira para dar estabilidade ao agitador, formato de “cruz”

Figura 3. Corte vertical do agitador eletromecânico com indicação das dimensões e detalhes do interior

Os turbidímetros, foram identificados como T9118 e T9119, estes ficaram submersos na água, e posicionado no ponto médio da profundidade do reservatório d'água, presos a um suporte de madeira apoiado na borda do reservatório. Os sensores de turbidez foram espaçados a 20 cm um do outro e posicionados, de maneira que os dois sensores (fontes de radiação Infravermelha) ficaram orientados para lados opostos, pretendeu-se desta forma evitar interferência de um em relação ao outro. Esse arranjo experimental conjugado ao tamanho do reservatório garantiu uma distância suficiente da parede do reservatório (19 cm) à os sensores, evitando portanto, interferência da parede nas leituras de turbidez, visto que, o fabricante recomenda um distanciamento mínimo de 5 cm.

Observa-se na Figura 4A a estrutura utilizada para realização dos testes de turbidez, a Figura 4B mostra o agitador funcionando com água, pronto para receber os incrementos das frações, para variação da turbidez.

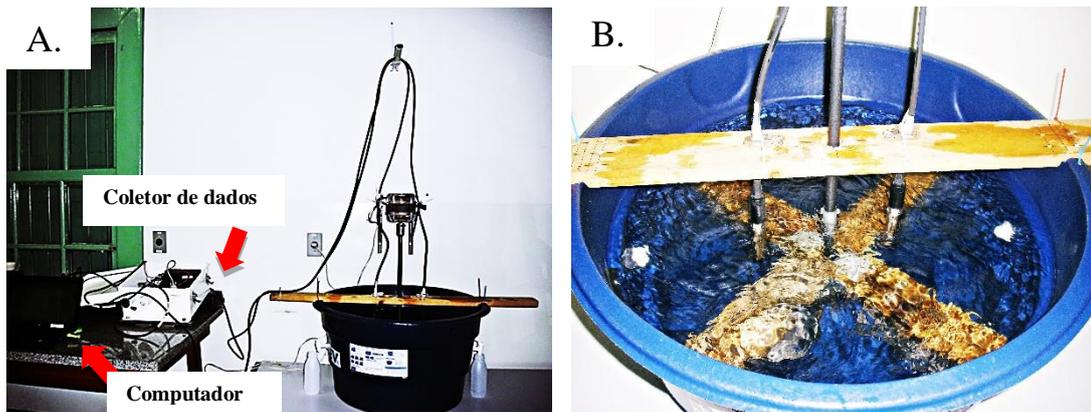


Figura 4. Estrutura para medição da turbidez com auxílio de um agitador eletromecânico (A) Agitador funcionando contendo 75 L de água (B)

Para a variação da turbidez foram realizados acréscimos do material fracionado, as quantidades foram determinadas, de acordo com as características granulométricas de cada uma, aumentando assim a concentração de sólidos suspensos na água do reservatório. Os incrementos de cada material fracionado foram efetuados individualmente por vinte vezes. O agitador eletromecânico proporcionou a homogeneização do material, e assim, que manteve os sólidos em suspensão

Uma vez mergulhadas na suspensão (água + material fracionado) e devidamente conectados ao coletor de dados, os sensores realizaram medições de turbidez (NTU). A cada 45 segundos era obtido um valor de turbidez, após a estabilização dos turbidímetros. Para cada suspensão procedeu-se com a coleta de dados por um período de 10 minutos com o agitador ligado e, mais 10 minutos com o motor desligado, para não forçar o motor. Para cada suspensão somou-se um tempo total de 21 minutos por teste (considerando 1 minuto de intervalo).

### 2.2.5. Determinação da concentração de sólidos suspensos

Determinou-se a concentração de sólidos suspensos (CSS) com a coleta de uma amostra total de 1500 mL, em cada suspensão, coletou-se individualmente porções de 150 mL de suspensão, sendo 5 amostras (750 mL) coletadas na direção de leitura do sensor T9118 e 5 na direção de leitura do sensor T9119. A coleta foi feita em recipiente plástico (polietileno), através de drenos (torneiras plásticas) acopladas ao reservatório do agitador, posicionadas na altura do leitor óptico dos turbidímetros (Figura 5).

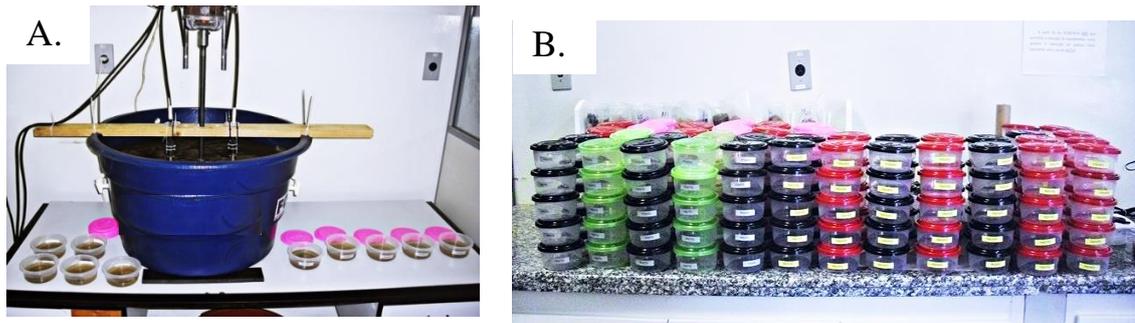


Figura 5. Coleta das 10 amostras de 150 mL para cada suspensão de solo (A) Recipientes (polietileno) utilizados para coleta da suspensão, somatório total 200 (B)

Todos os recipientes utilizados para a coleta, sendo dez por suspensão, formando um total de 200, foram individualmente pesados vazios, em balança de precisão (10 mg de resolução) para determinação da massa do recipiente ( $M_r$ ). A cada coleta da suspensão (150 g) foi feita a pesagem do material coletado, abaixo de cada dreno foi posicionada uma balança, onde pesou-se a suspensão coletada ( $M_s$ ), o peso do recipiente foi desconsiderando, devido uso da função (tara) da balança (Figura 6).



Figura 6. Balanças posicionadas abaixo dos drenos (esquerdo e direito)

Após obtenção da  $M_s$ , as amostras foram direcionadas à estufa para secagem a 80 °C, por um período máximo de 48 h (dois dias) esse período foi suficiente para a evaporação da água. Depois da evaporação total da água contida no interior dos recipientes realizou-se nova pesagem para obtenção da massa do recipiente com solo seco ( $M_{r,ss}$ ).

A obtenção da massa de solo seco ( $M_{ss}$ ) foi determinada pela diferença entre  $M_{r_{ss}}$  e  $M_r$ , temos:

$$M_{ss} = M_{r_{ss}} - M_r \quad \text{Eq. 5}$$

Em seguida, determinou-se a massa de água no recipiente ( $M_{ag}$ ), através da relação:

$$M_{ag} = M_s - M_{ss} \quad \text{Eq. 6}$$

Na sequência, a concentração real de sólidos suspensos ( $CSS_{real}$ ) foi determinada individualmente em cada recipiente a partir da seguinte relação:

$$CSS_{real} = \frac{M_{ss}}{V_{ag}} \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo o volume de água ( $V_{ag}$ ) obtido através da seguinte equação:

$$V_{ag} = M_{ag} \times d_{ag} \quad \text{Eq. 8}$$

O volume de água ( $V_{ag}$ ) também pode ser considerado igual a  $M_{ag}$ , pois por se tratar de água destilada considera-se a densidade da água ( $d_{ag}$ ) igual a 1.

Na sequência, a concentração real de sólidos suspensos ( $CSS_{real}$ ) foi determinada individualmente em cada recipiente a partir da seguinte relação:

$$CSS_{(real)} = \frac{M_{ss}}{V_{ag}} \quad \text{Eq. 9}$$

Sendo o volume de água ( $V_{ag}$ ) obtido através da seguinte equação:

$$V_{ag} = M_{ag} \times d_{ag} \quad \text{Eq. 10}$$

O volume de água ( $V_{ag}$ ) também pode ser considerado apenas como a  $M_{ag}$ , pois por se tratar de água destilada considera-se a densidade da água ( $d_{ag}$ ) igual a  $1 \text{ kg dm}^{-3}$ .

