

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

FABIANA GONÇALVES CARVALHO OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E DA GRANULOMETRIA DE SEDIMENTOS
NA MEDIDA DA TURBIDEZ COM USO DE SENSOR ÓPTICO

Poços de Caldas/MG

2017

FABIANA GONÇALVES CARVALHO OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E DA GRANULOMETRIA DE SEDIMENTOS
NA MEDIDA DA TURBIDEZ COM USO DE SENSOR ÓPTICO

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos.

Orientador: Alexandre Silveira.

Co-orientador: Paulo Henrique B. Junker Menezes.

Poços de Caldas/MG

2017

O48i Oliveira, Fabiana Gonçalves Carvalho.
Influência da concentração e da granulometria de sedimentos na
medida da turbidez com uso de sensor óptico / Fabiana Gonçalves
Carvalho Oliveira. – Poços de Caldas, 2017.
70 f. –

Orientador: Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017.
Bibliografia.

1. Sedimentos em suspensão. 2. Água – Qualidade. 3. Materiais
granulados. I. Silveira, Alexandre. II. Título.

CDD: 628

FABIANA GONÇALVES CARVALHO OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E DA GRANULOMETRIA DE SEDIMENTOS
NA MEDIDA DA TURBIDEZ COM USO DE SENSOR ÓPTICO

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas.

Área de concentração: Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos.

Aprovada em: 01 de junho de 2017.

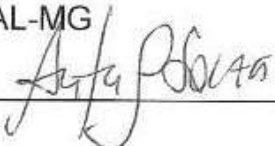
Professor (a): Dr. Alexandre Silveira

Instituição: UNIFAL-MG

Assinatura:  _____

Professor (a): Dr. Antônio Donizetti Gonçalves de Souza

Instituição: UNIFAL-MG

Assinatura:  _____

Professor (a): Dr. Fabiano Tomazini da Conceição

Instituição: Unesp - Rio Claro

Assinatura:  _____

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Alfenas Campus Poços de Caldas pela oportunidade oferecida.

Ao professor Dr. Alexandre Silveira, orientador, pela grande contribuição para a minha formação e pela dedicação.

Aos professores Dr. Paulo Henrique B. Junker Menezes, Rafael O. Tiezzi, Antônio Marciano da Silva e Flávio Aparecido Gonçalves, pela transmissão de conhecimento e colaboração.

Aos técnicos do laboratório de engenharia Bruno, Guilherme, Marcel e Mansueto, pela ajuda e colaboração.

Aos meus colegas Maurício Dias Purcino e Guilherme O. Aprelini, pela ajuda no laboratório e na pesquisa.

Aos meus pais Fabio e Ângela, pelo suporte e amor. Vocês traçaram o caminho para esta e todas as outras conquistas da minha vida. Obrigada pelos ensinamentos e pela compreensão durante toda essa caminhada.

Aos meus irmãos, Pedro, Jessica, Raphael e Olívia, pelo exemplo de dedicação, pelo amor e amizade.

Ao meu esposo Henrique, por estar presente todo o tempo, pelo apoio nos momentos difíceis, pela dedicação, amizade e amor. Você é o grande colaborador para que eu chegasse até o fim dessa etapa.

A Deus, sem o qual nada disso seria possível. Ao motivo da minha existência, por nunca me deixar só e sempre me mostrar o caminho a seguir.

RESUMO

O transporte de sedimento em suspensão em corpos hídricos é responsável pela diminuição da qualidade da água, pelo transporte de poluentes, pelo assoreamento de reservatórios, entre outros problemas. Por isso é importante o seu monitoramento para a gestão dos recursos hídricos. O sensor de turbidez tem sido usado como medida indireta para o monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão (CSS). Porém para a devida calibração do sensor de turbidez deve-se considerar os fatores que influenciam sua medida. Dentre estes fatores estão as características do sedimento, do equipamento e do escoamento. As características do sedimento de maior influência na medida do sensor são a concentração e o tamanho do sedimento. Desta forma buscou-se verificar a influência da concentração e da granulometria do sedimento na estimativa da CSS com o uso do sensor de turbidez. Para isso foram realizados 3 experimentos que avaliaram a medida da turbidez em diferentes concentrações e granulometrias utilizando um canal artificial alimentado por água e sedimento. No primeiro experimento foi medida a concentração e a turbidez em 60 momentos com diferentes CSS. No segundo estes mesmos parâmetros foram medidos em 12 pontos experimentais, porém com sedimento em 4 granulometrias diferentes. No terceiro experimento além da variação da granulometria, variou-se também a descarga sólida de sedimento em suspensão com o controle da vazão de entrada de sedimento. Estabeleceu-se uma relação linear entre os resultados de turbidez e CSS para todos os experimentos, que forneceu a equação da reta e o R^2 . No experimento 3 a relação entre turbidez e CSS foi estabelecida para cada ponto experimental. Com os resultados obtidos, concluiu-se que a relação entre a turbidez e a CSS é influenciada pela concentração e pela granulometria, sendo que com o aumento da concentração há uma diminuição do efeito da granulometria sobre a sensibilidade do sensor de turbidez. Por fim, conclui-se que em condição de baixa descarga sólida, a medida de turbidez diminui com o aumento da granulometria.

Palavras-chave: Sedimento. Turbidez. Granulometria. Concentração.

ABSTRACT

The transport of suspended sediment in water bodies is responsible for the reduction of water quality, the transport of pollutants, the silting of reservoirs, among other problems. That is why it is important to monitor the management of water resources. The turbidity sensor has been used as an indirect measure for the monitoring of suspended sediment concentration (SSC). However for the proper calibration of the turbidity sensor, the factors that influence its measurement must be considered. Among these factors are the sediment, equipment and flow characteristics. The characteristics of the sediment of greatest influence on the measurement of the sensor are the concentration and the size of the sediment. In this way, we aim to verify the influence of the sediment concentration and grain size on the CSS estimation with the use of the turbidity sensor. For this, three experiments were carried out to evaluate the turbidity measurement in different concentrations and granulometry using an artificial channel fed by water and sediment. In the first experiment, the concentration and turbidity were measured in 60 experimental points with different CSS. In the second, these same parameters were measured in 12 experimental points, but with sediment in 4 different granulometries. In the third experiment besides the granulometry variation, the solid discharge of sediment in suspension was also varied with the control of the inflow of sediment. A linear relationship between the turbidity and CSS results was established for all experiments, which provided the line equation and the R^2 . In experiment 3 the relationship between turbidity and CSS was established for each experimental point. With the results obtained, it was concluded that the relationship between turbidity and SSC is influenced by concentration and grain size, and with increasing concentration there is a decrease in the effect of particle size on turbidity sensor sensitivity. Finally, it is concluded that in low solid discharge condition, the turbidity measurement decreases with increasing particle size.

Key words: Sediment. Turbidity. Granulometry. Concentration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Classificação granulométrica.....	14
Figura 2-	Variação da resposta de um sensor óptico em função dos fatores de influência.....	19
Figura 3-	Aparato experimental utilizado nos experimentos 1 e 2: (a) Foto do aparato e (b) Esquema do aparato.....	21
Figura 4-	Aparato experimental utilizado no experimento 3.....	22
Figura 5-	Entrada de sedimento no canal em frente ao sensor de turbidez.....	22
Figura 6-	Localização da Bacia do Ribeirão do Cipó e da sub-bacia do Córrego do Gigante.....	23
Figura 7-	Pontos de coleta de amostra do solo na sub-bacia do Córrego do Gigante.....	24
Figura 8-	Sensor óptico de turbidez instalado no canal.....	25
Figura 9-	Filtros após filtração de diferentes concentrações.....	25
Figura 10-	T em função de CSS, desvio padrão, equação da reta e R^2 para os resultados do experimento 1.....	32
Figura 11-	CSS em função da CSS estimada pela equação 4.....	33
Figura 12-	T em função da CSS com o desvio padrão para as 4 granulometrias.....	35
Figura 13-	Turbidez em função da CSS, com o ajuste linear, as equações da reta e R^2 para as 4 faixas granulométricas.....	36
Figura 14-	Coefficiente angular em função da média das faixas granulométricas, equação da reta e R^2	36
Figura 15-	CSS em função da CSSe para as 4 granulometrias.....	38
Figura 16-	T em função da CSS para todos os dados do experimento 2 sem separação por granulometria.....	39
Figura 17-	Variação temporal da turbidez das 4 faixas granulométricas para as 3 condições de descarga sólida.....	40
Figura 18-	T em função de CSS com o desvio padrão para as 4 granulometrias da Q_{SS1}	42
Figura 19-	T em função de CSS com a equação da reta e R^2 para as 4 granulometrias da Q_{SS1}	42
Figura 20-	R para as 6 velocidades das 4 granulometrias em Q_{SS1}	43
Figura 21-	T em função de CSS com o desvio padrão para as 4 granulometrias da Q_{SS2}	44
Figura 22-	T em função de CSS com a equação da reta e R^2 para as 4 granulometrias da Q_{SS2}	45
Figura 23-	R para as 6 velocidades das 4 granulometrias em Q_{SS2}	45
Figura 24-	T em função de CSS com o desvio padrão para as 4 granulometrias da Q_{SS3}	47
Figura 25-	T em função de CSS com a equação da reta e R^2 para as 4 granulometrias da Q_{SS3}	47
Figura 26-	R para as 6 velocidades das 4 granulometrias em Q_{SS3}	48
Figura 27-	CSS pela turbidez sem separação por granulometria e Q_{SS}	49
Figura 28-	Coefficiente angular das 4 granulometrias nos 4 Q_{SS}	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Vazão de água, vazão de sedimento e vazão de escoamento para os 3 intervalos de descarga sólida.....	28
Tabela 2-	Velocidades de escoamento para os 3 intervalos de descarga sólida.	29
Tabela 3-	Valores de CSS (mg/L), T (NTU), desvio padrão de CSS, desvio padrão de T e vazão (L/s) para as 60 medidas.....	31
Tabela 4-	CSS estimada calculada pela equação 4 para as 60 medidas.....	33
Tabela 5-	CSS, T, desvio padrão, vazão e medida para as 4 faixas granulométricas.....	34
Tabela 6-	CSS estimada para as 12 medidas das 4 granulometrias.....	37
Tabela 7-	CSS, T, desvio padrão, vazão e QSS para as 4 granulometrias da Q_{SS1}	41
Tabela 8-	T, CSS, valores de desvio padrão, Q e Q_{SS} para as 4 granulometrias na Q_{SS2}	44
Tabela 9-	T, CSS, valores de desvio padrão, Q e QSS para as 4 granulometrias na Q_{SS3}	46
Tabela 10-	Dados de descarga sólida de sedimentos em suspensão máxima e mínima de cada condição de descarga sólida.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS GERAIS	13
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	OS SEDIMENTOS E SEU IMPACTO NA QUALIDADE E QUANTIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	14
3.2	MEDIDA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	15
3.3	TURBIDEZ.....	17
3.4	SENSOR ÓPTICO DE TURBIDEZ.....	18
3.5	INFLUÊNCIAS NA MEDIDA DO SENSOR DE TURBIDEZ.....	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	APARATO EXPERIMENTAL.....	23
4.2	EXPERIMENTO 1.....	28
4.3	EXPERIMENTO 2.....	29
4.4	EXPERIMENTO 3.....	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1	EXPERIMENTO 1: INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO.....	32
5.2	EXPERIMENTO 2: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA.....	36
5.3	EXPERIMENTO 3: INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E GRANULOMETRIA.....	41
5.3.1	Intervalo de descarga sólida de sedimento em suspensão Q_{SS1}	43
5.3.2	Intervalo de descarga sólida de sedimento em suspensão Q_{SS2}	45
5.3.3	Intervalo de descarga sólida de sedimento em suspensão Q_{SS3}	48
5.3.4	Comparação dos diferentes intervalos de descarga sólida de sedimentos em suspensão.....	50
6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53
	ANEXO A- Turbidez e CSS do experimento 1	58
	ANEXO B- Turbidez e CSS do experimento 2	60
	ANEXO C- Turbidez e CSS do Q_{SS1} do experimento 3	62
	ANEXO D- Turbidez e CSS do Q_{SS2} do experimento 3	65
	ANEXO E- Turbidez e CSS do Q_{SS3} do experimento 3	68

1 INTRODUÇÃO

O adequado gerenciamento dos recursos hídricos é o conjunto de ações que garantem às populações e às atividades econômicas uma melhor utilização da água. O conhecimento da quantidade, qualidade, uso atual e potencial de cada trecho de um corpo d'água permite o planejamento visando à recuperação e à conservação dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica.

Os sedimentos fazem parte dos fenômenos que afetam a qualidade e quantidade da água. Desta forma, a gestão dos recursos hídricos tem como um de seus desafios a compreensão dos processos de sedimentação como primeiro passo na minimização dos impactos negativos causados por estes.

Desta forma, o monitoramento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica é a base para análise de viabilidade de várias atividades econômicas e uma importante ferramenta para estudos ambientais, para projetos e operação de obras fluviais e para conservação de terras e dos recursos hídricos.

Devido à importância e à necessidade de dados de monitoramento para tomada de decisões a Agência Nacional de Energia Elétrica Brasileira (ANEEL) em conjunto com a Agência Nacional de Águas do Brasil (ANA), por meio da resolução nº 3 de outubro de 2010, estabeleceram condições e procedimentos para operação de estações hidrométricas a fim do monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água em reservatórios para geração de energia elétrica.

A quantificação dos sedimentos em suspensão transportados pelos rios pode ser obtida por técnicas diretas e/ou indiretas. Os métodos diretos são os mais tradicionais, trabalhosos e possuem um maior custo de operação. Desta forma tem-se investido na busca por métodos indiretos, estes permitem uma quantificação do sedimento em suspensão sem a necessidade de análises em laboratório, o que facilita a obtenção de dados. Desta forma, tem-se buscado avaliar diversos equipamentos que possibilitam a medida indireta do sedimento em suspensão, com fácil operação, baixa manutenção e aplicabilidade para o monitoramento da água.

Um dos métodos indiretos mais estudados é uso do sensor óptico de turbidez, que permite o monitoramento contínuo do sedimento suspenso. Este sensor tem sido avaliado em diversas localidades e condições de monitoramento e já vem

sendo utilizado para a avaliação da qualidade da água. O sensor de turbidez é usado para medir o fluxo de sedimentos, pela relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão.

A qualidade da medida do sensor de turbidez pode ser afetada por diversos fatores de influência, como as características do sedimento, do equipamento e do escoamento monitorado. Com o conhecimento das características do sensor e seu comportamento diante destas diferentes condições, é possível avaliar corretamente os dados fornecidos com o uso do equipamento. Por isso se fazem necessários o estudo dos fatores de influência e como estes agem sobre a qualidade da medida do sensor. Por fim, é de suma importância o conhecimento das características do sensor e do corpo hídrico monitorado para a devida calibração do sensor e conseqüentemente a relação precisa entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão.

2 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar os fatores de influência: concentração e granulometria de sedimento, no desempenho de um sensor de turbidez para a estimativa de concentração de sedimentos suspensos.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Obter a relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão.
- b) Analisar a influência da concentração na medida de turbidez através da relação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão;
- c) Comparar a concentração de sedimentos em suspensão medida e a estimada através da equação do ajuste da relação turbidez x CSS;
- d) Analisar a influência da concentração e da granulometria na medida de turbidez através da comparação do coeficiente angular e da relação R (T/CSS) da turbidez em função da concentração de sedimentos em suspensão;
- e) Comparar a influência da concentração e da granulometria do sedimento sobre a medida de turbidez em condições de diferentes descargas sólidas de sedimento em suspensão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção foi levantada a revisão bibliográfica dos principais temas abordados neste trabalho, sendo estes: os sedimentos e seu impacto na qualidade e quantidade dos recursos hídricos, a medida do transporte de sedimentos, a turbidez, o sensor óptico de turbidez e as influências na medida do sensor de turbidez.

3.1 OS SEDIMENTOS E SEU IMPACTO NA QUALIDADE E QUANTIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS

O uso adequado dos recursos hídricos, como o de todos os outros recursos da natureza, é essencial para a vida na Terra (FELDMANN, 1992). A unidade básica para a caracterização dos recursos hídricos é a bacia hidrográfica, que corresponde a um sistema com limites estabelecido topograficamente pela linha que une os pontos de maior altitude e que definem os divisores de água entre uma bacia e outra adjacente. A complexidade dos processos relacionados ao ciclo hidrológico, aliado às ações antrópicas interferentes, faz com que a bacia hidrográfica seja adotada como unidade de estudo, planejamento e gerenciamento integrado (ROCHA et al., 2000). Por isso, para determinação da qualidade e quantidade de um recurso hídrico, faz-se o monitoramento de diversos parâmetros em uma bacia hidrográfica.

A interação entre os fenômenos naturais e antrópicos em uma bacia hidrográfica, determinam a qualidade e disponibilidade do recurso hídrico nesta (CONCEIÇÃO; BONOTTO, 2002). Dentre estes fenômenos estão os sedimentos que têm a função de regulação da qualidade da água devido à sua capacidade de reter e liberar poluentes (POLETO; MERTEN, 2013), além de impactar o corpo d'água em cada processo da sedimentação. O sedimento é a partícula derivada da rocha, ou de materiais biológicos, que pode ser transportado por fluido do lugar de origem aos rios, permanecendo em suspensão na água ou depositada no leito. As partículas presentes no sedimento se constituem de tamanho, forma e natureza mineralógica variados, conforme o tipo de material que as originaram (BORTOLUZZI; POLETO, 2013). A Sedimentologia é a responsável pelo estudo dos sedimentos e considera os processos hidroclimatológicos que agem sobre estes. Este estudo é necessário nos projetos e operação de obras fluviais, na conservação de terras e na conservação dos recursos hídricos (CARVALHO, 2008). A

Hidrossedimentologia é a responsável pela geração de dados através do monitoramento dos sedimentos em bacias hidrográficas, relacionados à descarga sólida, à granulometria e aos componentes do sedimento (POLETO, 2014).

A sedimentação é composta pelos seguintes processos: erosão, transporte, deposição e compactação. A erosão remove a camada fértil e empobrece o solo, além de alterar as condições de escoamento da água. A ação antrópica tem contribuído para o aumento da erosão com a exposição do solo devido principalmente ao desmatamento, urbanização e atividades agropecuárias (ROBERT et al., 2016). A energia de impacto da gota de chuva no solo desagrega as partículas, provoca deslocamento e lava o solo removendo a camada superficial. A partícula de sedimento solta se desloca e pode ser transportado pelas enxurradas para os cursos d'água, o que acaba selecionando o tamanho dos grãos (STONE; WALLING, 1997). A localização geográfica da precipitação influencia a concentração de sedimentos em suspensão em uma bacia (MEDEIROS; SEGUNDO; MAGALHÃES, 2015) e a intensidade de precipitação afeta a fonte de sedimento erodido na bacia (OCHIAI et al., 2015).

O transporte do sedimento prejudica o consumo e outros usos da água devido ao aumento da turbidez, o que aumenta o custo do tratamento. Outros problemas são: a redução da qualidade estética da água, diminuição da fotossíntese, diminuição da população de peixes, transporte de poluentes (nutrientes, herbicidas, metais pesados) (HARRINGTON; HARRINGTON, 2014; SARI et al. 2013), transporte de bactérias e vírus, perturbação da forma do canal, provocação de enchentes devido à elevação do leito e abrasão de turbinas.

O depósito de sedimentos acontece próximo ou distante ao local da erosão, em locais planos, canais, planícies de inundação, reservatórios, deltas, estuários e oceanos. Os principais problemas são: assoreamento de reservatórios e rios, redução da fertilidade do solo, redução da drenagem superficial, aumento dos custos públicos de manutenção, produção de lama, danos às plantações e redução volume d'água (ABE et al., 2012). Por fim, no processo de compactação é prejudicial devido à difícil remoção para o desassoreamento.

3.2 MEDIDA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Ao ser transportado no corpo hídrico o sedimento pode ficar em suspensão ou no fundo do leito. Isso depende das forças que atuam sobre ele; do tamanho, peso e forma da partícula; da forma de escoamento (laminar ou turbulento); da velocidade da corrente; dos obstáculos do leito; da declividade do canal; da temperatura da água e outros (CARVALHO, 2008).

A medida da quantidade de sedimentos transportados pelos rios, chamada de Sedimentometria, é realizada na maioria dos casos apenas para o sedimento em suspensão, considerando que de todo o sedimento (carga total) transportado para o corpo d'água, normalmente até 90% do sedimento está em suspensão (CARVALHO, 2008; GAO; JOEFSON, 2012).

A caracterização do sedimento suspenso é feita através da determinação da concentração de sedimentos suspensos (CSS) e da distribuição granulométrica. A CSS pode ser determinada pelos métodos de filtração ou evaporação, sendo que o método de filtração é usado em amostras de baixa concentração com pouco volume e o método de evaporação é usado para grandes concentrações ou com grande teor de argila. A concentração é determinada pela massa seca do sedimento em suspensão contido na amostra em relação ao volume total da amostra. A análise granulométrica pode ser feita por pipetagem, tubo de remoção pela base, densímetro ou peneiramento, dependendo das características do sedimento. Para estudos sedimentométricos a carga sólida medida se refere à argila, silte e areia transportada. Os materiais em granulometria de pedregulho, pedra e matacão, normalmente não são tratados nesses estudos (CARVALHO et al., 2000). O solo pode ser classificado quanto a sua granulometria pelo sistema de classificação da ABNT NBR 6502 (1995) (Figura 1).

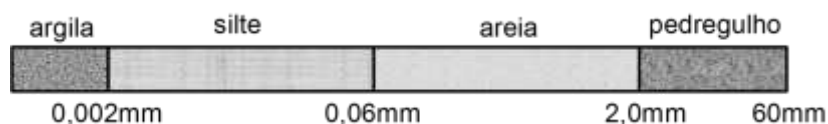


Figura 1- Classificação granulométrica.

Fonte: Da autora.

Um elemento essencial de um programa de monitoramento de fluxo de transporte de sedimentos é a escolha da técnica de medição da CSS, a qual pode afetar tanto os custos como a confiabilidade dos dados (PAVANELLI; BIGI, 2005).

Para que essas determinações sejam feitas existem métodos de medição diretos e indiretos. Os métodos diretos são os mais tradicionais e possuem um maior custo por exigirem um monitoramento intenso, principalmente nos períodos chuvosos (LEWIS, 1996; MINELLA et al., 2008). Os métodos diretos utilizam de equipamentos que fazem a coleta e as amostras são analisadas em laboratório. Como exemplo de alguns equipamentos: amostradores norte-americanos (USDH-48, USDH-59, USD-49, P-46, tipo saca), amostrador Neyrpic por integração pontual e vertical e amostradores de bombeamento nos sistemas de peso acumulativo e amostras individuais. Os amostradores são usados para obter amostras que representam a mistura de sedimento e água e são projetados e construídos para permitir que a água entre na garrafa com velocidade igual à do rio (CARVALHO, 2008).

Os métodos indiretos têm sido desenvolvidos para facilitar a medição do transporte de sedimento em suspensão. Estes substituem os métodos tradicionais de coleta de sedimentos e permitem um monitoramento mais eficiente, sendo utilizados *in situ* (SARI; CASTRO; KOBAYAMA, 2015). A medida indireta pode ser feita por técnicas de medição utilizando equipamentos como: sensor óptico, medidor ultra-sônico óptico, medidor nuclear, medidor laser, medidor de registro de volume com amostrares de bombeamento, medidor fotoelétrico de turbidez, garrafa Delft, medidor ultra-sônico Doppler (concentração e velocidade) e sensoriamento remoto. O medidor fotoelétrico determina a concentração pela medição de turbidez com limite de aplicação de concentrações até 5000mg/L. O medidor nuclear usa radioisótopos que medem a densidade do sedimento na mistura água/sedimento. O medidor ultrassônico óptico mede a concentração e a granulometria. O medidor ultrassônico de dispersão é baseado na dispersão do ultrassom nas partículas do sedimento em suspensão. O medidor eletrônico faz a determinação da concentração através de sensores que medem a turbidez. O medidor a laser mede concentração e granulometria. Por fim, o sensoriamento remoto usa fotos de satélite e técnicas que medem a coloração da água devido ao sedimento (CARVALHO, 2008).

3.3 TURBIDEZ

A turbidez da água pode ser entendida como o grau de atenuação da intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessá-la. Decorre naturalmente, da presença de sedimento em suspensão, plâncton, micro-organismos, argilas e siltes

nas águas (ESTEVEES, 1998). A turbidez pode ocorrer em função da erosão e/ou do lançamento de despejos industriais e domésticos, porém sua principal fonte é o aporte de partículas de solos provenientes da superfície da bacia hidrográfica, em função de desmatamentos, processos erosivos e atividades de mineração. O aumento da turbidez reduz a fotossíntese, levando ao desequilíbrio da cadeia alimentar, diminui a transparência da água, afeta esteticamente o corpo d'água e encarece o processo de tratamento da água (BRAGA et al., 2005; DERISIO, 2012).

O monitoramento de turbidez como estimativa de CSS tem sido usado para avaliar a qualidade da água em rios e reservatórios (ANKCORN, 2003). Lee e Foster (2013) destacaram em seu trabalho a importância do monitoramento da turbidez no gerenciamento de reservatórios. Este monitoramento é feito com o uso de sensores ópticos, denominados turbidímetros.

Em 5 de novembro de 2015 ocorreu o maior desastre ambiental já visto no Brasil, uma barragem com rejeitos de mineração, se rompeu na cidade de Mariana, estado de Minas Gerais, Brasil. A onda de rejeitos destruiu um vilarejo e seguiu até o Rio Doce, importante rio utilizado para o abastecimento doméstico e industrial, irrigação e pesca nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. A turbidez tem sido um dos parâmetros usados para avaliar a qualidade da água após o desastre. Com o monitoramento do Rio Doce, foi possível criar um sistema de alerta para picos de turbidez, que está diretamente relacionado com deslocamento de rejeitos (ANA, 2016).

3.4 SENSOR ÓPTICO DE TURBIDEZ

O sensor óptico de turbidez permite o monitoramento automático do sedimento suspenso. Diversos trabalhos têm buscado compreender o uso deste equipamento e estudado sua aplicação no monitoramento de diferentes ambientes aquáticos em todo o mundo (ABE et al., 2012; BARTELS; TERRA; COLLARES, 2014; CHIKITA et al., 2009; HAIMANN et al., 2014; HARRINGTON; HARRINGTON, 2013; MINELLA et al., 2008; NAVRATIL et al., 2011; SHELLENBERGER; WRIGHT; SCHOELLHAMER, 2013; SUN; CORNISH; DANIELL, 2001).

O uso de sensores ópticos no monitoramento de sedimentos suspensos foi aprovado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em março de 2009. Foi a primeira tecnologia autorizada a substituir a tradicional coleta e análise

laboratorial dos sedimentos (ANDERSON et al., 2010). Os turbidímetros para medida contínua tem sido construídos para instalação fixa (*in situ*) e para concentrações entre 0 e 5000mg/L (CARVALHO, 2008). Os sensores colocados *in situ* são cada vez mais utilizados como parte das redes de monitoramento da qualidade da água, fornecendo dados confiáveis que podem ser correlacionadas com o valor médio de concentração de seção transversal do rio ou reservatório (GRAY; GARTER, 2009).

O sensor de turbidez, também chamado de turbidímetro, fornece séries temporais automáticas e contínuas de concentração permitindo o cálculo da descarga de sedimentos em suspensão em corpos hídricos pela relação entre turbidez e CSS (SCHOELLHAMER; WRIGHT, 2003), fazendo-se desnecessária a coleta de material para análise em laboratório (DALBIANCO et al., 2012). O funcionamento do sensor se baseia no princípio óptico de que um raio incidente em uma mistura pode sofrer absorção, dispersão e transmissão devido à presença de partículas suspensas no meio líquido. A fonte de luz pode variar em comprimento de onda e tipo. O feixe disperso pode ser medido por um ou mais fotodetectores eletrônicos na direção do feixe incidente com um ângulo α . Se $\alpha=90^\circ$, é espalhamento nefelométrico, se $\alpha<90^\circ$ é espalhamento direto ou se $\alpha>90^\circ$ é retrodifusão. (BISANTINO; GENTILE; LIUZZI, 2011).

A relação da turbidez com a CSS pode ser linear ou não-linear, função das propriedades físicas da partícula, se estas propriedades não tiverem grandes variações, a relação é linear (LEWIS, 1996). A relação linear acontece para baixos valores de turbidez, enquanto que para altos valores de turbidez e solos heterogêneos a relação é não-linear (NEUPANE et al., 2015). Diversos trabalhos obtiveram uma relação linear entre CSS e turbidez, como: Abe et al. (2012), Chikita, et al. (2012), Haimann et al. (2014), Harrington and Harrington (2013) e Tena et al. (2011).

O sensor de turbidez deve estar devidamente calibrado para uso. Para calibração deste equipamento é necessário o uso de medições tradicionais (DALBIANCO et al., 2012). MINELLA et al. (2008) observou que a calibração em campo com amostras *in situ*, foi mais representativa do que a calibração em laboratório com base nas amostras de solo da área da bacia estudada. A correta calibração do equipamento torna suas medidas mais confiáveis e verdadeiras.

3.5 INFLUÊNCIAS NA MEDIDA DO SENSOR DE TURBIDEZ

A medida da turbidez pode substituir o uso de métodos tradicionais para determinar a CSS (BAYRAM; KANKAL; ÖNSOY, 2012), porém a qualidade da medida pode ser influenciada por diversos fatores. Estes fatores são: as características da partícula do sedimento transportado, as características ópticas e geométricas do sensor, as propriedades do escoamento e o método utilizado na medida, que pode produzir diferentes leituras (ANKCORN, 2003; SARI; CASTRO; KOBIYAMA, 2015).

As características da partícula que podem influenciar a medida do sensor são: CSS, tamanho, forma, cor, índice de refração, densidade e composição mineralógica da partícula de sedimento transportado. Algumas características ópticas e geométricas do sensor que podem influenciar a medida são: design óptico, geometria de emissão e detecção da luz incidente, estabilidade e capacidade de identificação do sinal e ângulo de detecção da energia. Por fim, as características do escoamento que podem influenciar a medida são: presença de bolhas, gases, microrganismos, poluentes e matéria orgânica, floculação, agregação e turbulência. No caso dos sensores colocados no campo em locais com altas cargas de nutrientes, temperaturas amenas e sol abundante, podem ocorrer incrustações biológicas com alta frequência nas janelas de sensores ópticos (LEWIS; EADS, 2009; SARI; CASTRO; KOBIYAMA, 2015). A Figura 2 apresenta um resumo da variação da resposta de um sensor óptico em função dos fatores descritos acima.

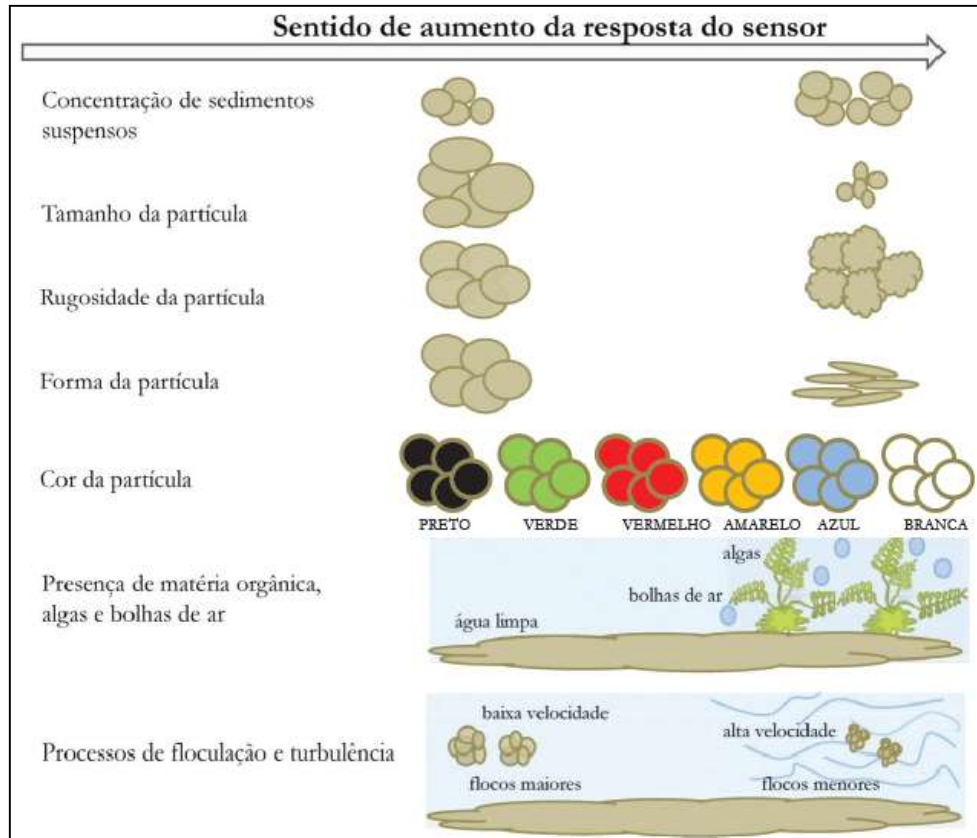


Figura 2- Variação da resposta de um sensor óptico em função dos fatores de influência.

Fonte: SARI; CASTRO; KOBAYAMA (2015).