A CSS obtida dessa forma corresponde à CSS real no agitador, no momento da leitura da turbidez. Portanto, a CSS real é o valor a ser correlacionado com o sinal do sensor (V) e a turbidez (NTU) baseada na equação de calibração do sensor fornecida pelo fabricante.

Esperando-se encontrar uma CSS real diferente da CSS nominal (quantidade de solo determinada).

Para evitar possíveis erros, descartou-se as primeiras amostras coletadas em cada dreno, pois apresentaram valores maiores que os demais. Tal evento ocorreu devido ao arranjo experimental do agitador, que favoreceu o acúmulo de sedimentos nos drenos a cada incremento de solo. Foi realizado este procedimento para todas as suspensões.

### 2.2.7. Tratamento matemático- estatístico

A análise estatística dos dados incluiu:

(1) Comparação entre a concentração nominal ( $CSS_n$ ) e a concentração real de sólidos suspensos na água ( $CSS_r$ ). Essa comparação incluiu análise de regressão com a ferramenta ANÁLISE DE DADOS da planilha eletrônica EXCEL e o uso do indicador estatístico denominado índice de Willmott,  $d$  (Willmott et al., 1985);

O índice de Willmott varia de zero para nenhuma concordância a 1, quando a concordância perfeita. De acordo com Lopes et al. (2014), valores de  $d$  acima de 0,75 são satisfatórios e seu valor pode ser determinado como se segue:

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (11)$$

sendo:

$P_i$ = valor estimado

$O_i$ = valor observado

$O$ = média do valor observado

O afastamento entre os valores da  $CSS_n$  e  $CSS_r$  foi verificado através do erro relativo (ER) em cada suspensão, utilizando a Equação 12:

$$ER = \left( \frac{CSS_{real} - CSS_{nominal}}{CSS_{nominal}} \right) * 100 \quad (12)$$

(2) Os dados de turbidez da água e de concentração de sólidos suspensos foram submetidos a uma análise de regressão utilizando-se a mesma ferramenta citada acima. Do relatório de

ANOVA da regressão extraíram-se as constantes do modelo de regressão os respectivos testes estatísticos de significância do modelo.

(3) Por último, a análise dos dados incluiu a determinação de um fator F para estimativa da CSS. A determinação desse fator se deu como uma maneira alternativa para a estimativa da CSS, pois trata-se de um modelo matemático mais simples do que o modelo gerado pela regressão. Baseou-se na metodologia de Tomazoni et al. (2005), para a determinação desse fator, conforme a Equação 13:

$$F = \frac{CSS}{TB} \quad (13)$$

Onde,

CSS= concentração de sólidos suspensos ( $\text{g L}^{-1}$ );

TB= turbidez (NTU)

Posteriormente, determinou-se a média-aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) do fator F. Admitiu-se que o CV ideal do fator não deveria ultrapassar 30%.

### 3.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise das concentrações de sólidos suspensos

##### 3.1.1. Fração silte + argila (FG1)

A realização dos vinte incrementos de 50 g de silte + argila (FG1), até uma porção de 1000 g no reservatório, possibilitou a verificação a rápida flutuação da turbidez, com o acréscimo da FG1, mesmo na primeira suspensão. Os resultados das concentrações real encontrados foram menores que os valores da concentrações nominal, no entanto ficaram bem próximos (Tabela 3), isso se deve possivelmente a boa distribuição espacial das partículas mais finas.

Tabela 3. Concentração nominal e média da concentração real média, desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e erro relativo (ER), referente a cada suspensão da FG1= silte + argila.

Suspensão	C. Nominal ( $\text{gL}^{-1}$ )	Média		
		C. Real ( $\text{gL}^{-1}$ )	CV (%)	E. R. (%)
S0	0,00	0,00	0	0
S1	0,67	0,67 ± 0,15	22	0,6
S2	1,33	1,30 ± 0,20	16	2
S3	2,00	1,74 ± 0,11	7	13

S4	2,67	2,29 ± 0,12	4	14
S5	3,33	2,82 ± 0,12	5	15
S6	4,00	3,34 ± 0,26	8	14
S7	4,67	3,95 ± 0,10	3	15
S8	5,33	5,06 ± 1,9	37	5
S9	6,00	4,60 ± 1,34	29	24
S10	6,67	5,76 ± 0,28	5	13
S11	7,33	6,11 ± 0,11	2	17
S12	8,00	6,67 ± 0,24	4	17
S13	8,67	7,28 ± 0,24	3	16
S14	9,33	7,52 ± 1,07	14	19
S15	10,00	8,50 ± 0,34	4	15
S16	10,67	8,16 ± 1,98	24	23
S17	11,33	9,95 ± 0,60	6	12
S18	12,00	10,35 ± 0,29	3	14
S19	12,67	11,15 ± 0,89	8	12
S20	13,33	11,41 ± 0,64	6	14

Observa-se na Tabela 3, os resultados da análise de confiabilidade dos dados que geraram a equação de calibração para diversas faixas de CSS da FG1. Em todas as faixas das CSS os dados obtidos na FG1 apresentaram boa confiabilidade nas estimativas da CSS, apresentando desvio-padrão máximo de 1,98 g L<sup>-1</sup> e erro relativo máximo de 24 %. Os valores dos coeficientes de variação variaram entre 2 a 37 %, mínimo e máximo respectivamente.

Os resultados da concentração real possibilitou traçar gráficos correlacionando-os com os valores da concentração nominal. Gerou-se modelos de regressões de 1º grau, com elevado coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,992$ ) como pode ser visto na Figura 7.

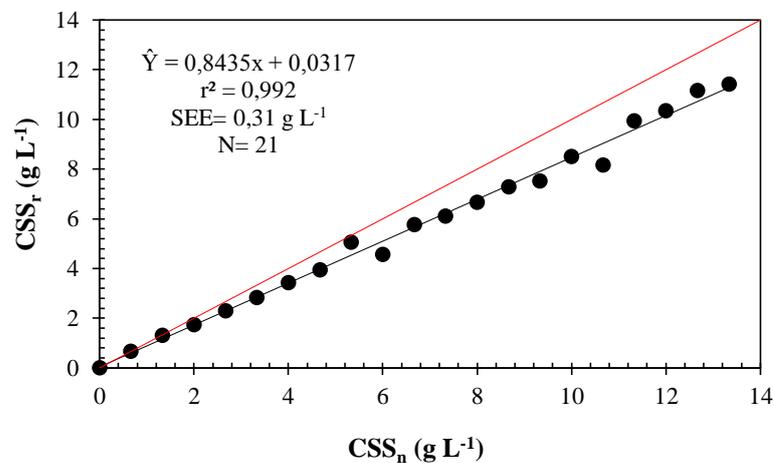


Figura 7. Relação entre a concentração nominal e a da concentração real da fração granulométrica FG1= silte + argila

O gráfico da Figura 7 mostra que houve correlação significativa entre as medidas de concentração nominal e a concentração real. O valor do índice de Willmott,  $d=0,97$  indica que houve uma boa concordância entre a concentração nominal e a concentração real, tendo em vista que, quanto mais se aproxima de 1 melhor. Além disso a reta 1:1 revela o quanto os valores da CSS real se afastou CSS nominal.

### 3.1.1.1. Correlação entre a concentração de sólidos suspensos e a turbidez na fração silte + argila (FG1)

Os resultados obtidos mostram a correlação significativa ( $p<0,05$ ), entre as medidas da CSS e a turbidez da água, tendo ajustado curvas com equações lineares, com elevado coeficiente de determinação ( $r^2=0,999$ ), como pode ser observado na Figura 8. Esse resultado corrobora com o encontrado por Marquis (2005), que também obteve em seus estudos uma correlação linear com elevado coeficiente de determinação ( $r^2=0,99$ ).