Lewis e Eads (2009) destacam que partículas maiores atrapalham a medida da turbidez, assim como altas velocidades contribuem para uma maior variedade na distribuição destas partículas. No trabalho de Merten, Capel e Minella (2014) foram observadas a influência do tamanho, forma e cor dos sedimentos sobre a sensibilidade do sinal de três sensores de turbidez, sendo que para todos os sensores, o sinal de turbidez diminuiu para uma maior concentração de partículas de areia. Sari et al. (2017) observou que para uma mesma CSS, a leitura de turbidez pode ser diferente, conforme a classe granulométrica analisada. Outros autores chegaram à conclusão de que, para uma mesma CSS, a medida de turbidez é maior na presença de partículas menores (CLIFFORD, 1995; CONNER; VISSER, 1992; FOSTER; MILLINGTON; GREW, 1992; SCHOELLHAMER; WRIGHT, 2003).

O local de instalação do sensor também pode influenciar, devido à variação da CSS ao longo da seção transversal e profundidade do corpo hídrico conforme o tamanho dos sedimentos e velocidade da água. Quando o fluxo de sedimentos é de silte e argila ($<63\mu\text{m}$), a distribuição de CSS é mais uniforme ao longo da seção

transversal e na profundidade. Diferente do caso em que o sedimento é composto por areia, o que aumenta a CSS no centro da seção e no leito do corpo hídrico (POLETO; MERTEN, 2013).

Considerando todos estes fatores, a CSS representa a maior importância na calibração de um sensor óptico, porém o diâmetro da partícula é a característica física do sedimento com maior relevância no processo de calibração, principalmente se este for muito variado. É importante considerar também a forma, a cor da partícula e o comprimento de onda da energia incidente (SARI; CASTRO; KOBIYAMA, 2015).

As incertezas e os erros introduzidos pela utilização de um sensor óptico, como técnica alternativa para determinação da CSS, irão depender destes fatores estudados. O estudo da dinâmica dos sedimentos na bacia monitorada deve procurar identificar e distinguir os fatores que mais interferem na relação turbidez - CSS para a devida calibração do instrumento. Por isso é importante conhecer o equipamento usado, as características do local onde o equipamento utilizado no monitoramento será instalado, além do desenvolvimento de uma estratégia de implantação do equipamento para que as medidas de turbidez reflitam as condições de fluxo de forma confiável (ANKCORN, 2003).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados 3 experimentos, experimento 1, experimento 2 e experimento 3. Estes foram realizados com um aparato experimental e uma metodologia distinta.

4.1 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental utilizado nos experimentos 1 e 2 foi constituído por dois reservatórios de 310L de capacidade e um canal artificial construído de acrílico (Figura 3). O canal possui as dimensões de 1,53m de comprimento, 0,27m de largura e 0,40m de altura, contendo ao seu final um vertedor triangular de 60°. O primeiro reservatório situado em cota superior ao início do canal recebeu uma mistura de água+sedimento, para abastecer o canal com uma vazão controlada por uma válvula na saída do reservatório. A concentração de sedimento na mistura de água+sedimento do reservatório superior variou entre 500 e 1500mg/L. Outro reservatório de 310L foi colocado na saída do canal.

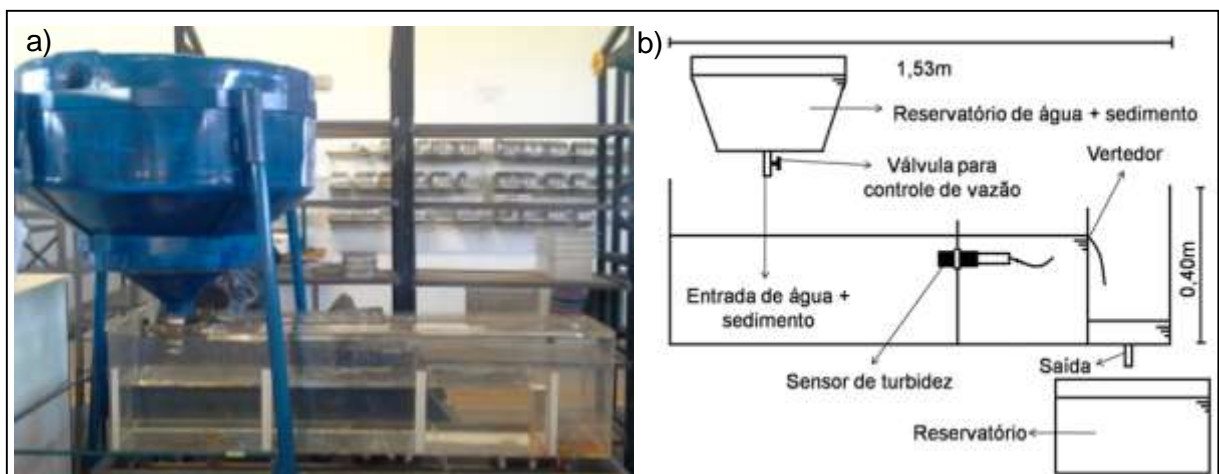


Figura 3- Aparato experimental utilizado nos experimentos 1 e 2: (a) Foto do aparato e (b) Esquema do aparato.

Fonte: Da autora.

O aparato experimental utilizado no experimento 3 foi constituído pelo mesmo canal utilizado nos experimentos 1 e 2, porém a alimentação de água e sedimento foi feita utilizando bombas. Com isso, foi possível obter um melhor controle sobre a vazão da entrada de água e sedimento. A alimentação de água limpa foi feita por

baixo do canal utilizando uma bomba hidráulica Eletroplas ICS-100A, ligada a um reservatório de 310L. A alimentação de sedimento foi feita através de um tubo de pvc acoplado na lateral do canal, utilizando uma bomba peristáltica Provitec AWG 5000 ABS, ligada a um reservatório de 10L com o sedimento em uma concentração de 3000 mg/L e um agitador mecânico Fisatom 713D para manter a mistura de água e sedimento do reservatório homogênea. Observa-se o esquema do aparato experimental usado no experimento 3 na Figura 4 e na Figura 5 a entrada de sedimento no canal.

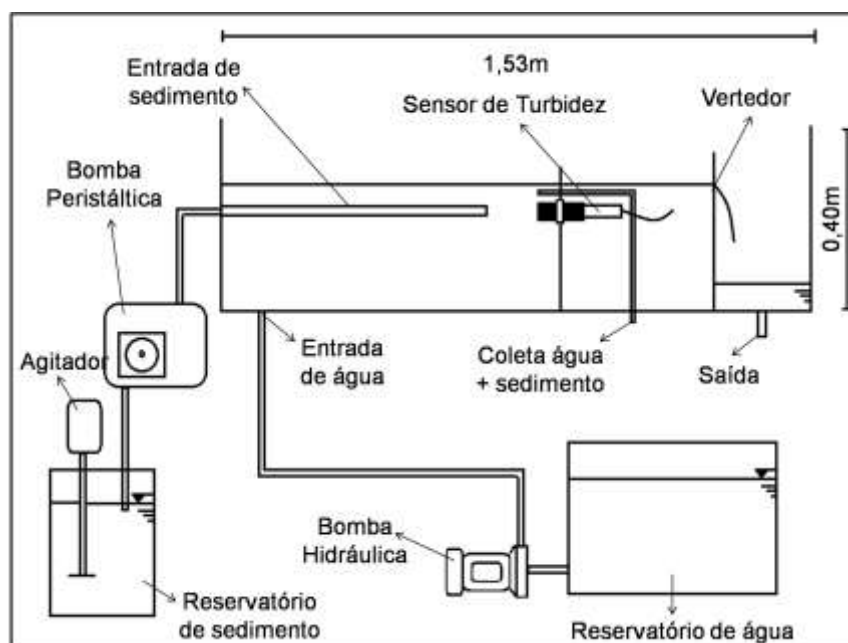


Figura 4- Aparato experimental utilizado no experimento 3.
Fonte: Da autora.



Figura 5- Entrada de sedimento no canal em frente ao sensor de turbidez.
Fonte: Da autora.

O sedimento utilizado nos experimentos foi amostrado do solo da sub-bacia do Córrego do Gigante que pertence a sub-bacia do Ribeirão do Cipó, encontrada

na bacia do Ribeirão das Antas, localizada em Poços de Caldas-MG. O ponto de coleta está localizado nas coordenadas UTM 330423E e 7576499N. O local onde o solo foi amostrado é uma área em recuperação de mineração, pertencente a uma bacia de contenção presente na área. A Figura 6 mostra a localização da bacia do Ribeirão do Cipó e da sub-bacia do Córrego do Gigante e a Figura 7 mostra os pontos de coleta de amostra do solo na sub-bacia do Córrego do Gigante.

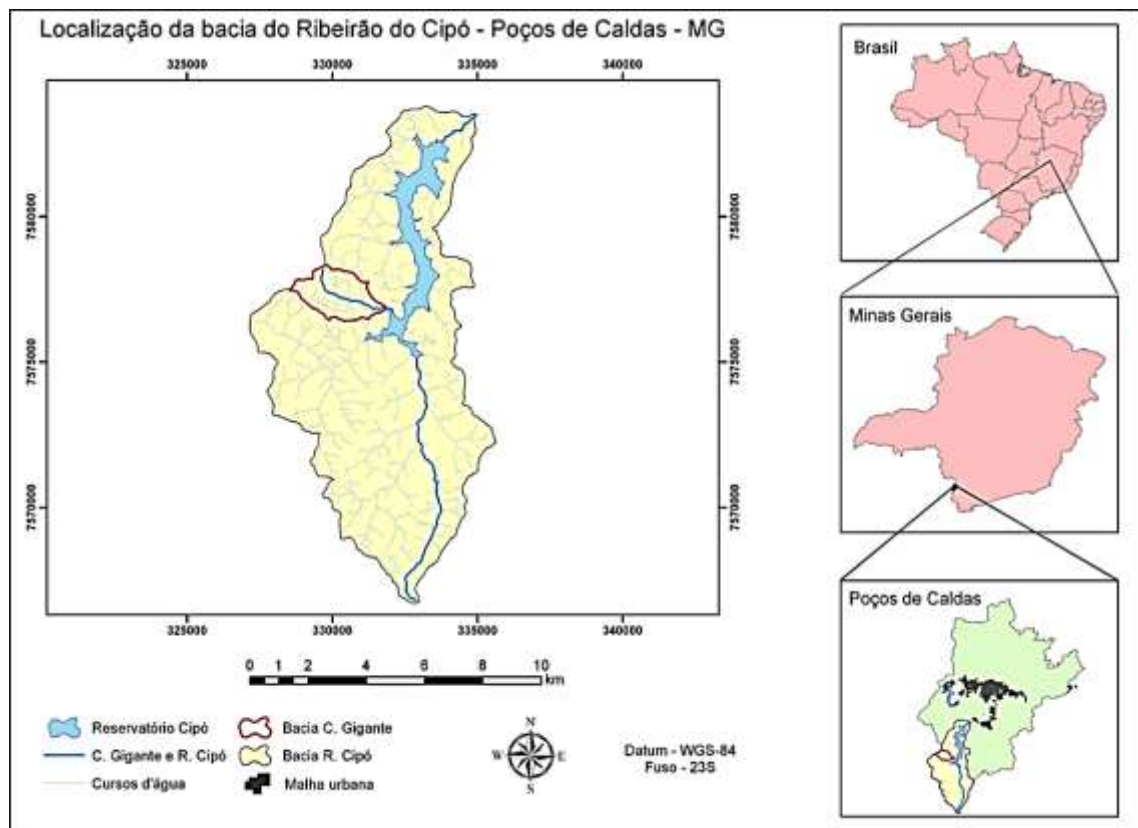


Figura 6- Localização da Bacia do Ribeirão do Cipó e da sub-bacia do Córrego do Gigante.

Fonte: Da autora.

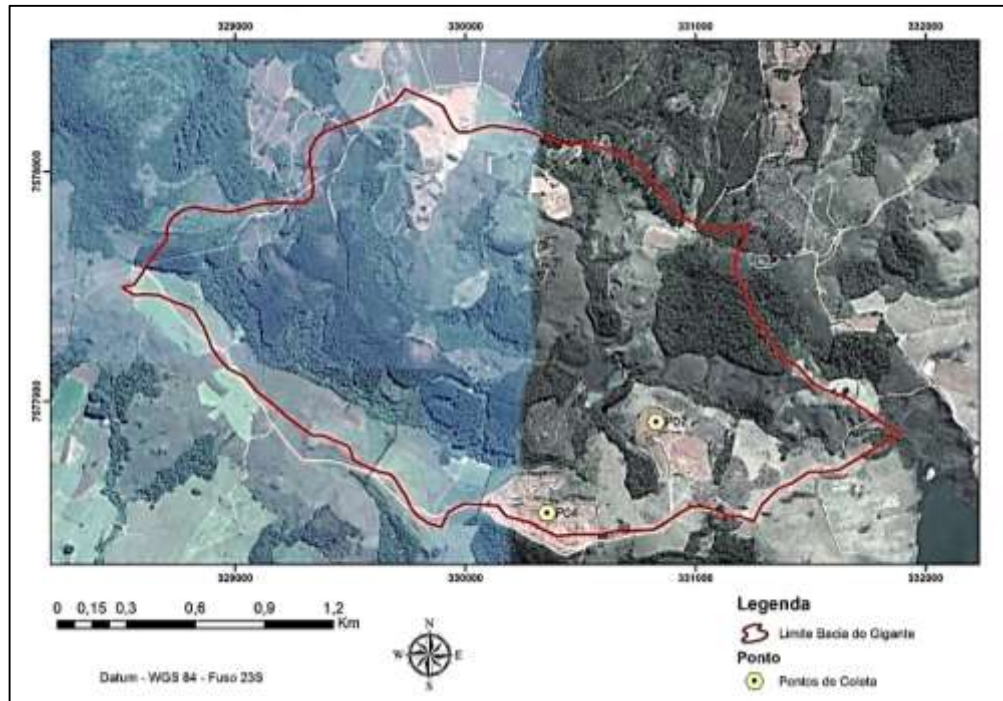


Figura 7- Pontos de coleta de amostra do solo na sub-bacia do Córrego do Gigante. Fonte: Da autora.

Para o uso nos experimentos, a amostra do solo foi secada em estufa SOLAB SL-102 a 105°C por 24h, moída com moinho de jarro PROHTec e peneirada em agitador de peneiras Bertel 3424 com peneiras Bertel de 20, 38,45, 53, 63 e 75µm, a fim de obter o sedimento em diferentes faixas granulométricas.

Em todos os experimentos a turbidez foi monitorada com um sensor de turbidez (turbidímetro) instalado no canal (Figura 8). O sensor de turbidez usado foi o sensor SOLAR SL 2000 PNV, que é dotado de um sensor óptico desenvolvido para locais submersos, como rios, lagos, tanques, ou em lugares que possa quantificar os sedimentos em suspensão presentes no raio de ação do sensor. Este sensor opera com feixe de luz no comprimento de onda infravermelho (de 700 a $3 \times 10^5 \eta\text{m}$), com ângulo de detecção de luz incidente de 180° e foi calibrado conforme manual do fabricante. O sensor foi conectado a uma estação que forneceu medidas de turbidez a cada 14 segundos.



Figura 8- Sensor óptico de turbidez instalado no canal.
Fonte: Da autora.

A concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) foi determinada pelo método de filtração do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). Foram utilizados filtros Axiva de 47 mm de diâmetro e 0,45 μm ou 0,7 μm de porosidade. De acordo com o APHA (1998), o filtro usado para separar a porção de sólidos dissolvidos dos sólidos suspensos deve ser igual ou menor que 2,0 μm . Para a filtração a vácuo utilizou-se uma bomba a vácuo Primatec 131 e para pesagem dos filtros, utilizou-se uma balança analítica Digimed DG-500. Na Figura 9 observa-se o resultado dos filtros após a filtração de diferentes concentrações.



Figura 9- Filtros após filtração de diferentes concentrações.
Fonte: Da autora.

A vazão foi calculada indiretamente pela medida da carga hidráulica (h) no vertedor triangular através da Eq.1 para vertedores triangulares e baixas vazões (PORTO, 2006), este nível foi anotado a cada ponto experimental. Com a calibração do vertedor de 60° instalado no canal, pode-se obter o Cd de 0,67.

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) h^{\frac{5}{2}}, \quad (1)$$

em que:

Q : vazão (m^3/s),

C_d : coeficiente de descarga do vertedor (adimensional),

g : aceleração da gravidade (m/s^2),

α : ângulo do vertedor e

h : carga de hidráulica que atua sobre o vértice do vertedor (m) ou nível.

4.2 EXPERIMENTO 1

Neste primeiro experimento, procurou-se analisar a influência da concentração de sedimentos na medida de turbidez. A fim de obter diferentes concentrações no canal, foram colocadas diferentes concentrações de sedimento no reservatório superior e a vazão também foi variada de 0,02 L/s a 0,13 L/s através da válvula de saída do reservatório superior. O sedimento usado possui granulometria de silte e argila ($<63\mu m$). O sensor de turbidez foi colocado em um ponto fixo no meio do canal, próximo à superfície.

Foram realizadas 60 medidas, em cada um destas a turbidez foi medida durante 2 minutos, com medidas a cada 14 segundos, totalizando 8 valores de turbidez. Durante o período de monitoramento da turbidez, foram coletadas próximas ao sensor amostras de água+sedimento. Estas coletas foram realizadas em triplicata para determinação da CSS.

As médias dos valores de turbidez e CSS obtidos para uma das 60 medidas foram relacionadas de forma gráfica. Aplicou-se uma análise de regressão linear para as relações T x CSS, considerou-se o coeficiente linear igual a 0, já que para CSS=0, espera-se T=0. Este ajuste foi escolhido devido à sua aplicação em diversos trabalhos (TENA et al., 2011; ABE et al., 2012; HARRINGTON; HARRINGTON, 2013; HAIMANN et al., 2014). Desta forma obteve-se a equação da reta CSS=a.T e através desta equação foi possível calcular a CSS estimada. Calculou-se então o RMSE (raiz do erro quadrático médio) (Eq. 2), que calcula a diferença entre o valor real (CSS) e o valor estimado (CSSe).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)^2}{N}}, \quad (2)$$

em que:

y_i : valor estimado,

x_i : valor medido e

N : número de observações.

4.3 EXPERIMENTO 2

A fim de avaliar a influência da granulometria na relação turbidez x CSS, foram utilizados sedimentos em 4 diferentes faixas granulométricas: GR1 (20-38 μ m), GR2 (38-45 μ m), GR3 (53-63 μ m) e GR4 (63-75 μ m). As faixas GR1, GR2 e GR3 correspondem a granulometria de silte. A faixa GR4 corresponde a granulometria de areia fina.

De forma semelhante ao experimento 1 a fim de obter diferentes concentrações no canal, foram colocadas diferentes concentrações de sedimento no reservatório superior e a vazão também foi variada de 0,002 L/s a 0,09 L/s através da válvula de saída do reservatório superior.

O sensor de turbidez foi colocado em um ponto fixo no meio do canal, próximo à superfície. Para cada faixa granulométrica foram realizadas 12 medidas, em cada uma a turbidez foi medida durante 1,5 minutos com coleta de dados a cada 14 segundos, totalizando 6 valores de turbidez. Durante o período de monitoramento da turbidez, foram coletadas próximas ao sensor amostras de água+sedimento. Estas coletas foram realizadas em triplicata para determinação da CSS.

Assim como para o primeiro experimento, as médias dos resultados de turbidez e CSS obtidos foram relacionadas de forma gráfica, com os valores de desvio padrão. Com o ajuste linear da relação turbidez x CSS, obteve-se a equação da reta para as 4 granulometrias. Através destas equações foi possível calcular as CSSs estimadas. Calculou-se então o RMSE (raiz do erro quadrático médio), que calcula a diferença entre o valor real (CSS) e os valores estimados (CSS).

4.4 EXPERIMENTO 3

Este experimento procurou avaliar simultaneamente a influência da concentração e da granulometria, porém com um novo aparato experimental. Para isto, foi necessário controlar as variáveis de vazão de entrada de água e de

sedimento, o que permitiu avaliar a influência da concentração através da descarga sólida de sedimentos em suspensão. A descarga sólida, Q_{SS} (mg/s), é o produto da vazão do escoamento Q_e (L/s), pela concentração de sedimentos em suspensão (mg/L).

Foram realizados 3 experimentos com diferentes intervalos de descarga sólida de sedimento em suspensão (Q_{SS1} , Q_{SS2} e Q_{SS3}), variando de um $Q_{SS\text{mín}}$ a um $Q_{SS\text{máx}}$. Cada intervalo de descarga teve uma vazão de entrada de água (Q_a) e 6 vazões de entrada de sedimento (Q_s), totalizando 6 medidas para cada Q_{SS} . A Tabela 1 apresenta os valores de Q_e , Q_s e a soma das duas que é a vazão do escoamento (Q_e). E em cada intervalo de Q_{SS} nestas condições de vazão, foram realizados testes com 4 faixas granulométricas: GR1 (20-38 μ m), GR2 (38-45 μ m), GR3 (45-53 μ m) e GR4 (63-75 μ m).

Tabela 1- Vazão de água, vazão de sedimento e vazão de escoamento para os 3 intervalos de descarga sólida.

Q_{SS}	Q_a (L/s)	Q_s (L/s)						Q_e (L/s)					
		Q_{s1}	Q_{s2}	Q_{s3}	Q_{s4}	Q_{s5}	Q_{s6}	Q_{e1}	Q_{e2}	Q_{e3}	Q_{e4}	Q_{e5}	Q_{e6}
Q_{SS1}	0,050	0,005	0,008	0,010	0,012	0,015	0,017	0,057	0,060	0,062	0,064	0,067	0,070
Q_{SS2}	0,090	0,005	0,008	0,010	0,012	0,015	0,017	0,095	0,098	0,100	0,102	0,105	0,108
Q_{SS3}	0,140	0,005	0,008	0,010	0,012	0,015	0,017	0,147	0,150	0,152	0,154	0,157	0,160

Fonte: Da autora.

Para cada uma das 6 medidas foram realizadas medidas de turbidez a cada 14 segundos durante 10 minutos, totalizando 43 valores de turbidez e foram coletadas amostras de água+sedimento em triplicata, utilizando um sifão de 7,9 mm posicionado ao lado do sensor, para determinação da CSS.

Tem-se a velocidade de escoamento do canal (V_e), com a divisão da vazão de escoamento (Q_e) pela área da seção do canal. A Tabela 2 apresenta as velocidades de escoamento dos 3 intervalos de descarga sólida, a velocidade média (V_m) e o aumento (A) entre os intervalos. Observa-se que de Q_{SS1} a Q_{SS3} esse aumento é de mais de 2 vezes.

Tabela 2- Velocidades de escoamento para os 3 intervalos de descarga sólida.

Q _{SS}	V _e (m/s)						V _m (m/s)	A (%)
	V _{e1}	V _{e2}	V _{e3}	V _{e4}	V _{e5}	V _{e6}		
Q _{SS1}	9,21E-04	9,70E-04	9,97E-04	1,03E-03	1,08E-03	1,12E-03	1,00E-03	0
Q _{SS2}	1,54E-03	1,58E-03	1,62E-03	1,65E-03	1,70E-03	1,75E-03	1,65E-03	91
Q _{SS3}	2,38E-03	2,42E-03	2,46E-03	2,49E-03	2,54E-03	2,59E-03	2,50E-03	210

Fonte: Da autora.

Com as velocidades de escoamento calculou-se o número de Reynolds e de Froude para canais (PORTO, 2006). Reynolds variou de 2,6 a 222,8, caracterizando um regime laminar. Froude variou de $2,1 \cdot 10^{-5}$ a $1,8 \cdot 10^{-3}$, caracterizando um escoamento fluvial. As baixas velocidades trabalhadas são características de reservatórios e não possibilita a geração de turbulência e/ou a formação de bolhas, fatores que influenciam na medida do sensor.

As médias dos valores de turbidez e CSS foram correlacionadas de forma gráfica. A relação T x CSS foi estabelecida para as condições Q_{SS1}, Q_{SS2} e Q_{SS3} e para as faixas granulométricas GR1, GR2, GR3 e GR4. Aplicou-se o ajuste linear para as relações T x CSS, e com a equação da reta, obteve-se o coeficiente angular e o R². A fim de analisar a tendência dos dados, utilizou-se os valores de coeficiente angular, denominado sensibilidade, que é a razão entre ΔT e ΔCSS . Para analisar o comportamento de cada ponto experimental, calculou-se a relação (R) entre a turbidez e a CSS ($R=T/CSS$). Calculou-se também o coeficiente de variação entre os valores de sensibilidade para as condições de Q_{SS}, através da Eq. 3. O coeficiente de variação é a medida da variabilidade dos dados em torno da média, o que permite avaliar o quanto a granulometria e a velocidade afetam a relação T x CSS.

$$cv = \frac{s}{\bar{x}} \quad (3)$$

em que:

cv: coeficiente de variação,

\bar{x} : média e

S: desvio padrão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados separadamente em experimento 1, experimento 2, experimento 3, sendo que o experimento 3 é dividido em Q_{SS1} , Q_{SS2} e Q_{SS3} .

5.1 EXPERIMENTO 1: INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO

A Tabela 3 apresenta a média da concentração de sedimento em suspensão (CSS) e de turbidez (T), seus respectivos valores de desvio padrão relativo (s) e a vazão de escoamento (Q_e) para as 60 medidas. No Anexo A são encontrados todas as medidas de turbidez e CSS.

Tabela 3- Valores de CSS (mg/L), T (NTU), desvio padrão de CSS, desvio padrão de T e vazão (L/s) para as 60 medidas.

Medida	CSS (mg/L)	s (%)	T (NTU)	s (%)	Q _e (L/s)	Medida	CSS (mg/L)	s (%)	T (NTU)	s (%)	Q _e (L/s)
1	24,00	13,6	8,50	8,35	0,02	31	216,00	12,0	147,20	11,8	0,05
2	38,67	4,9	22,85	5,43	0,02	32	190,67	5,5	130,92	16,0	0,05
3	53,33	3,5	30,52	12,98	0,04	33	162,67	19,1	131,22	12,6	0,07
4	81,33	4,6	46,15	5,92	0,04	34	188,00	10,9	141,40	13,5	0,08
5	89,33	14,8	54,47	5,93	0,05	35	32,00	44,5	25,37	13,9	0,03
6	30,67	15,2	28,51	8,87	0,05	36	165,33	8,2	128,28	5,3	0,03
7	41,33	4,6	22,69	9,30	0,06	37	136,00	8,7	122,29	4,9	0,03
8	41,33	12,1	24,02	5,70	0,04	38	112,00	8,8	112,41	2,7	0,03
9	34,67	5,5	26,01	6,15	0,03	39	264,00	9,8	187,66	6,0	0,03
10	34,67	28,8	24,35	5,87	0,02	40	265,33	6,1	194,28	9,0	0,03
11	34,67	19,6	27,68	7,66	0,08	41	270,67	2,5	208,76	2,8	0,03
12	5,33	35,4	6,21	9,83	0,03	42	304,00	12,2	244,81	10,2	0,03
13	6,67	28,4	4,57	28,21	0,03	43	137,33	6,9	86,17	5,5	0,04
14	2,67	212,3	4,41	0,00	0,03	44	178,67	2,8	112,98	8,1	0,04
15	8,00	40,9	3,59	28,12	0,09	45	217,33	12,1	167,51	3,0	0,04
16	2,67	141,4	3,76	32,48	0,10	46	225,33	12,3	177,31	5,2	0,04
17	1,00	10,0	2,12	34,38	0,04	47	318,67	13,2	231,52	3,2	0,05
18	22,67	22,0	7,03	56,60	0,04	48	582,67	3,3	291,80	6,1	0,06
19	38,67	4,9	5,39	12,80	0,04	49	733,33	4,9	365,04	6,0	0,05
20	24,00	23,6	4,57	10,06	0,04	50	529,33	3,8	335,20	4,0	0,05
21	37,33	13,4	8,56	30,15	0,08	51	1304,00	14,7	752,74	8,0	0,02
22	46,67	8,1	8,16	22,54	0,08	52	1128,67	6,5	779,25	7,1	0,03
23	462,00	8,8	231,51	12,95	0,08	53	240,00	6,7	162,54	6,0	0,02
24	45,33	4,2	23,05	38,61	0,04	54	356,00	13,3	285,38	5,3	0,03
25	68,00	4,8	45,90	32,07	0,03	55	466,00	3,0	377,38	2,5	0,04
26	98,67	10,1	54,73	27,39	0,05	56	485,33	12,8	397,10	2,9	0,06
27	122,67	9,4	75,18	21,52	0,05	57	505,00	8,9	387,10	2,1	0,05
28	141,33	2,7	93,65	16,59	0,05	58	555,00	4,5	382,89	4,3	0,05
29	129,33	7,3	93,26	13,20	0,06	59	614,67	4,1	254,51	5,0	0,13
30	100,00	5,7	90,47	15,19	0,04	60	1048,00	8,7	478,49	11,0	0,00

Fonte: Da autora.

Observa-se na Tabela 3 que a concentração teve uma grande variação, com valores de 1,00 a 1304,00 mg/L, o que mostra o grande alcance da medida do sensor de turbidez. A turbidez variou de 2,12 a 779,25 NTU. O desvio padrão relativo para a CSS teve a maioria dos valores entre 2 e 20% e para a turbidez a maioria dos valores foi entre 2 e 30%.

A Figura 10 mostra a relação turbidez (T) x CSS, com o desvio padrão absoluto, o ajuste linear, a equação da reta e R². Observa-se que a relação da turbidez com a concentração é diretamente proporcional. As concentrações até 300mg/L tiveram os pontos mais próximos à tendência.

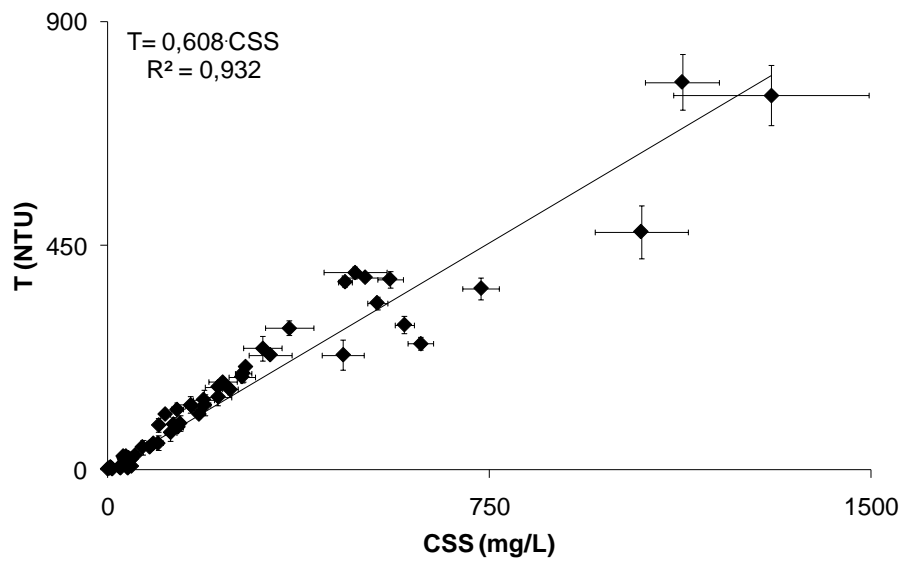


Figura 10- T em função de CSS, desvio padrão, equação da reta e R^2 para os resultados do experimento 1.

Fonte: Da autora.

Com o ajuste linear da relação T x CSS, obteve-se um coeficiente angular de 0,608 e o R^2 de 0,932. Com a equação da reta, calculou-se a CSS estimada (CSS_e) usando os valores de turbidez medidos. A Tabela 4 apresenta os valores de CSS estimada para os 60 pontos experimentais. Para comparar os valores de CSS medidos com os valores de CSS estimados, calculou-se o RMSE de 72,4 mg/L.

Tabela 4- CSS estimada calculada pela equação 4 para as 60 medidas.

Medida	CSS e (mg/L)	Medida	CSS e (mg/L)	Medida	CSS e (mg/L)
1	13,98	21	14,07	41	343,36
2	37,59	22	13,43	42	402,64
3	50,20	23	380,77	43	141,73
4	75,91	24	37,91	44	185,82
5	89,59	25	75,49	45	275,50
6	46,90	26	90,01	46	291,62
7	37,32	27	123,65	47	380,79
8	39,50	28	154,03	48	479,93
9	42,78	29	153,40	49	600,40
10	40,05	30	148,80	50	551,32
11	45,52	31	242,10	51	1238,06
12	10,21	32	215,33	52	1281,65
13	7,52	33	215,82	53	267,34
14	7,25	34	232,56	54	469,38
15	5,91	35	41,73	55	620,69
16	6,18	36	210,98	56	653,13
17	3,49	37	201,14	57	636,67
18	11,57	38	184,88	58	629,75
19	8,86	39	308,66	59	418,60
20	7,52	40	319,54	60	786,99

Fonte: Da autora.

A concentração estimada variou de 3,49 a 1281,65 mg/L. A Figura 11 mostra a relação da CSS pela CSS estimada. O R^2 do ajuste linear da relação CSS x CSSe foi de 0,935.