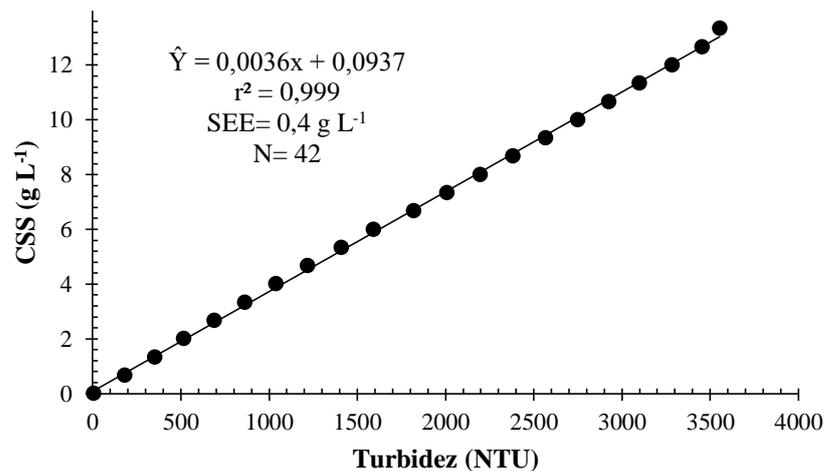


Figura 8. Correlação entre a média da turbidez da água e concentração de sólidos suspensos FG1= silte + argila

Observa-se no gráfico da Figura 8, como os dados se ajustaram bem ao modelo linear, demonstrando uma boa distribuição espacial das partículas. Esse resultado ratifica o que Clifford et al. (1995) e Downing (2008), relatam, em seus estudos, eles verificaram que partículas mais finas e de tamanhos constantes apresentam melhor distribuição espacial e com isso valores de turbidez mais estáveis.

O erro padrão da correlação entre a turbidez da água e concentração de sólidos suspensos foi de  $0,4 \text{ g L}^{-1}$ . Com esse modelo matemático é possível estimar a CSS dessa partícula, a partir da

turbidez medida nesse tipo de solo. Entretanto Tomazoni et al. (2005), propõe uma nova metodologia para a estimativa da CSS, em que é bem mais simples de ser executada.

A partir da CSS encontrada e da turbidez medida, gerou um fator F, que quando multiplicado a turbidez gera um valor referente a CSS na amostra estudada. Nesse contexto gerou-se o fator F para todas as faixas de turbidez e sua referida concentração de sólidos suspensos para a FG1, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4. Resumo dos dados para obtenção do fator de conversão  $g L^{-1}/NTU$  (Fator F) para FG1= silte + argila

Suspensão	Dados relativos ao fator $F = \frac{CSS_{real} (g L^{-1})}{Turbidez (NTU)}$			
	Turbidez (NTU)	Média do fator	Desvio - Padrão	CV (%)
S0	5,9	0	0,00000	0
S1	176,6	0,0038	0,00021	6
S2	339,1	0,0039	0,00022	6
S3	496,9	0,0040	0,00022	6
S4	661,8	0,0040	0,00024	6
S5	827,3	0,0040	0,00025	6
S6	995,2	0,0040	0,00025	6
S7	1165,2	0,0040	0,00027	6
S8	1343,4	0,0039	0,00028	7
S9	1530,1	0,0039	0,00022	6
S10	1742,2	0,0038	0,00024	6
S11	1922,2	0,0038	0,00024	6
S12	2099,6	0,0038	0,00025	6
S13	2276,4	0,0038	0,00025	7
S14	2449,9	0,0038	0,00026	7
S15	2614,9	0,0038	0,00028	7
S16	2776,7	0,0038	0,00030	8
S17	2937,1	0,0039	0,00030	8
S18	3118,0	0,0039	0,00029	8
S19	3282,6	0,0039	0,00029	7
S20	3393,0	0,0039	0,00027	7
média		0,0037	0,00086	23

Verifica-se que os valores de F, foram muito semelhante. O F médio ( $F= 0,0037$ ), pode indicar que o F médio pode ser utilizado sem maiores prejuízo. Entretanto o mais indicado é a utilização do fator F, referente a cada faixa de turbidez.

Quando se compara os dois métodos de estimativa da CSS, nota-se uma suave diferença, que fica melhor expressa na Figura 9.

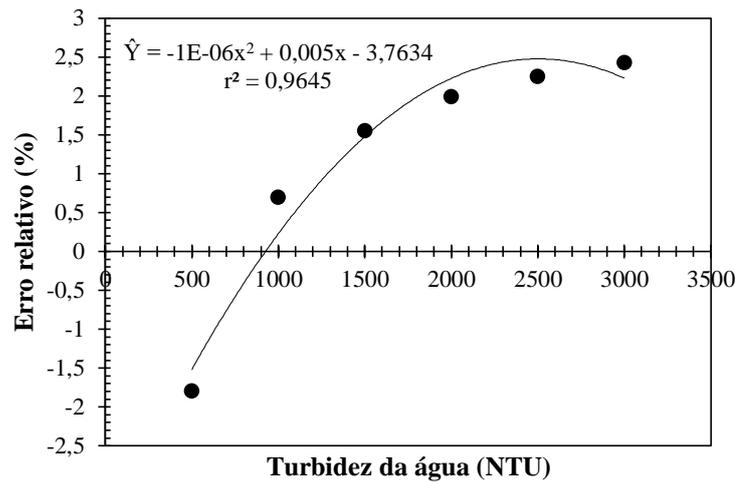


Figura 9. Correlação entre a turbidez da água e o erro relativo entre a concentração nominal e a concentração real ( $ER = [CSS_r - CSS_n / CSS_n] * 100$ ), para FG1= silte + argila

A Figura 9 mostra a correlação entre a turbidez medida e o erro relativo entre os dois métodos. Nota-se que a medida em que a turbidez vai aumentando o fator F médio ( $F = 0,0037$ ) apresenta uma tendência a superestimar a CSS, porém, quando a turbidez é baixa a tendência é contrária. Muito embora haja essa tendência, os valores encontrados no teste não foram tão destoante.

### 3.1.2. Fração areia fina + areia muito fina (FG2)

Dentre as frações granulométricas utilizadas a FG2 (areia fina + areia muito fina) é a de tamanho intermediário. Foram realizados 20 incrementos de 100 g da fração ao longo do teste, no entanto, devido à baixa resposta dos sensores de turbidez, a partir da suspensão S11 os incrementos foram duplicados, totalizando um valor de 3000 g de sedimento no reservatório do agitador. Observa-se na Tabela 5, os dados obtidos, os valores de concentração real ficaram menores que os valores da concentração nominal.

Tabela 5. Concentração nominal e média da concentração real média, desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e erro relativo (ER), referente a cada suspensão da FG2= areia fina + areia muito fina

Suspensão	C. Nominal (g L <sup>-1</sup> )	Média		
		C. Real (g L <sup>-1</sup> )	CV (%)	E.R (%)
S0	0,00	0,00	0	0
S1	1,33	1,13 ± 0,06	19	15
S2	2,67	2,24 ± 0,08	5	16
S3	4,00	3,47 ± 0,17	6	13

S4	5,33	4,54 ± 0,45	4	15
S5	6,67	5,69 ± 0,42	4	15
S6	8,00	6,93 ± 1,29	7	13
S7	9,33	7,95 ± 1,77	8	15
S8	10,67	9,04 ± 2,31	8	15
S9	12,00	9,93 ± 4,54	6	17
S10	13,33	11,28 ± 3,38	7	15
S11	16,00	13,39 ± 4,71	3	16
S12	18,67	16,14 ± 8,42	6	13
S13	21,33	18,42 ± 9,52	5	14
S14	24,00	22,40 ± 4,37	11	7
S15	26,67	24,05 ± 5,24	5	10
S16	29,33	27,68 ± 5,69	3	6
S17	32,00	30,35 ± 6,34	8	5
S18	34,67	32,93 ± 8,01	5	5
S19	37,33	34,48 ± 7,77	9	8
S20	40,00	35,43 ± 8,28	16	11

Apesar da diferença entre a concentração real e a concentração nominal, os valores se aproximaram, demonstrando uma boa distribuição espacial das partículas dentro do reservatório do agitador. Ainda na Tabela 5 observa-se a análise de confiabilidade dos dados que geraram a equação de calibração para diversas faixas de CSS da FG2, o desvio-padrão máximo encontrado foi de 8,28 g L<sup>-1</sup>. Já os coeficientes de variação variaram entre 3 e 19 %. O erro relativo mostra percentualmente a diferença entre a CSS real e a CSS nominal, a diferença máxima encontrada foi 17 %.

A correlação entre a concentração real e a nominal gerou um modelo matemático de primeiro grau com alto coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,997$ ), pode ser observada na Figura 10.

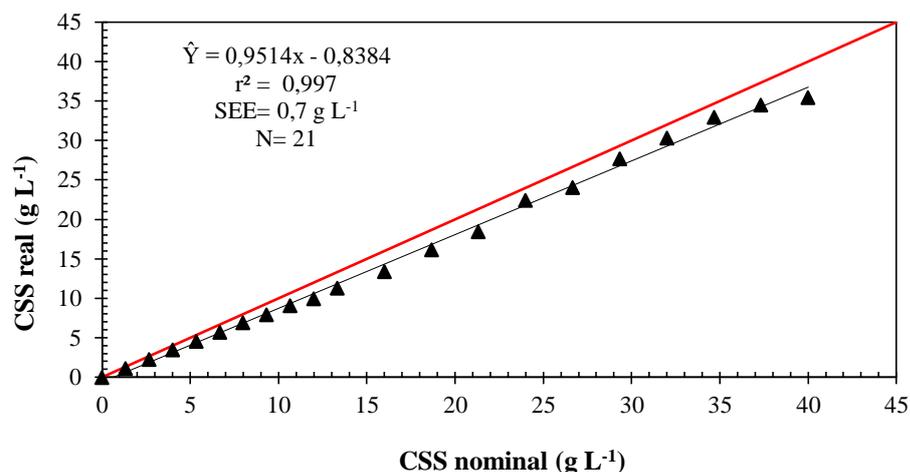


Figura 10. Correlação entre a concentração nominal e a concentração real, da fração granulométrica FG2= areia fina + areia muito fina

Observa-se na Figura 10 que houve boa correlação entre as concentrações nominal e real. O valor do índice de Willmott encontrado ( $d= 0,95$ ) indica uma ótima concordância entre os valores da CSS real com a CSS nominal. Além disso, na reta 1:1, verifica-se o quão próximo a CSS real ficou da CSS nominal.

### 3.1.2.1. Correlação entre a concentração de sólidos suspensos e a turbidez na fração areia fina + areia muito fina (FG2)

A correlação entre os valores de CSS e os valores de turbidez foi significativa a ( $p<0,05$ ), e o modelo quadrático foi o que melhor ajustou os dados (Figura 11). Diferentemente de Marquis (2005), que também utilizou o mesmo material, no caso dele o modelo que melhor ajustou os dados foi o modelo de primeiro grau.

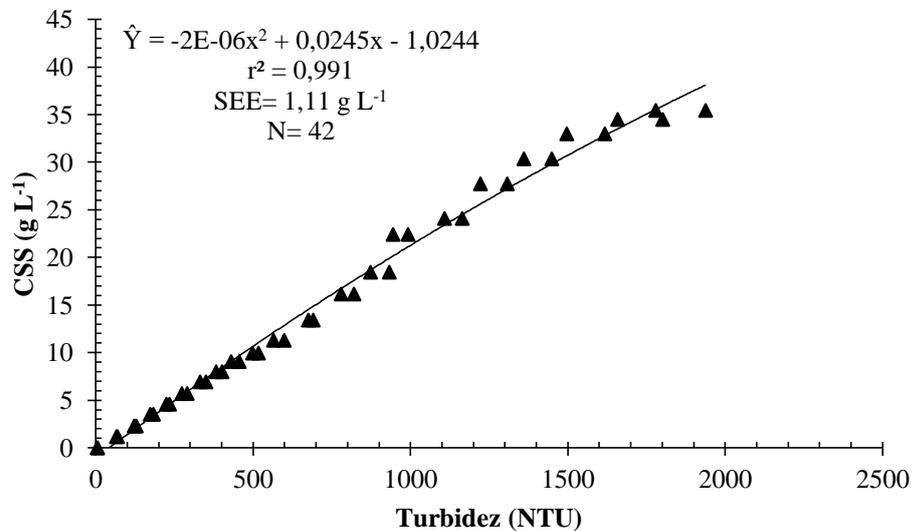


Figura 11. Correlação entre a turbidez da água e a concentração de sólidos suspensos FG2= areia fina + areia muito fina

Observa-se na Figura 11 a correlação entre os valores de CSS e turbidez, o ajuste da equação quadrática, com elevado coeficiente de determinação ( $r^2= 0,991$ ).

Estudos feitos por Conner & Visser (1992), sobre a resposta dos sensores de retroespalhamento óptico em relação ao tamanho das partículas, mostram que dentre as partículas avaliadas, as de diâmetro geométrico intermediário (0,074 a 0,106 mm), tamanho semelhante ao da areia fina (0,005 a 0,42 mm), foram as que apresentaram regressões com

menor erro padrão. O erro padrão encontrado foi 1,11 g L<sup>-1</sup>, em estudos com solo Minella et al. (2008) encontraram erros padrão entre 33 e 208 mg L<sup>-1</sup> em calibrações realizadas *in situ*.

O modelo matemático de segundo, é o que melhor ajusta os dados obtidos, proporcionando assim, uma estimativas da CSS de maneira mais fidedigna a realidade. Entretanto, por ter mais variáveis, torna-se um modelo mais difícil de se utilizar. Assim é importante comparar com a metodologia proposta por Tomazoni et al. (2005), como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6. Resumo dos dados para obtenção do fator de conversão g L<sup>-1</sup>/NTU (Fator F) para FG2= areia fina +areia muito fina

Suspensão	Dados relativos ao fator $F = \frac{CSS_{real} (g L^{-1})}{Turbidez (NTU)}$			
	Turbidez (NTU)	Média do fator	Desvio- padrão	CV (%)
S0	4,2	0,0000	0,0000	0
S1	67,0	0,0169	0,0007	4
S2	124,6	0,0180	0,0007	4
S3	177,4	0,0196	0,0008	4
S4	228,7	0,0199	0,0007	4
S5	281,8	0,0202	0,0009	4
S6	340,4	0,0204	0,0008	4
S7	391,2	0,0203	0,0007	4
S8	442,9	0,0204	0,0008	4
S9	506,8	0,0196	0,0005	3
S10	581,3	0,0194	0,0008	4
S11	683,4	0,0196	0,0003	2
S12	799,6	0,0202	0,0007	4
S13	902,1	0,0204	0,0010	5
S14	968,2	0,0231	0,0008	3
S15	1136,0	0,0212	0,0007	3
S16	1264,1	0,0219	0,0010	5
S17	1404,0	0,0216	0,0010	4
S18	1557,4	0,0212	0,0012	5
S19	1730,3	0,0200	0,0012	6
S20	1858,3	0,0191	0,0011	6
média		0,0192	0,0046	24

Nota-se que os valores de F variaram mais do que na fração anterior, no entanto os coeficiente de variação foram baixos, abaixo do limite máximo estabelecido 30 %. Mesmo o fato F médio (F= 0,0192), em que obteve um CV, maior que os demais, ainda é considerado propício para ser utilizado. Assim, ao comparar com este método de estimativa da CSS com o modelo matemático ajustado, verificou-se uma tendência semelhante a fração anterior, porém com algumas diferenças relevantes, como pode ser observado na Figura 12.