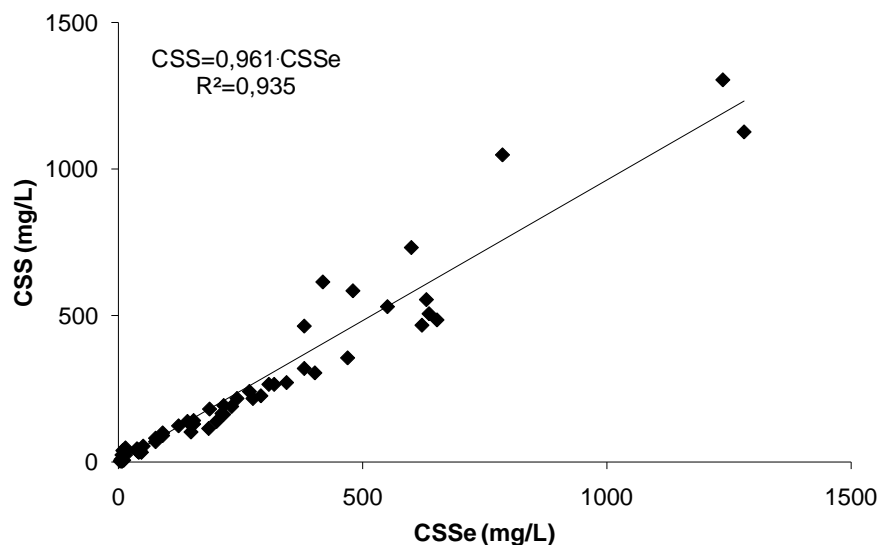


Figura 11- CSS em função da CSS estimada pela equação 4.

Fonte: Da autora.

5.2 EXPERIMENTO 2: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA

A Tabela 5 apresenta os valores médios de CSS e T, com os respectivos valores de desvio padrão relativo (s), a vazão de escoamento (Q_e) para as 12 medidas de cada uma das 4 faixas granulométricas (GR1, GR2, GR3 e GR4). No Anexo B estão todos os valores de turbidez e CSS.

Tabela 5- CSS, T, desvio padrão, vazão e medida para as 4 faixas granulométricas.

GR	Medida	CSS (mg/L)	s (%)	T (NTU)	s (%)	Q_e (L/s)	GR	Medida	CSS (mg/L)	s (%)	T (NTU)	s (%)	Q_e (L/s)
GR1	1	5,33	35,4	7,36	36,6	0,01	GR3	1	2,00	0,0	4,90	33,3	0,002
	2	18,67	10,1	16,24	17,5	0,02		2	5,33	70,7	5,14	14,4	0,002
	3	26,67	14,1	20,70	7,9	0,03		3	8,00	47,1	6,37	17,3	0,01
	4	32,00	0,0	25,48	6,9	0,03		4	12,00	27,3	9,20	19,2	0,04
	5	36,00	0,0	32,19	12,9	0,03		5	21,33	31,9	12,77	11,0	0,04
	6	40,00	8,2	41,51	10,2	0,04		6	16,00	11,8	12,54	15,0	0,05
	7	36,00	9,1	36,11	25,1	0,02		7	22,00	14,9	16,54	20,8	0,05
	8	41,33	4,6	41,76	13,1	0,05		8	30,67	6,2	21,94	11,4	0,04
	9	46,67	4,1	45,41	10,5	0,05		9	20,00	43,2	16,24	25,9	0,01
	10	76,00	0,0	71,33	9,0	0,07		10	32,00	17,7	22,19	12,0	0,03
	11	94,67	2,0	83,83	19,9	0,05		11	46,67	10,7	27,69	18,9	0,04
	12	76,00	0,0	86,98	11,2	0,03		12	49,33	3,8	35,99	24,8	0,05
GR2	1	5,00	0,0	5,88	35,4	0,01	GR4	1	4,00	0,0	2,94	0,0	0,01
	2	12,00	27,3	11,20	27,2	0,01		2	12,00	27,3	7,35	0,0	0,01
	3	16,00	0,0	14,75	24,6	0,01		3	21,33	8,8	8,09	9,1	0,03
	4	34,67	5,5	24,90	26,5	0,03		4	20,00	16,4	10,31	8,2	0,03
	5	42,00	14,3	31,21	25,3	0,03		5	38,67	4,9	18,03	29,7	0,05
	6	42,67	4,4	33,47	27,0	0,03		6	38,00	13,1	16,53	3,6	0,06
	7	52,00	6,3	49,07	5,4	0,04		7	22,67	8,3	9,32	7,5	0,01
	8	48,00	0,0	42,40	22,9	0,05		8	42,67	8,8	12,38	9,5	0,03
	9	57,33	6,6	61,04	9,6	0,05		9	72,00	0,0	23,86	9,3	0,04
	10	45,33	8,3	45,15	25,1	0,01		10	94,67	8,0	26,19	21,4	0,03
	11	56,00	0,0	60,49	1,1	0,01		11	112,00	1,8	34,18	16,2	0,09
	12	50,00	4,0	49,77	12,9	0,03		12	134,00	7,5	40,30	19,0	0,05

Fonte: Da autora.

Os valores de concentração variaram de 5,33 a 94,67 mg/L para GR1, de 5,00 a 57,33 mg/L para GR2, de 2,00 a 49,33 mg/L para GR3 e de 4,00 a 134,00 mg/L para GR4. A turbidez variou de 7,36 a 86,98 NTU para GR1, de 5,88 a 61,04 NTU para GR2, de 4,9 a 35,99 NTU para GR3 e de 2,94 a 40,40 NTU para GR4. A maior parte do desvio padrão relativo para CSS variou de 0,0 a 20,0% e para a turbidez de 0,0 e 40,0%.

A relação T x CSS com o desvio padrão absoluto para as 4 faixas granulométricas, estão apresentados na Figura 12.

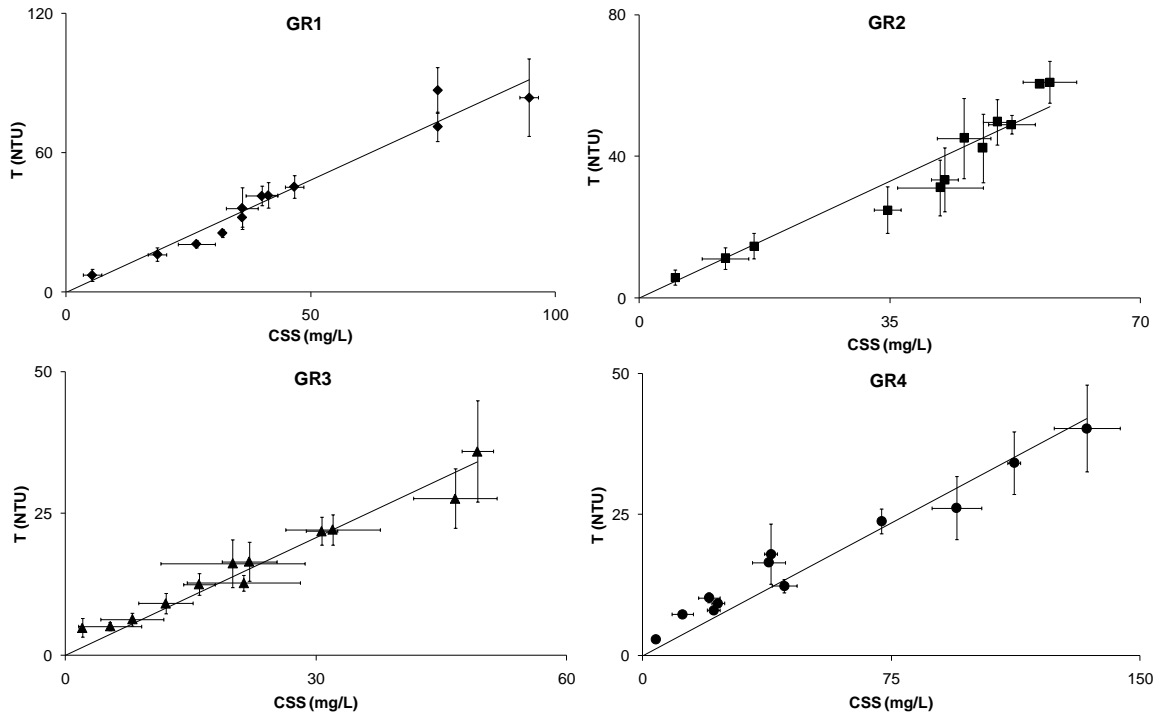


Figura 12- T em função da CSS com o desvio padrão para as 4 granulometrias.
Fonte: Da autora.

As 4 granulometrias podem ser unidas em apenas 1 gráfico, onde a diferença entre as relações de T x CSS ficam mais visíveis. A Figura 13 apresenta a relação T x CSS para as 4 granulometrias, com os ajustes das retas, as equações das retas e os valores de R^2 .

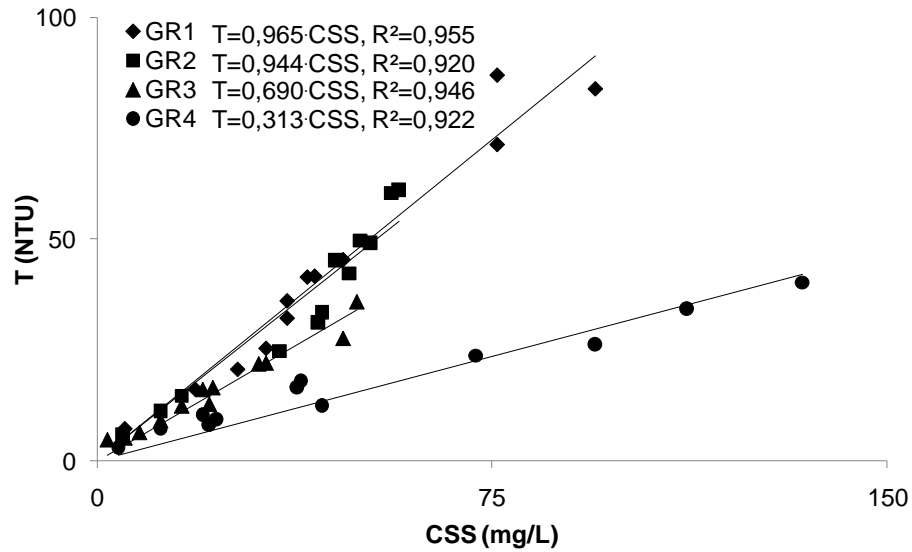


Figura 13- Turbidez em função da CSS, com o ajuste linear, as equações da reta e R^2 para as 4 faixas granulométricas.

Fonte: Da autora.

O coeficiente angular é uma forma de observar o comportamento da turbidez. Observa-se que para uma mesma concentração, a turbidez varia entre as faixas granulométricas, isso pode ser confirmado pelos diferentes valores dos coeficientes angulares obtidos. Com o coeficiente angular, denominado sensibilidade, é possível observar a tendência da relação $T \times CSS$. A Figura 14 traz o coeficiente angular em função da média das faixas granulométricas (GR1, GR2, GR3 e GR4). Com a equação do ajuste polinomial de 2ª ordem é possível determinar o coeficiente angular para qualquer granulometria entre 29 e 69 μm .

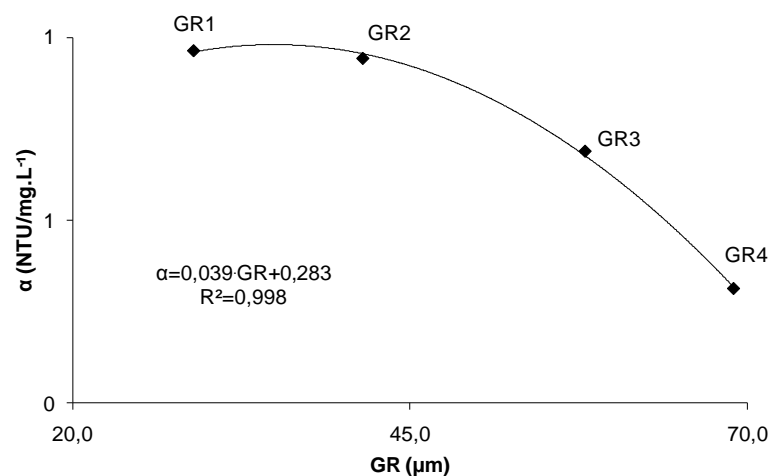


Figura 14- Coeficiente angular em função da média das faixas granulométricas, equação da reta e R^2 .

Fonte: Da autora.

Observa-se que os valores de coeficiente angular diminuem conforme o aumento da granulometria, o que vai de acordo com a afirmação de Ludwing; Hanes (1990) e Conner; De Visser (1992) que diz que a sensibilidade diminui com o aumento da granulometria. Isto ocorre devido a variação na leitura do sensor que acontece devido à menor reflexividade das partículas à medida que se aumenta o seu diâmetro. As partículas de menor diâmetro têm superfícies mais reflexivas por unidade de massa, em função de sua maior área específica, aumentando assim a reflexividade da luz incidente. Estudos recentes observam comportamentos semelhantes a este fato (SARI, 2017; MERTEN; CAPEL; MINELLA, 2014).

Observa-se também que a GR4 tem um coeficiente muito abaixo dos demais, isso se deve ao fato de que GR1, GR2 e GR3 são granulometrias na faixa de silte e argila, enquanto GR4 está na faixa de areia fina.

Com as equações das retas das diferentes granulometrias (Figura 13), calculou-se a CSS estimada para GR1, GR2, GR3 e GR4, estes valores estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- CSS estimada para as 12 medidas das 4 granulometrias.

Medida	CSSe (mg/L)			
	GR1	GR2	GR3	GR4
1	7,62	6,23	7,10	9,39
2	16,82	11,86	7,46	23,49
3	21,45	15,63	9,23	25,85
4	26,4	26,38	13,33	32,92
5	33,36	33,06	18,51	57,6
6	43,02	35,46	18,17	52,81
7	37,42	51,98	23,97	29,78
8	43,28	44,92	31,8	39,54
9	47,06	64,66	23,54	44,28
10	73,92	47,83	32,16	83,68
11	86,88	64,08	40,13	77,27
12	90,14	52,72	52,16	96,82

Fonte: Da autora.

A concentração estimada variou de 7,62 a 90,14 mg/L para GR1, de 6,23 a 64,66 mg/L para GR2, de 7,10 a 52,16 mg/L para GR3 e de 9,39 a 96,82 mg/L para GR4a. A Figura 15 mostra a relação da CSS pela CSS estimada. O R^2 do ajuste linear da relação CSS x CSSe variou de 0,82 a 0,95 mg/L.

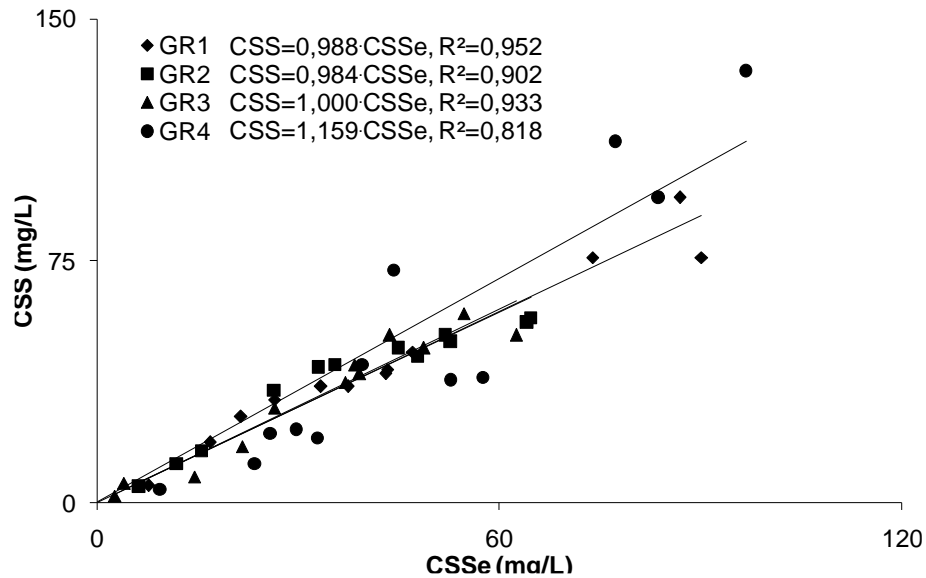


Figura 15- CSS em função da CSSe para as 4 granulometrias.
Fonte: Da autora.

Os valores de RMSE calculados foram de 5,43, 5,36, 3,09 e 19,29mg/L, para GR1, GR2, GR3 e GR4, respectivamente. Ao comparar estes valores com o RMSE do experimento 1, fica clara a influência da granulometria da estimativa de CSS através da turbidez. Observa-se que o erro é muito maior no experimento 1 (72,4), onde foi usada uma grande faixa granulométrica (<63 μ m). Quando se separou as granulometrias no experimento 2, o erro diminuiu para a escala de 3 a 20. Observa-se que para as granulometrias na faixa de silte e argila (GR1, GR2 e GR3), o erro diminuiu com o aumento da granulometria (5,43, 5,36 e 3,09), porém na granulometria de areia fina (GR4) o erro tem um grande aumento (19,29).