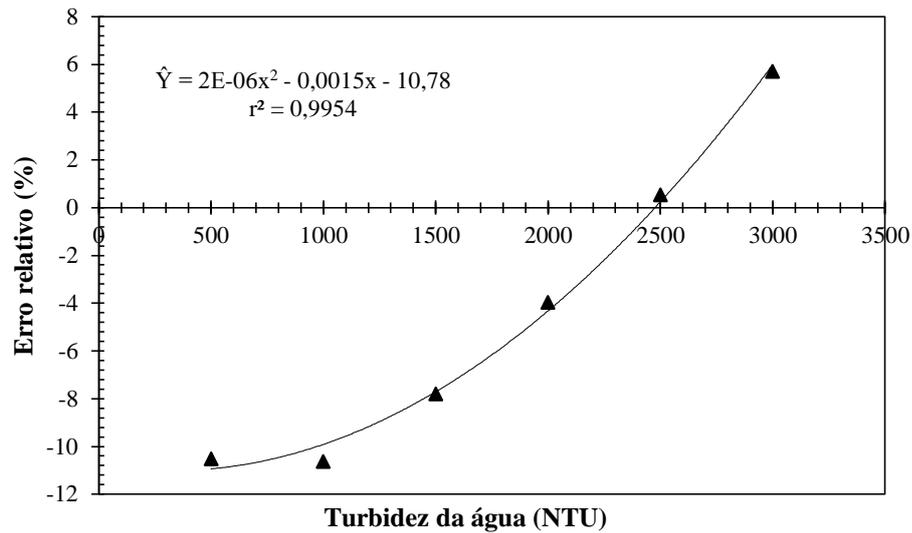


Figura 12. Correlação entre a turbidez da água e o erro relativo entre a concentração nominal e a concentração real ( $ER = [CSS_r - CSS_n / CSS_n] * 100$ ), para a FG2= arei fina + areia muito fina

Verifica-se na Figura 12 que o fator F médio, apresenta a mesma tendência a subestimar e superestimar valores da CSS. Entretanto, para esta fração ele tende a subestimar a CSS à uma faixa de turbidez de até 2500 NTU. A partir de então, tende a superestimar valores da CSS. Novamente a diferença entre os valores estimados pela equação e o fator F foram pouco relevantes.

### 3.1.3. Fração areia grossa + areia média (FG3)

A fração areia grossa + areia média (FG3) possui maior granulometria, em relação as frações anteriores. Downing, (2008) ressalta que, os sensores de retroespalhamento óptico apresentam melhores respostas as partículas mais finas. Por esse motivo, para a variação da turbidez, foi utilizado uma maior quantidade desse material, somando um total de 4500 g de areia grossa + areia média, no reservatório do agitador, fracionado em vinte incrementos (Tabela 7).

Tabela 7. Concentração nominal e média da concentração real, desvio padrão, Coeficiente de variação (CV) e erro relativo (ER), referente a cada suspensão da FG3= areia grossa + areia média.

Suspensão	C. Nominal (g.L <sup>-1</sup> )	Média		
		C. Real (g.L <sup>-1</sup> )	CV (%)	E. R. (%)
S0	0,00	0,00	0	0,00
S1	2,00	1,89 ± 0,79	42	5
S2	4,00	3,23 ± 0,64	20	19
S3	6,00	4,99 ± 0,43	9	17
S4	8,00	6,80 ± 0,76	11	15

S5	10,00	8,52 ± 1,34	16	15
S6	12,00	11,30 ± 0,81	7	6
S7	14,00	12,67 ± 1,28	10	9
S8	16,00	15,48 ± 4,49	22	3
S9	18,00	15,75 ± 2,79	18	12
S10	20,00	18,25 ± 0,94	5	9
S11	24,00	21,03 ± 3,87	18	12
S12	28,00	25,22 ± 5,31	21	10
S13	32,00	32,38 ± 3,85	12	1
S14	36,00	29,51 ± 1,79	6	18
S15	40,00	30,56 ± 5,46	18	24
S16	44,00	36,17 ± 9,22	25	18
S17	48,00	36,58 ± 2,00	5	24
S18	52,00	40,56 ± 9,66	24	22
S19	56,00	45,97 ± 8,18	18	18
S20	60,00	44,46 ± 8,72	20	26

Dentre as frações granulométricas estudadas a fração areia grossa + areia média (FG3) foi a que apresentou um maior distanciamento da concentração nominal. Esse distanciamento se deve possivelmente a dificuldade em manter esse tipo de partícula em suspensão de maneira homogênea. Assim avaliando a significância dos resultados, verifica-se desvios- padrão entre 0,4 e 9 g L<sup>-1</sup>, e o coeficiente de variação ficou na faixa de 5 a 24 %. Já o erro relativo máximo foi de 26 %,

Verifica-se na no gráfico da Figura 13 que na fração areia grossa + areia média houve uma maior dispersão dos dados, por isso o modelo de segundo grau foi o que melhor ajustou os dados, e obteve-se um coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,989$ ).

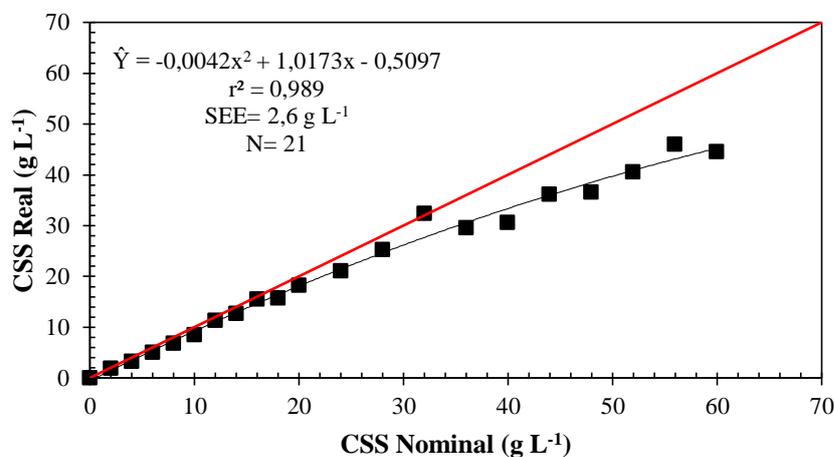


Figura 13. Relação entre a concentração nominal e a concentração real da fração granulométrica FG3= areia grossa + areia média.

Observa-se ainda no gráfico da Figura 13 o afastamento da concentração real em relação a concentração nominal, através da reta 1:1, nota-se que a medida em que se aumenta a concentração maior o afastamento e a dispersão dos dados, isso deve possivelmente por a medida em que se aumenta a quantidade, maior a dificuldade em manter esse tipo de material em suspensão de maneira homogênea, mesmo com auxílio de um agitador eletromecânico. Entretanto, apesar da desse afastamento o índice de Willmott ( $d=0,81$ ), indica que houve uma boa concordância entre as concentrações real e nominal.

### 3.1.3.1. Correlação entre a concentração de sólidos suspensos e a turbidez na fração areia grossa + areia média FG3

Os resultados da CSS e os valores de turbidez quando correlacionados gerou um gráfico em que a equação segundo grau foi a que melhor ajustou os dados, obtendo-se um elevado coeficiente de determinação ( $r^2=0,987$ ) como pode ser observado na Figura 14.

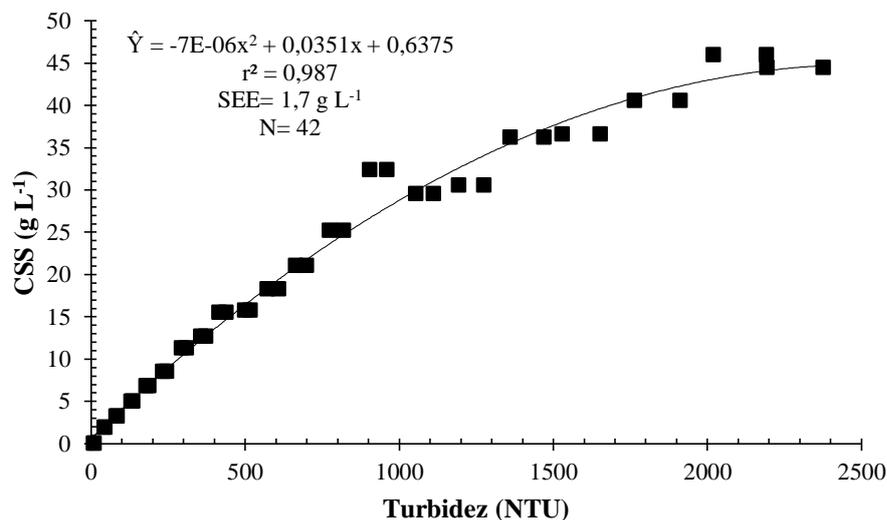


Figura 14. Relação entre a concentração nominal e a concentração real da fração granulométrica FG3= areia grossa + areia média.