Se as diferentes granulometrias não forem consideradas, tem-se uma relação T x CSS única (Figura 16). O coeficiente angular desta relação é 0,613 e pode ser comparado aos coeficientes angulares da relação T x CSS de cada granulometria. Esta diferença foi de 57,4%, 54%, 12,6% e -48,9%, para o coeficiente de GR1, GR2, GR3 e GR4, respectivamente, evidenciando a influência da granulometria.

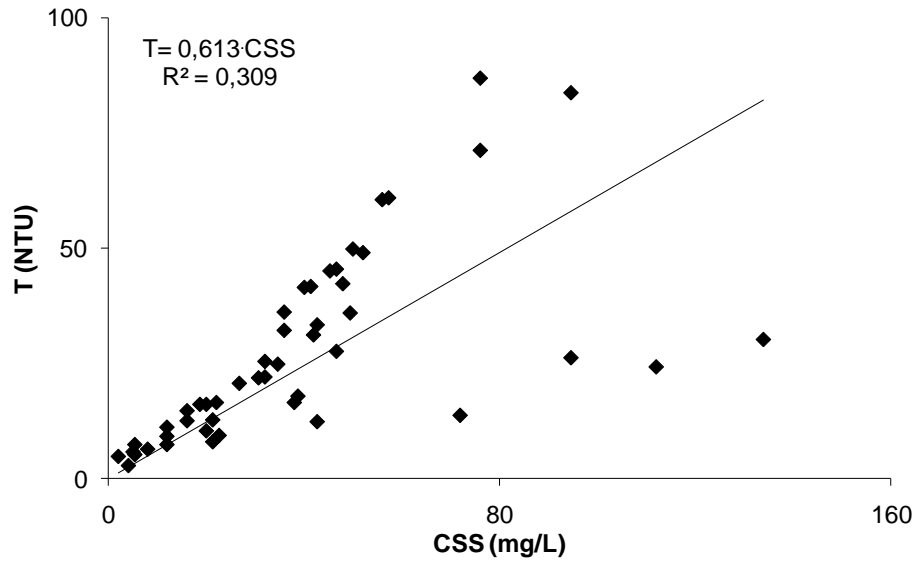


Figura 16- T em função da CSS para todos os dados do experimento 2 sem separação por granulometria.

Fonte: Da autora.

5.3 EXPERIMENTO 3: INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E GRANULOMETRIA

Na Figura 17 estão apresentados os resultados de turbidez em função do tempo de teste (t) para as 4 faixas granulométricas em cada condição de descarga sólida, com a variação da velocidade de v1 a v6. Observa-se o aumento da turbidez em função do tempo, já esperado devido ao aumento da descarga sólida de sedimento em suspensão, o que varia a velocidade de escoamento do canal de v1 a v6. No entanto o aumento é diferente para cada uma das granulometrias dentro de uma mesma condição descarga sólida, observado pelo espalhamento dos resultados com o aumento da velocidade.

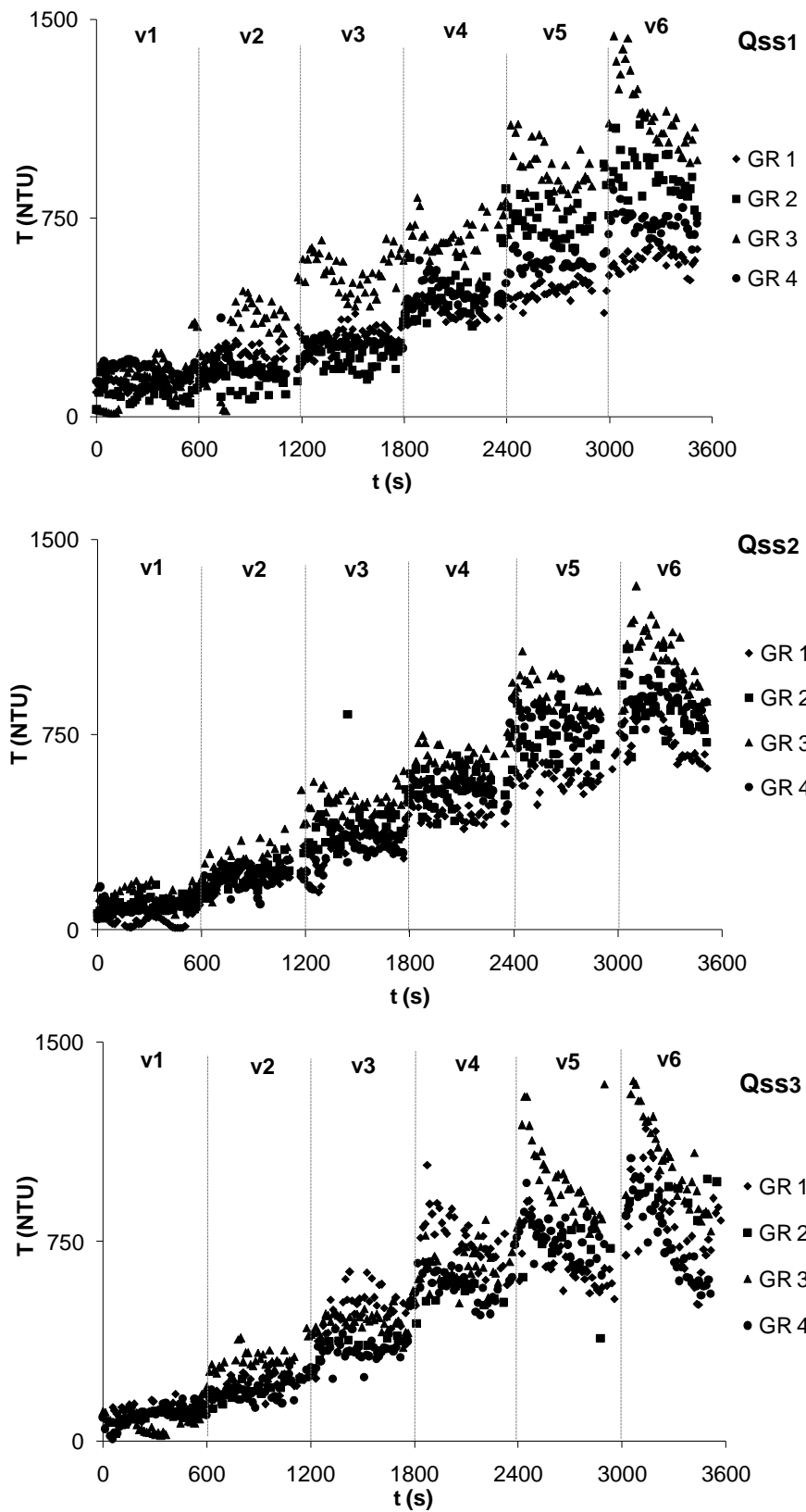


Figura 17- Variação temporal da turbidez das 4 faixas granulométricas para as 3 condições de descarga sólida.

Fonte: Da autora.

5.3.1 Intervalo de descarga sólida de sedimento em suspensão Q_{SS1}

Com os resultados de CSS e de vazão para cada ponto experimental, foi possível calcular a descarga sólida (Q_{SS}). A média dos valores de CSS e de turbidez, os valores de desvio padrão relativo, a vazão e a Q_{SS} de cada uma das 6 medidas para a condição Q_{SS1} estão apresentados na Tabela 7 para as 4 faixas granulométricas. No Anexo C estão todos os valores de turbidez e CSS.

Tabela 7- CSS, T, desvio padrão, vazão e Q_{SS} para as 4 granulometrias da Q_{SS1} .

GR1						GR2					
T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q_e (L/s)	Q_{ss} (mg/s)	T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q_e (L/s)	Q_{ss} (mg/s)
119,69	13,5	42,67	23,6	0,057	2,43	91,58	40,4	9,33	24,8	0,057	0,53
229,27	14,3	58,67	10,4	0,060	3,52	141,82	31,5	34,67	43,7	0,060	2,08
302,90	13,6	117,33	10,4	0,062	7,27	219,84	19,6	66,67	6,9	0,062	4,13
384,97	11,9	152,00	4,6	0,064	9,73	420,23	21,5	242,67	14,2	0,064	15,53
487,38	7,2	228,00	6,3	0,067	15,28	720,46	10,6	404,00	8,9	0,067	27,07
695,75	7,5	340,00	2,4	0,070	23,80	897,82	10,8	508,00	7,0	0,070	35,56
GR3						GR4					
T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q_e (L/s)	Q_{ss} (mg/s)	T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q_e (L/s)	Q_{ss} (mg/s)
120,58	59,0	9,30	24,8	0,057	0,53	177,94	14,1	25,33	9,1	0,057	1,44
314,42	37,7	113,33	16,7	0,060	6,80	171,48	24,2	53,33	8,7	0,060	3,20
539,12	13,0	220,00	4,8	0,062	13,64	270,71	10,3	100,00	8,0	0,062	6,20
655,44	11,8	290,67	5,6	0,064	18,60	446,46	18,0	158,67	3,9	0,064	10,15
904,64	11,2	388,00	11,9	0,067	26,00	572,25	8,4	218,70	8,6	0,067	14,65
1132,58	11,7	486,70	10,7	0,070	34,07	730,53	8,6	314,70	8,5	0,070	22,03

Fonte: Da autora.

A turbidez varia de 119,69 a 695,75 NTU para GR1, de 91,58 a 879,82 NTU para GR2, de 120,58 a 1132,58 NTU para GR3 e de 177,94 a 730,53 NTU para GR4. A CSS varia de 42,67 a 340,00 mg/L para GR1, de 9,33 a 508,00 mg/L para GR2, de 9,30 a 486,70 mg/L para GR3 e de 25,33 a 314,70 mg/L para GR4. O desvio padrão relativo de CSS varia na maior parte entre 2 e 25% e da turbidez entre 7 e 40%.

A Figura 18 apresenta a relação T x CSS para a Q_{SS1} com o ajuste linear e o desvio padrão absoluto para as 4 granulometrias.

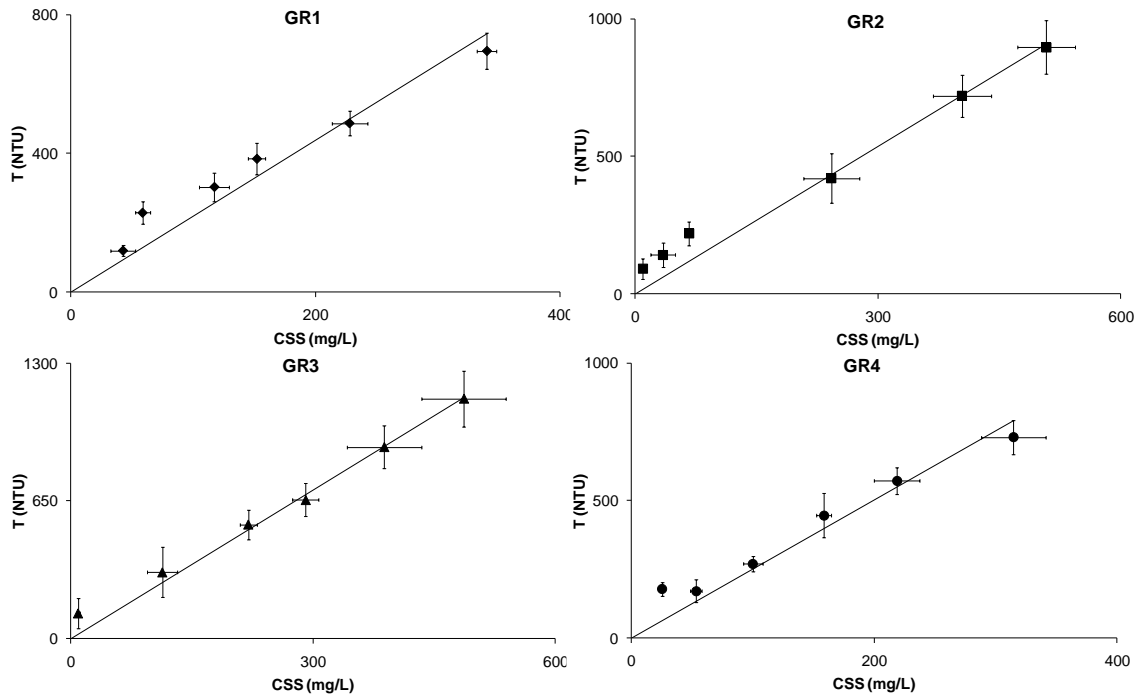


Figura 18- T em função de CSS com o desvio padrão para as 4 granulometrias da Q_{SS1} .

Fonte: Da autora.

A Figura 19 apresenta as relações de T x CSS das 4 granulometrias com as equações da reta e os R^2 . Observa-se que o coeficiente angular diminui de GR1 para GR2, mas depois aumenta em GR3 e GR4. Os melhores ajustes foram para GR2, mas depois aumenta em GR3 e GR4. Os melhores ajustes foram para GR3 em seguida para GR2.

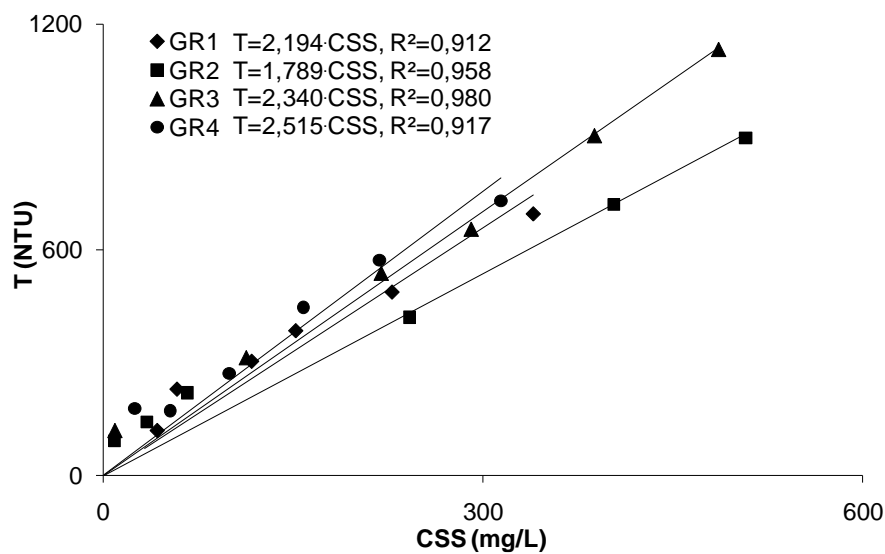


Figura 19- T em função de CSS com a equação da reta e R^2 para as 4 granulometrias da Q_{SS1} .

Fonte: Da autora.

A Figura 20 apresenta os valores de R para cada velocidade (v1 a v6) de cada uma das 4 granulometrias. Observa-se o efeito da concentração na relação R cuja tendência em GR2, GR3 e GR4 é de diminuir com o aumento da velocidade. Este aumento de velocidade pode ser visto também como aumento de concentração de sedimentos em suspensão, logo com o aumento da concentração a relação T/CSS é menor.

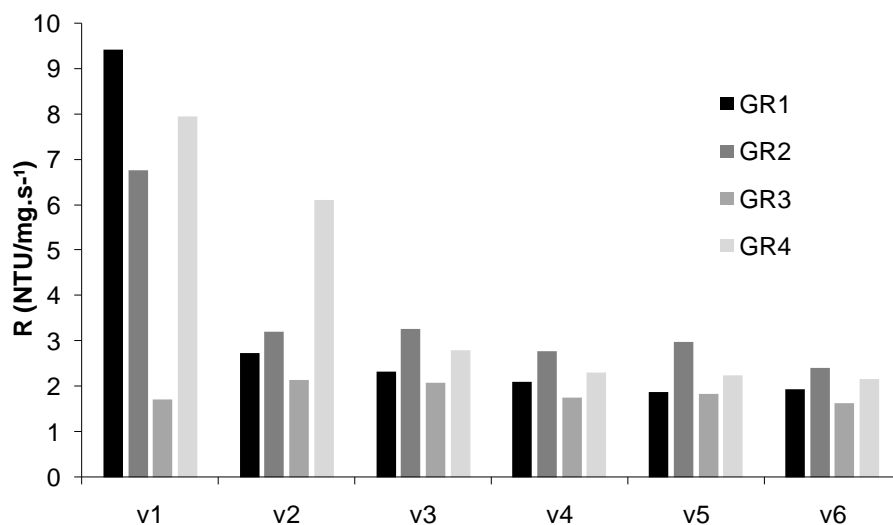


Figura 20- R para as 6 velocidades das 4 granulometrias em Q_{SS1} .

Fonte: Da autora.

5.3.2 Intervalo de descarga sólida de sedimento em suspensão Q_{SS2}

A média dos valores de CSS e de turbidez, os valores de desvio padrão relativos, a vazão e a Q_{SS} de cada uma das 6 pontos medidas de Q_{SS2} estão apresentados na Tabela 8 para as 4 faixas granulométricas.