Tendo em vista que sensores do tipo OBS 3+ tem sua sensibilidade diminuída quando as partículas são maiores, a maior concentração de sedimentos de maior diâmetro pode ter influenciado na resposta do sensor. Clifford et al. (1995) explicam esse fenômeno quando dizem que, quando os sedimentos mais grossos são mantidos em suspensão intermitentemente a precisão do turbidímetro pode ser diminuída, proporcionando uma maior dispersão dos dados sobre uma única curva

Além disso, a fração FG3 foi a que apresentou maior erro padrão, em relação as demais, chegando a  $1,7 \text{ g L}^{-1}$ . Esse resultado foi semelhante ao encontrado por Minella et al. (2008) eles encontraram erros padrão de até  $208 \text{ mg L}^{-1}$ , mas em calibrações realizadas *in situ*, e feita com o solo. Nesse contexto, como uma outra alternativa para a estimativa da CSS da FG3, foi calculado do valor de F para a FG3, como pode ser verificado na Tabela 8.

Tabela 8. Resumo dos dados para obtenção do fator de conversão  $\text{g L}^{-1}/\text{NTU}$  (Fator F) para FG3= areia grossa + areia média

Suspensão	Dados relativos ao fator $F = \frac{CSS_{real} (\text{g L}^{-1})}{Turbidez (\text{NTU})}$			CV (%)
	Turbidez (NTU)	Media do fator	Desvio- padrão	
S0	8,6	0,0000	0,0000	0
S1	42,9	0,0441	0,0008	2
S2	82,3	0,0392	0,0009	2
S3	132,0	0,0378	0,0008	2
S4	182,8	0,0372	0,0012	3
S5	238,3	0,0358	0,0011	3
S6	300,7	0,0376	0,0013	3
S7	363,6	0,0349	0,0011	3
S8	425,6	0,0364	0,0014	4
S9	506,9	0,0311	0,0008	2
S10	590,3	0,0310	0,0014	4
S11	681,3	0,0309	0,0011	4
S12	796,3	0,0317	0,0013	4
S13	931,3	0,0348	0,0015	4
S14	1081,7	0,0273	0,0010	4
S15	1233,7	0,0248	0,0012	5
S16	1414,2	0,0256	0,0014	5
S17	1590,9	0,0230	0,0013	5
S18	1837,8	0,0221	0,0013	6
S19	2104,7	0,0219	0,0013	6
S20	2284,4	0,0195	0,0011	6
Media		0,0298	0,0068	23

O fator F médio ( $F= 0,0298$ ) da FG3 apresentou um coeficiente de variação menor que as demais frações. Por se tratar de um método de estimativa menos elaborado e mais simples de se utilizar, é importante comparar com o método padrão (modelo matemático gerado pela regressão). Assim no gráfico da Figura 15, nota-se a diferença, através da correlação entre valores de turbidez e o erro relativo entre os dois métodos.

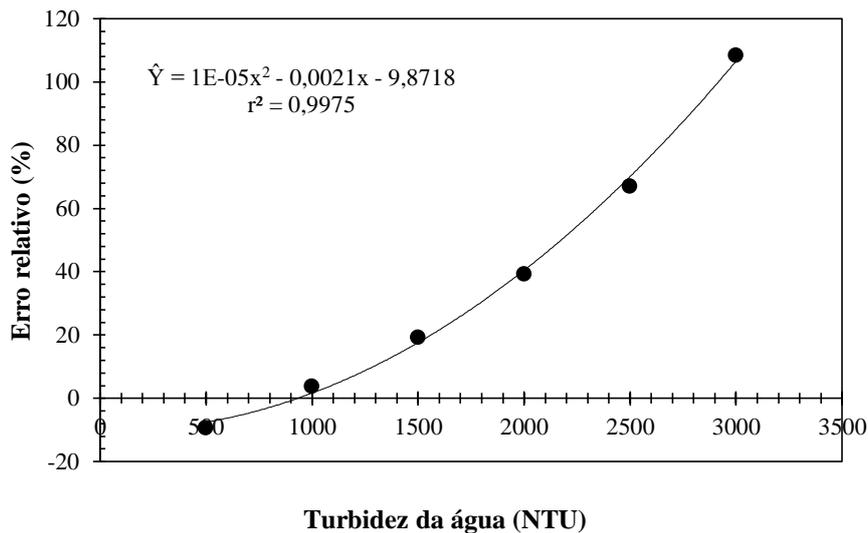


Figura 15. Correlação entre a turbidez da água e o erro relativo entre a concentração nominal e a concentração real ( $ER = [(CSS_f - CSS_r) / CSS_r] * 100$ ), para a FG3= areia grossa + areia média

Em todas as frações estudadas nota-se que o fator F médio apresenta uma tendência a sub e superestimar valores da CSS. Entretanto, de acordo com a fração granulométrica, esta tendência pode ser maior para subestimar, hora pode apresentar uma inclinação à superestimar mais do que subestimar, como é o caso da FG3. Em que, numa faixa de turbidez de 1000 NTU este tende a superestimar a CSS.

### 3.2. Comparativo entre as frações granulométricas

A resposta dos sensores de turbidez que trabalham com retroespalhamento óptico para os sedimentos em suspensão, pode ser influenciada pela concentração, tamanho, cor e forma das partículas. Depois da concentração, o tamanho das partículas é o segundo fator que mais influência na sensibilidade desse tipo de sensor de turbidez. Sendo esta diminuída a medida que se aumenta o diâmetro das partículas (Sutherland, et al. 2000; Downing, 2008). Tal fenômeno pode ser observado na Figura 16, em que mostra a dispersão dos dados de turbidez correlacionado com a CSS referente a cada fração granulométrica e o solo como um todo.

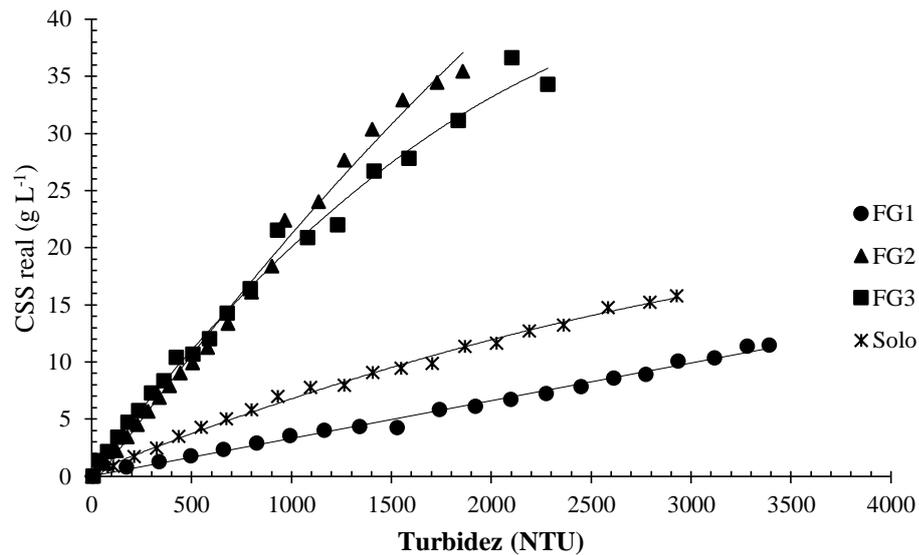


Figura 16. Relação entre a turbidez e a concentração de sólidos suspensos para diferentes frações granulométricas: FG1= silte + argila, FG2= areia fina + areia muito fina, FG3= areia grossa + areia muito grossa e solo

A Figura 16 mostra a correlação entre a turbidez da água e a CSS referente a cada fração granulométrica e do solo. Nota-se que com partículas menores, como silte e argila (FG1), os turbidímetros respondem melhor, mesmo com baixa concentração de sólidos suspensos na água. No entanto, o mesmo não acontece com frações maiores como a areia (FG2 e FG3), assim, os valores de turbidez mais elevados para esse tipo de material só foi obtido nas maiores concentrações. Já para o solo, que se tratar de uma mistura de todas as frações granulométrica, nota-se que fica posicionado entre a FG1 e as FG2 e FG3.

Os resultados encontrados condizem com Sutherland et al. (2000), sendo explicado que o fluxo radiação espalhada por uma partícula em suspensão está em função da concentração em massa e do tamanho das partículas, assim, a resposta dos turbidímetros de retroespalhamento ópticos é proporcional a concentração de sólidos, bem como a eficiência de espalhamento da partícula, porém, é inversamente proporcional ao diâmetro e a densidade da partícula.

Assim pode-se afirmar que quanto maior o diâmetro e a densidade da partícula, mais lenta será a resposta desse tipo de sensor de turbidez, sendo então necessário uma maior concentração de sólidos suspensos. Já para as partículas de menor diâmetro a resposta dos turbidímetros é bem mais rápida, mesmo com baixa CSS.

Nota-se também que os resultados obtidos concordam com o proposto por Clifford et al. (1995), em que relatam que os turbidímetros tem sua sensibilidade é diminuída a medida em que se aumenta o tamanho das partículas. Assim, quanto maior as partículas, e mais alta a concentração maior a dispersão dos dados. Para cada fração foi possível gerar equações com alto coeficiente de determinação, como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9. Equações obtidas através da correlação entre os turbidez e a concentração de sólidos suspensos, para cada fração granulométrica e o solo.

FRAÇÃO	EQUAÇÃO	r <sup>2</sup>
FG1	$\hat{Y} = 0,0036x + 0,0937$	0,999
FG2	$\hat{Y} = -2E-06x^2 + 0,0245x - 1,0244$	0,991
FG3	$\hat{Y} = -7E-06x^2 + 0,0351x + 0,6375$	0,987
Solo	$\hat{Y} = -8E-07x^2 + 0,0085x + 0,4072$	0,994

FG1= silte + argila; FG2= areia fina + areia muito fina; FG3= areia grossa + areia média.

Observa-se na Tabela 9 que para a fração granulométrica de menor diâmetro (FG1) o modelo linear foi o que melhor ajustou os dados, talvez porque as partículas de menor diâmetro tendem a permanecer mais tempo em suspensão e de modo mais estável. Entretanto, a medida em que se aumenta o diâmetro das partículas, maior a dispersão dos dados, como na fração granulométrica de maior diâmetro (FG3). Para as frações areia fina + areia muito fina (FG2) e areia grossa + areia média (FG3) o modelo matemático que melhor se ajustou os dados foi o modelo quadrático. No caso do solo, o modelo quadrático também foi o que melhor ajustou os dados, talvez porque trata-se de partículas de diversos tamanhos, é importante salientar que o solo utilizado é do tipo franco-argilo-arenoso, e que as partículas mais finas como silte e argila compõe apenas 34 % do solo.

É válido salientar que, além das equações encontradas, a metodologia proposta por Tomazoni et al. (2005) torna-se uma alternativa para se estimar a CSS, quando não for possível a utilização de um método mais preciso.

#### 4.0. CONCLUSÕES

1. O método de calibração de turbidímetro laboratorial utilizando sedimento seco (dry-sediment), feito com o auxílio de um agitador eletromecânico, possibilitou gerar equações representativas para a estimativa da turbidez, nas diferentes frações granulométricas.
2. A turbidimetria pode ser utilizada para estimativa da CSS desde que os turbidímetros estejam devidamente calibrados.
3. A utilização do agitador eletromecânico possibilitou simular eventos de alta turbulência com elevada concentração sólidos suspensos, em diferentes tipos de fração granulométrica, e verificar a resposta dos turbidímetros para as mesmas.
4. A respostas dos turbidímetros que possuem a princípio de funcionamento através do retrospalhamento óptico, é mais rápida para as frações granulométricas de menor diâmetro, a

medida em que se aumenta o diâmetro das partículas, os mesmos tem sua sensibilidade diminuída.

5. Obteve-se regressões lineares e quadráticas na correlação entre os valores de turbidez medidos pelos turbidímetros e a concentração sólidos suspensos, com elevados coeficientes de determinação. Sendo que para as frações granulométricas menores (FG1= silte + argila) a equação linear a foi a que melhor ajustou os dados. Já para as frações com diâmetro maior (FG3= areia grossa + areia média e FG2= areia fina + areia muito fina) e para o solo o modelo quadrático foi o que melhor ajustou os dados.

6. Além dos modelos matemáticos o fator F encontrado também possibilita estimar a CSS em todas as frações.

## **5.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Campbell Scientific. OBS-3+ and OBS300 suspended solids and turbidity monitors Operator's manual. <<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/obs-3+.pdf>>. 10 Fev. 2015.

Clifford, N. J.; Richards, K. S.; Brown, R. A.; Lane, S. N. Laboratory and field assessment of an infrared turbidity probe and its response to particle size and variation in suspended sediment concentration. *Journal Hydrological Sciences* v. 40, p.771-791, 1995.

Conner, C.S. & DE Visser, A.M. A laboratory investigation of particle size effects on an optical backscatterance sensor. *Marine Geology*, v.108, p.151-159, 1992.

Dabney, S. M.; Locke, M. A.; Steinriede, R. W. Turbidity sensors track sediment concentrations in runoff from agricultural fields. In: *Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC). Proceedings...* Reno: JFIC, 2006. p. 345-352.

Downing, J. Effects of sediment size on OBS measurements. Note Application Campbell Scientific. United States, p. 4, 2008.

Fill, H. D.; Santos, I. Estimativa de concentração de sedimentos em suspensão através da profundidade de Sechi. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Língua Oficial Portuguesa. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2001. p.1-9.

Lopes, F. B.; Barbosa, C. C. F.; Novo, E M. L. de M.; Andrade, E. M. de; Chaves, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiper espectral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.13–19, 2014.

Marquis. P. Turbidity and Suspended Sediment as Measures of Water Quality. *Streamline Watershed Management Bulletin*, v.9, p.21-23, 2005.

Minella, J. P. G.; Merten, G. H.; Reichert, J. M.; Clarke, R. T. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. *Hydrological Processes*, v.22, p.1819-1830, 2008.

Sutherland, T. F.; Lane, P. M.; AMOS, C. L. Downing, J. The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. *Marine Geology*, v.162, p. 587–597, 2000.

Navratil, O.; Esteves, M.; Legout, C.; Gratiot, C.; Nemery, J.; Willmore, S.; Grangeon, T. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology*, v.398, p.246-259, 2011.

Pinheiro, E. A. R.; Araújo, J. C.; Fontenele, S. de B.; Lopes, W. B. Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida. *Water Resources and Irrigation Management*, v.2, p.103-110, 2013.

Sadar, M. Turbidity instrumentation - an overview of today's available technology. In: *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*, 2002, Reno.

Sea-Bird Electronics. Entering calibration coefficients for Campbell Scientific/D&A OBS-3+ Optical Backscatter Sensor. Application note N° 81, Washington, D. C., 2010. 2p.

St-Hilaire, A.; Courtenay, S. C.; Delgado, C. D.; Pavey, B; Ouarda, T. B.M.J.; Boghen, A.; Bernard, B. Suspended sediment concentrations downstream of a harvested peat bog: Analysis and Preliminary Modelling of Exceedances Using Logistic Regression. *Canadian Water Resources Journal* v. 31, p. 139-156, 2006.

Tomazoni, J. C.; Mantovani, L. E.; Bittencourt, A. V. L.; Rosa Filho, E. F. da. Utilização de medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica nas

bacias dos rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha Rica e Jirau – sudoeste do estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, v.57, p. 49-56, 2005. .

Willmott, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, R. E.; Feddema, J. J.; Klink, K. M.; Legates, D. R.; Rowe, C. M.; O'donnell, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research, v.90, p.8995-9005, 1985.

Yao, M.; Nan, J.; Chen, T. Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes. Desalination v.354, p. 116-124, 2014.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A turbidez da água pode estar associada a problemas como assoreamento de barragens e reservatórios, bem como, arraste de nutrientes e contaminantes, edegração de ambientes aquáticos, pois está associada ao transporte de sedimentos. Logo, é importante que sejam realizados estudos que proporcione a avaliação dos fatores que influenciam esse parâmetro, sendo importante para a caracterização de bacias hidrográficas, bem como a quantificação dos impactos gerados, principalmente os derivados das ações antrópicas.