A turbidez varia de 36,71 a 737,15 NTU para GR1, de 98,39 a 865,98 NTU para GR2, de 123,86 a 1035,03 NTU para GR3 e de 83,78 a 967,95 NTU para GR4. A CSS varia de 10,70 a 406,70 mg/L para GR1, de 33,30 a 593,30 mg/L para GR2, de 30,70 a 442,70 mg/L para GR3 e de 20,00 a 422,70 mg/L para GR4. O desvio padrão relativo de CSS varia na maior parte entre 2 e 20% e da turbidez entre 7 e 30%. No Anexo D estão todos os valores de turbidez e CSS.

Tabela 8- T, CSS, valores de desvio padrão, Q e Q_{ss} para as 4 granulometrias na Q_{ss2}.

GR1						GR2					
T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q _e (L/s)	Q _{ss} (mg/s)	T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q _e (L/s)	Q _{ss} (mg/s)
36,71	65,7	10,70	21,6	0,095	1,02	98,39	30,5	33,30	13,9	0,095	3,16
187,17	23,6	24,00	16,7	0,098	2,35	196,81	23,3	101,30	6,0	0,098	9,93
324,41	18,5	100,00	21,2	0,100	10,00	283,98	31,8	190,70	4,4	0,100	19,07
441,29	11,1	205,00	5,6	0,102	20,91	529,99	14,4	396,00	2,0	0,102	40,39
589,99	9,3	293,30	4,4	0,105	30,80	722,89	13,5	486,70	6,2	0,105	51,10
737,15	11,7	406,70	3,5	0,108	43,92	865,98	11,7	593,30	8,2	0,108	64,08

GR3						GR4					
T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q _e (L/s)	Q _{ss} (mg/s)	T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q _e (L/s)	Q _{ss} (mg/s)
123,86	29,0	30,70	32,8	0,095	2,92	83,78	22,6	20,00	20,0	0,095	1,90
243,26	26,2	98,70	13,0	0,098	9,67	182,38	26,8	45,30	13,5	0,098	4,44
478,97	10,1	188,00	11,3	0,100	18,80	296,39	21,7	89,30	2,6	0,100	8,93
625,32	10,6	246,70	10,4	0,102	25,16	500,00	15,2	193,30	15,5	0,102	19,72
886,55	9,0	353,30	4,3	0,105	37,10	789,85	11,7	272,00	15,4	0,105	28,56
1035,03	11,6	442,70	4,2	0,108	47,81	967,95	7,3	422,70	7,6	0,108	45,65

Fonte: Da autora.

A Figura 21 apresenta a relação T x CSS para Q_{ss2} com o ajuste linear e o desvio padrão das 4 granulometrias.

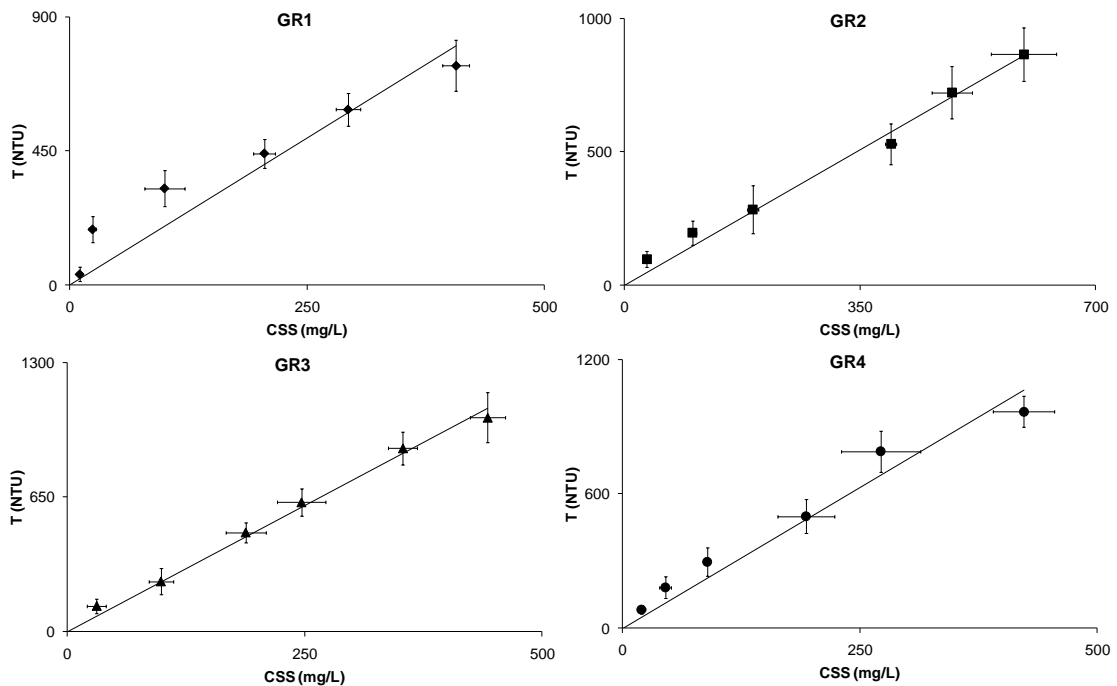


Figura 21- T em função de CSS com o desvio padrão para as 4 granulometrias da Q_{ss2}.

Fonte: Da autora.

A Figura 22 apresenta as relações T x CSS para as 4 granulometrias com as equações da reta e os R^2 . Observa-se que o coeficiente angular diminui de GR1 para GR2, porém aumenta em GR3 e GR4. Os melhores ajustes foram para GR3 em seguida para GR2.

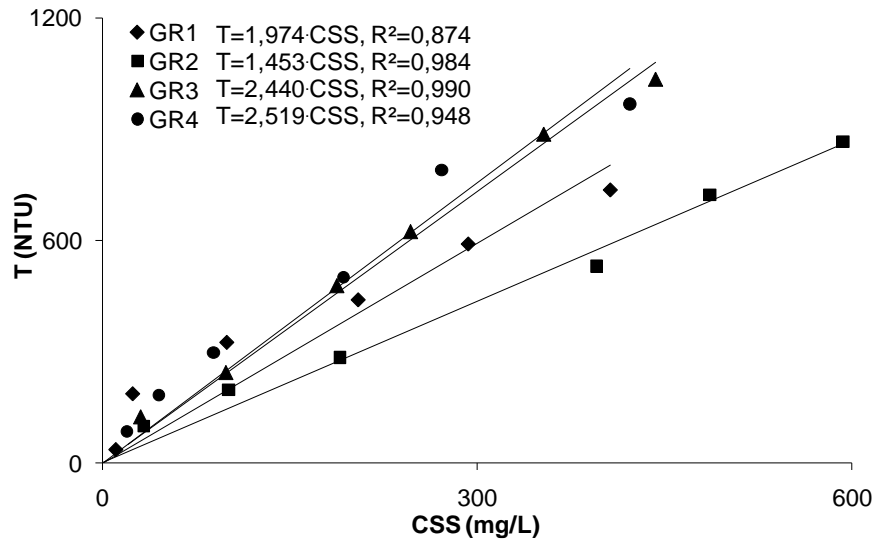


Figura 22- T em função de CSS com a equação da reta e R^2 para as 4 granulometrias da Q_{SS2} .

Fonte: Da autora.

A Figura 23 apresenta os valores de R para cada velocidade (v1 a v6) de cada uma das 4 granulometrias de Q_{SS2} . Pode-se observar o efeito da concentração na relação R cuja tendência em GR2, GR3 e GR4 é de diminuir com o aumento da velocidade.

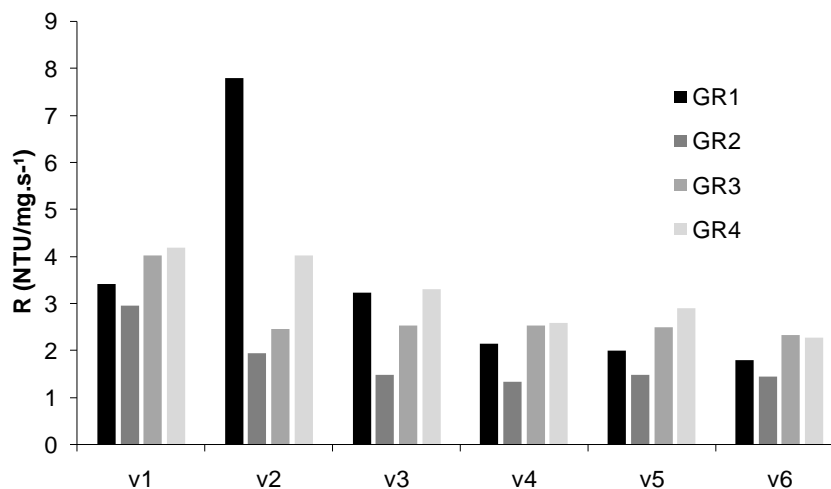


Figura 23- R para as 6 velocidades das 4 granulometrias em Q_{SS2} .

Fonte: Da autora.

5.3.3 Intervalo de descarga sólida de sedimento em suspensão Q_{SS3}

A média dos valores de CSS e de turbidez, os valores de desvio padrão relativo, a vazão e a Q_{SS} de cada uma das 6 medidas de Q_{SS3} estão apresentados na Tabela 9 para as 4 faixas granulométricas.

A turbidez varia de 125,73 a 835,87 NTU para GR1, de 90,33 a 928,89 NTU para GR2, de 73,49 a 1050,19 NTU para GR3 e de 95,35 a 849,25 NTU para GR4. A CSS varia de 13,33 a 430,70 mg/L para GR1, de 13,33 a 383,70 mg/L para GR2, de 42,67 a 640,00 mg/L para GR3 e de 12,00 a 390,70 mg/L para GR4. O desvio padrão relativo de CSS varia na maior parte entre 0,6 e 40% e da turbidez entre 7 e 40%. No Anexo E estão todos os valores de turbidez e CSS.

Tabela 9- T, CSS, valores de desvio padrão, Q e Q_{SS} para as 4 granulometrias na Q_{SS3} .

GR1						GR2					
T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q_e (L/s)	Q_{ss} (mg/s)	T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q_e (L/s)	Q_{ss} (mg/s)
125,73	18,2	13,33	69,3	0,147	1,96	90,33	39,5	13,33	45,8	0,147	1,96
215,64	18,0	78,67	7,8	0,150	11,80	188,24	26,3	58,67	17,2	0,150	8,80
492,47	16,1	210,67	5,8	0,152	32,02	365,80	14,7	112,00	7,1	0,152	17,02
750,97	13,9	357,33	0,6	0,154	55,03	540,09	15,6	194,67	2,4	0,154	29,98
750,97	12,9	397,70	5,9	0,157	62,44	707,19	22,0	237,30	21,3	0,157	37,26
835,87	20,2	430,70	12,5	0,160	68,91	928,89	9,3	383,70	1,6	0,160	61,39
GR3						GR4					
T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q_e (L/s)	Q_{ss} (mg/s)	T (NTU)	s (%)	CSS (mg/L)	s (%)	Q_e (L/s)	Q_{ss} (mg/s)
73,49	40,6	42,67	43,3	0,147	6,27	95,35	37,3	12,00	33,3	0,147	1,76
279,61	21,3	130,67	14,5	0,150	19,60	179,10	19,7	29,33	31,5	0,150	4,40
452,08	7,0	217,33	3,8	0,152	33,03	331,81	13,6	118,67	23,7	0,152	18,04
624,32	15,5	356,00	23,4	0,154	54,82	571,77	14,1	246,67	5,7	0,154	37,99
957,01	16,3	522,70	15,5	0,157	82,06	852,87	9,5	378,70	9,0	0,157	59,46
1050,19	15,3	640,00	7,6	0,160	102,40	849,25	16,2	390,70	9,3	0,160	62,51

Fonte: Da autora.

A Figura 24 apresenta a relação T x CSS para a Q_{SS3} com o ajuste linear e o desvio padrão absoluto das 4 granulometrias.

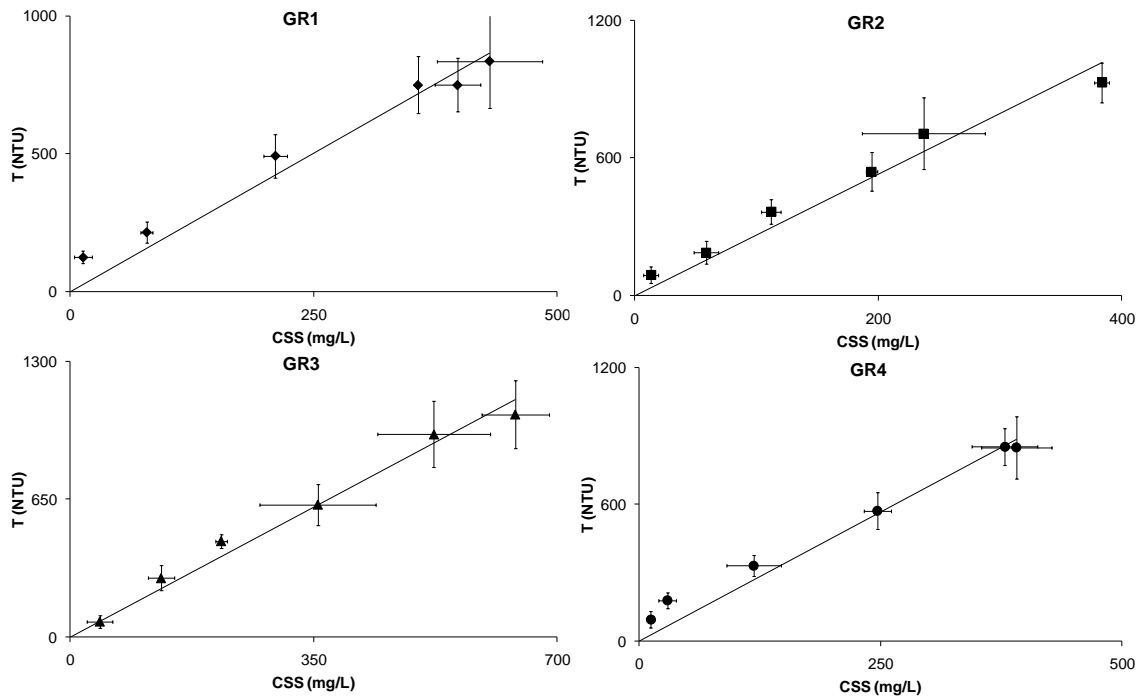


Figura 24- T em função de CSS com o desvio padrão para as 4 granulometrias da Q_{SS3} .

Fonte: Da autora.

A Figura 25 apresenta as relações T x CSS para as 4 granulometrias com as equações da reta e os R^2 . Observa-se que o coeficiente angular aumenta de GR1 a GR2, depois diminui em GR3 e volta a aumentar em GR4. O melhor ajuste foi para GR3.

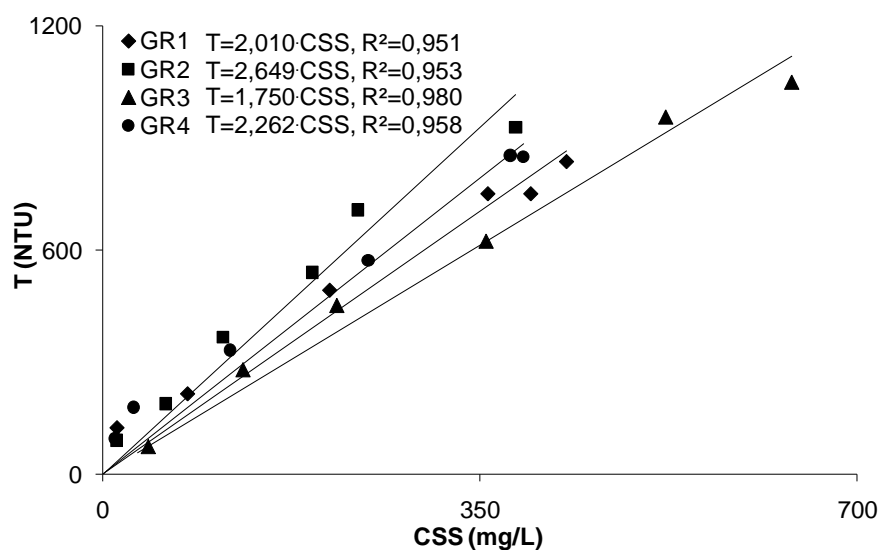


Figura 25- T em função de CSS com a equação da reta e R^2 para as 4 granulometrias da Q_{SS3} .

Fonte: Da autora.

A Figura 26 apresenta os valores de R para cada velocidade (v1 a v6) de cada uma das 4 granulometrias de Q_{SS3} . Pode-se observar o efeito da velocidade de escoamento na relação R cuja tendência em GR1, GR2 e GR4 é de diminuir com o aumento da concentração. Em GR3 a relação R se mantém quase constante.