A nefelometria é uma técnica de mensuração da turbidez, que permite coletar dados de maneira rápida e eficaz, mesmo em grandes áreas. Entretanto, para que os dados coletados sejam o mais fidedigno possível, os instrumentos utilizados para fazer esse tipo de avaliação (turbidímetros de retroespalhamento óptico), precisam estar devidamente testado e calibrado.

A partir dos resultados obtidos nesses estudo, recomenda-se que sejam feitas pesquisas que melhor explore as peculiaridades dos sensores de turbidez, tendo em vista que vários fatores podem influenciar as medidas de turbidez. Quanto mais fidedigno os resultados, mais eficiente os métodos estimativos que utilizam esses valores. Assim, favorecerá o monitoramento e a caracterização dos cursos d'água, e facilitando o manejo adequado de mananciais.

# **Anexos**

# Anexo I



**Mazdioca e Fruticultura**  
Laboratório de Física do Solo

**Resultados de análises físicas do solo**

---

Nome do Interessado: \_\_\_\_\_  
Endereço: \_\_\_\_\_  
Município: \_\_\_\_\_  
Data: \_\_\_\_\_

Dante Sampaio Chagas  
Faz. Capivari  
Cruz das Almas  
3/11/2014

---

Estado: BA

---

Nº amostra	Lab.	Identificação	Composição granulométrica (g/kg)					Dispersão com NaOH			Classificação textural	Argila H <sub>2</sub> O (g/kg)	Grau de Floculação (%)	Retenção de água - U <sub>g</sub> (%)			Densidade (kg/dm <sup>3</sup> )	Partículas		
			Ar-muito grossa	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Ar-muito fina	Areia total	Silt	Argila				0,1 mm	16 mm	Água disp.				
-15694	#	1	80	166	208	147	76	668	128	214	Franco argilo arenoso	#	#	#	#	#	#	#	2,46	#
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#

  
**Laércio Duarte Souza**  
 Responsável Laboratório de Física do Solo

Rua Embrepa, s/n - CP 007 - 44.380-000 - Cruz das Almas - BA

Tel: (75) 3312-8075 - www.cnpml.embrapa.br - sac@cnpml.embrapa.br

## Anexo II

**Embrapa**

Mandioca e Fruticultura

LABORATÓRIO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS  
RESULTADO DE ANÁLISE QUÍMICA DE SOLO

<b>Padrões de Fertilidade</b>				
<i>pH em água</i>				
<i>Acidez elevada</i> < 5,0	<i>Acidez média</i> de 5,1 a 6,0	<i>Acidez Fraca</i> de 6,1 a 6,9	<i>Neutro</i> igual a 7,0	<i>Alcalinidade Fraca</i> De 7,1 a 7,4
<b>Concentração de nutrientes</b>				
	<i>Baixa</i>	<i>Média</i>	<i>Média- alta</i>	<i>Alta</i>
<i>Fósforo mg/dm<sup>3</sup></i>	0 a 6	7 a 13	14 a 20	> 20
<i>Potássio cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup></i>	0 a 0,07	0,08 a 0,15	0,15 a 0,23	> 0,23
<i>Cálcio cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup></i>	0 a 2,0	2,0 a 4,0		> 4,0
<i>Magnésio cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup></i>	0 a 0,4	0,5 a 1,0		> 1,0
<i>Alumínio cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup></i>	0 a 0,3	0,4 a 1,0		> 1,0
<i>Cobre mg/dm<sup>3</sup></i>		0,8 a 1,2		
<i>Ferro mg/dm<sup>3</sup></i>		19,0 a 30,0		
<i>Zinco mg/dm<sup>3</sup></i>		1,0 a 1,5		
<i>Manganês mg/dm<sup>3</sup></i>		6,0 a 8,0		

<b>Métodos analíticos</b>
<b>Extratores/Método</b>
<i>Mehlich-1: P, K e Na disponíveis</i>
<i>Mehlich -1: Micronutrientes (Cu, Fe, Zn e Mn) disponíveis</i>
<i>KCl 1M: Ca, Mg e Al trocáveis</i>
<i>Ca(CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O 0,5M: Acidez potencial (H+Al)</i>
<i>Colorimétrico: Matéria orgânica (MO)</i>



Mandioca e Fruticultura

LABORATÓRIO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS  
**RESULTADO DE ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO**

Interessado: DENIZE SAMPAIO CHAGAS

Propriedade (Sítio ou Fazenda) CAPIVARI

Município: CRUZ DAS ALMAS

Estado: BA

Entrada: 22/10/2014

**OBS:** As análises de micronutrientes foram repetidas e confirmadas

Registro	Ref. de Amostragem	Resultados Analíticos-Fertilidade Macronutrientes										Micronutrientes							
		pH	P	K	Ca	Mg	Ca+Mg	Al	Na	H+Al	SB	CTC	V	M_O	Cu	Fe	Zn	Mn	
		cm água	cm CaCl <sub>2</sub>	mg/dm <sup>3</sup>															
12-8051	UNICA-030	4,6	--	6	0,25	2,15	1,76	3,91	0,9	0,36	5,50	4,52	10,02	45	22,0	1,86	1133,56	1,72	15,34

19.11.2014

DATA EMISSÃO

RESP. LABORATÓRIO DE SOLOS N. PLANTAS

Rua Embraapa S/N -Cx. Postal 007/Embrapa Cruz das Almas -Ba 44380-000  
 Fone: 0xx75 3312 8042 e-mail: sac@cpnpt.embrapa.br

ENGENHEIRO AGRÔNOMO

Ana Lúcia Borges

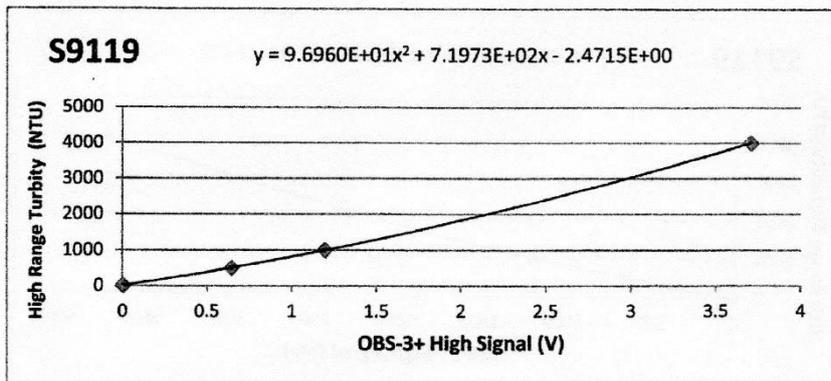
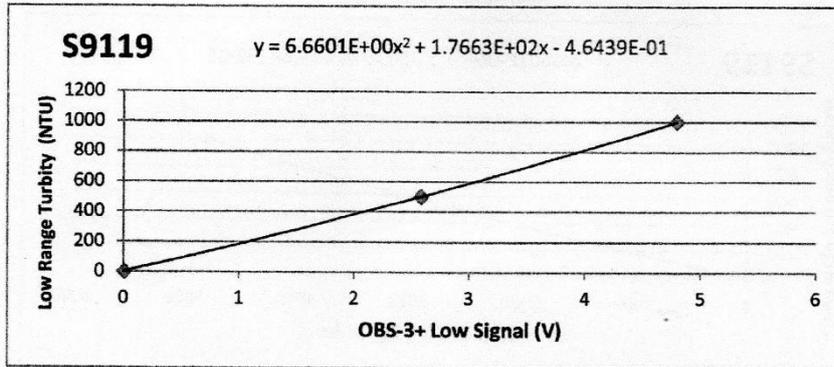
Pesquisador A  
 Embrapa Mandioca e Fruticultura  
 Matrícula 172607



## OBS-3+ AMCO Clear Calibration Certificate

Serial Number: S9119      Nominal Low Range: 1000 NTU  
 Customer: FAPEX SALVADOR BA      Nominal High Range: 4000 NTU  
 Sales Order: 267094

Voltage Calibration



Performed by S. SCHIRADO



August 6, 2012

815w 1800n Logan UT 84321 435-227-9000