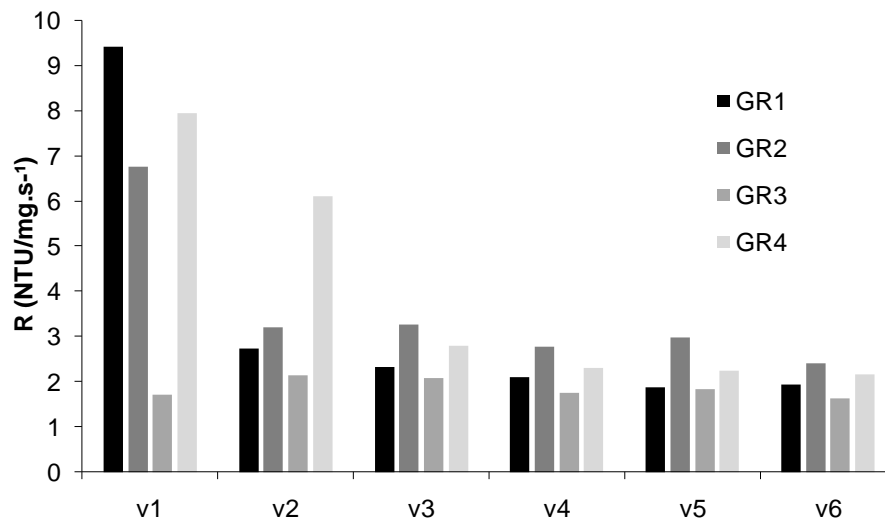


Figura 26- R para as 6 velocidades das 4 granulometrias em Q_{SS3} .
Fonte: Da autora.

5.3.4 Comparação dos diferentes intervalos de descarga sólida de sedimentos em suspensão

Os valores de R^2 e coeficiente angular de cada Q_{SS} podem ser comparados aos valores do ajuste da relação de CSS x T com a união dos dados de granulometria e de condição de descarga sólida (Q_{SS1} , Q_{SS2} e Q_{SS3}) (Figura 27). Obteve-se o coeficiente angular de 2,032 e um R^2 de 0,848. A diferença deste coeficiente com os demais variou de -549% a 23%. Estes resultados mostram a importância de considerar a influência da granulometria e da concentração na relação T x CSS.

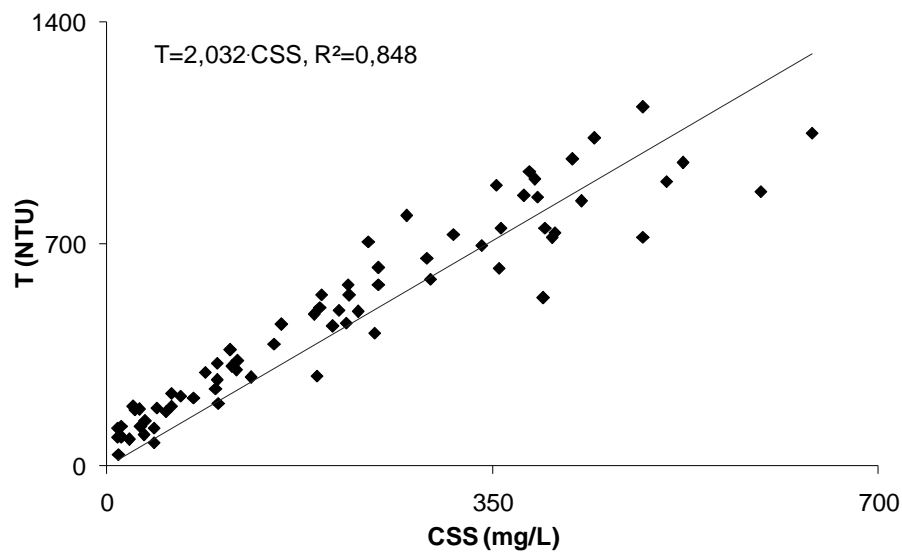


Figura 27- CSS pela turbidez sem separação por granulometria e Q_{SS} .
Fonte: Da autora.

Os resultados do experimento 2 e 3 podem ser analisados de forma conjunta, considerando as semelhanças da metodologia. O experimento 2 será chamado de Q_{SS0} . A Tabela 10 mostra a comparação entre a descarga sólida máxima e mínima de cada Q_{SS} . Observa-se que tanto a descarga mínima como a máxima aumentam de Q_{SS0} a Q_{SS3} .

Tabela 10- Dados de descarga sólida de sedimentos em suspensão máxima e mínima de cada condição de descarga sólida.

	$Q_{SS\text{mín}}$ (mg/s)	$Q_{SS\text{máx}}$ (mg/s)
Q_{SS0}	0,004	10,08
Q_{SS1}	0,53	35,56
Q_{SS2}	1,02	64,08
Q_{SS3}	1,76	102,4

Fonte: Da autora.

O comportamento de todos os coeficientes angulares dos 2 experimentos, e portanto dos 4 intervalos de descarga sólida, fica mais visível na Figura 28. Para todas as granulometrias o coeficiente aumenta bruscamente de Q_{SS0} para Q_{SS1} e depois se mantém aproximadamente constante.

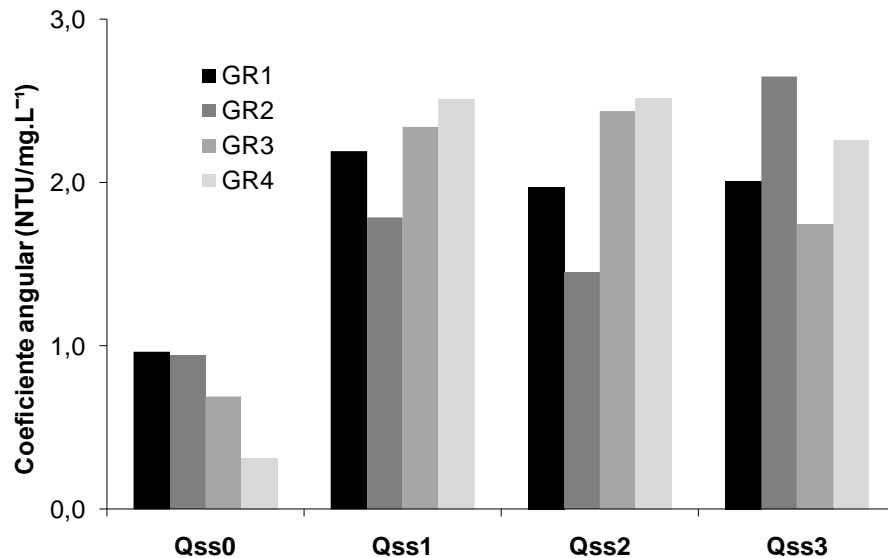


Figura 28- Coeficiente angular das 4 granulometrias nos 4 Q_{ss}.
Fonte: Da autora.

Em Q_{ss1}, Q_{ss2}, Q_{ss3} o coeficiente angular não apresenta a tendência observada em Q_{ss0}. Isso se deve à influência da variação da CSS nas diferentes condições de descarga sólida testadas e também ao processo de medição utilizado pelo sensor (reflexão da luz incidente nas partículas).

Em Q_{ss1}, Q_{ss2} e Q_{ss3} a tendência observada em Q_{ss0} não é observada devido ao grande aumento da CSS, em todas as faixas granulométricas analisadas. Isto gera uma condição de maior número de grãos suspensos que refletem a luz incidente. Nessas condições a leitura do sensor se mostrou mais sensível às mudanças de CSS. Observando-se cada granulometria isolada verifica-se uma tendência de aumento da sensibilidade com o aumento da descarga sólida.

A fim de avaliar o quanto a concentração afeta a relação T x CSS, calculou-se o coeficiente de variação (cv) do coeficiente angular entre as condições de descarga sólida. Os valores obtidos foram de 0,42, 0,14, 0,23 e 0,18 para Q_{ss0}, Q_{ss1}, Q_{ss2} e Q_{ss3}, respectivamente. Observa-se que o coeficiente de variação diminui com o aumento da descarga sólida de Q_{ss0} a Q_{ss1} e a dispersão da sensibilidade em torno da média é muito maior em Q_{ss0} se comparada com Q_{ss1}, Q_{ss2} e Q_{ss3}. Isto indica que para as maiores concentrações a sensibilidade tende a ser mais uniforme. Os valores de cv para as granulometrias foram de 0,31, 0,42, 0,45 e 0,56 para GR1, GR2, GR3 e GR4, respectivamente. Observa-se que as maiores granulometrias tem maior influência sobre a relação T x CSS.

6 CONCLUSÃO

Foram realizados experimentos com diferentes concentrações e faixas granulométricas de sedimento com o objetivo de analisar a influência da concentração e da granulometria na medida do sensor de turbidez para a estimativa da concentração de sedimento em suspensão.

Em todos os experimentos a relação turbidez x CSS foi linear e diretamente proporcional. O R^2 do experimento 1 foi de 0,93, para o experimento 2 variou de 0,92 a 0,95 e para o experimento 3 variou de 0,87 a 0,99, com isso pode-se dizer que todas as relações obtiveram um bom ajuste.

Observou-se alguns valores de desvio padrão relativo acima de 50%, logo para diminuir este erro, deve-se aumentar o controle sobre as variáveis do experimento.

Conclui-se ainda que a diferença entre a CSS medida e a estimada é maior quando se considera uma faixa granulométrica mais heterogênea, com a separação das faixas granulométricas esta diferença foi até 28% menor.

Este trabalho mostrou o grande alcance do sensor, capaz de medir as concentrações a partir de 0 até 1300mg/L. Conclui-se que com o aumento da concentração os pontos se distanciam da tendência e a relação entre turbidez e CSS diminui.

Outra conclusão foi de que a relação T x CSS é influenciada pela variação da granulometria, pois em todos os casos esta relação foi diferente para as diferentes granulometrias. Isso se deve à reflexividade da partícula, sendo que as partículas de diâmetros menores têm uma maior reflexão da luz incidente.

Nas condições de baixa concentração a turbidez diminui com o aumento da granulometria. Porém, com o aumento da descarga sólida o efeito da granulometria sobre a sensibilidade da relação concentração x turbidez é menor.

Por fim, conclui-se que a influência da concentração e da granulometria deve ser considerada sobre a medida da turbidez. A não observância destas conclusões pode levar a erros na calibração da medida do sensor óptico de turbidez e portanto na estimativa da concentração de sedimentos em suspensão.

As sugestões para os próximos passos a serem tomados nesta linha de pesquisa são a continuação do estudo da influência da concentração e granulometria em outros sensores de turbidez, da influência de outros fatores sobre

a medida de turbidez, como a cor, forma e composição mineralógica das partículas, turbulência e matéria orgânica e a aplicação destes resultados no monitoramento em campo.

REFERÊNCIAS

ABE, T. et al. High range turbidity monitoring in the Mu and Saru river basins: all-year monitoring of hydrology and suspended sediment transport in 2010. **International Journal of Japan Erosion Control Engineering**, v. 5, p. 70-79, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Relatório Técnico: **Análise preliminar sobre a qualidade d'água e seus reflexos sobre os usos da água (2016)**. Disponível em: <http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Doce/ANA/relatorios/>. Acesso em: 19 jan. 2017.

ANDERSON, C. W. et al. Surrogate technologies for monitoring suspended sediment transport in rivers. In: POLETO, C.; CHARLEWORTH, S. **Sedimentology of aqueous systems**. Singapore: Willey- Blackwell, 2010.

ANKCORN, P. D. Clarifying turbidity - the potential and limitations of turbidity as a surrogate for water quality monitoring. In: GEORGIA WATER RESOURCES CONFERENCE, 2003, Athens. **Proceedings...**Athens, 2003.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American public health association, American water works association, water environment federation, 1998.

BARTELS, G. K.; TERRA, V. S. S.; COLLARES, G. L. Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão com o uso de sensor ótico de turbidez na bacia do arroio do ouro no rio grande do sul. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 11, João Pessoa-PB. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2014.

BAYRAM, A.; KANKAL, M.; ONSOY, H. Estimation of suspended sediment concentration from turbidity measurements using artificial neural networks. **Environmental Monitoring Assessment**, v.184, p.4355-4365, 2012.

BISANTINO, T.; GENTILE, F.; LIUZZI, G. T. Continuous monitoring of suspended sediment load in semi-arid environments. In: GINSBERG, S.S. (Ed.) **Sediment transport**, Intech, 2011, p. 295-312

BORTOLUZZI, E. C.; POLETO, C. Metodologias para estudos de sedimentos: ênfase na proporção e na natureza mineralógica das partículas. In: POLETO, C.; MERTEN, G.H. (Ed.) **Qualidade dos sedimentos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2013.

BRAGA, et al. **Introdução a engenharia ambiental**. 8. Ed. São Paulo, SP: Person Prentice Hall, 2005.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ªed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2008.

CARVALHO, N.O. et al. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000.

CHIKITA, K. A. et al. The intra-annual variability of discharge, sediment load and chemical flux from the monitoring: the Yukon River, Alaska. **Journal Water Resource Protection**, v. 4, p. 173-179, 2012.

CLIFFORD, N. J. et al. Laboratory and field assessment of an infrared turbidity probe and its response to particle size and variation in suspended sediment concentration. **Hydrological Sciences Journal**, v. 40, p. 771-791, 1995.

CONCEIÇÃO, F. T.; BONOTTO, D. M. Relações hidroquímicas aplicadas na avaliação da qualidade da água e diagnóstico ambiental na bacia do Rio Corumbataí (SP). **Geochimica Brasiliensis**, vol. 16, pp. 1-21, 2002.

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.

DALBIANCO, L. et al. Eficiência na estimativa da concentração de sedimentos em suspensão por diferentes estratégias amostrais na calibração de turbidímetros. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 10, Porto Alegre, RS: ABRH, 2012. **Anais...** Porto Alegre, 2012.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 4. Ed. São Paulo, SP: Editora Oficina de Textos, p. 50-51, 2012.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 602 p., 1998.

FELDMANN, F. **Guia da ecologia: para entender e viver melhor a relação homem natureza**. São Paulo, Editora Abril, 62 p., 1992.

FOSTER, I. D. L.; MILLINGTON, R.; GREW, R. G. The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield estimation. In: OSLO SYMPOSIUM, Oslo, 1992. Proceedings... Oslo: IAHS, 1992. p. 51-52.

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

GRAY, J.R.; GARTNER, J. W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. **Water Resources Research**, v.45, 2009.

HAIMANN, M. et al. An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept. **International Journal Sediment Research**, v. 29, p. 135-148, 2014.

HARRINGTON, S. T.; HARRINGTON, J. R. An assessment of the suspended sediment rating curve approach for load estimation on the Rivers Bandon and Owenabue, Ireland. **Geomorphology**, v. 185, p. 27-38, 2013.

HARRINGTON, S. T.; HARRINGTON, J. R. Dynamics of suspended sediment flux on the rivers bandon and owenabue, Ireland. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 9, p. 861-873, 2014.

LEE, C.; FOSTER, G. Assessing the potential of reservoir outflow management to reduce sedimentation using continuous turbidity monitoring and reservoir modeling. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 1426-1439, 2013.

LEWIS, J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. **Water Resources Research**, v.32, n. 7, p.2299-2310, 1996.

LEWIS, J.; EADS, R. **Implementation guide for turbidity threshold sampling: principles, procedures and analysis**. Albany, CA: U.S. 87 p, 2009.

LIMA, J. E. F. W. et al. Avaliação do uso de turbidímetro na estimativa da concentração de sedimentos de amostras coletadas em calhas de monitoramento de enxurrada. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 10, Porto Alegre, RS: ABRH, 2012. **Anais...** Porto Alegre, 2012.

LUDWING K. A.; HANES D. A laboratory evaluation of optical backscatterance suspended solids sensors exposed to sand-mud mixtures. **Marine Geology**, v. 94, p. 173–179, 1990.

MEDEIROS, P. R. P.; SEGUNDO, G. H. C.; MAGALHÃES, E. M. M. Comportamento da turbidez e material em suspensão, em um rio com vazão regularizada por sistema de barragens em cascata: Rio São Francisco (NE, Brasil). **Geochimica Brasiliensis**, v. 29, n. 1, p. 35-44, 2015.

MERTEN, G. H.; CAPEL, P. D.; MINELLA, J. P. G. Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. **Journal of Soils and Sediments**, v.14, p.1235-1241, 2014.

MINELLA, J.P.G. et al. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. **Hydrological Processes**, v.22, n.12, p. 1819-1830, 2008.

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

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

NEUPANE, S. et al. Development of a turbidity prediction methodology for runoff-erosion models. **Water, Air and Soil Pollution**, doi: 10.1007/s11270-015-2679-9, 2015.

OCHIAI, S. et al. Sediment transport processes in a reservoir–catchment system inferred from sediment trap observations and fallout radionuclides. **Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry**, v. 303, p. 1497-1501, 2015.

PAVANELLI, D.; BIGI, A. Indirect methods to estimate suspended sediment concentration: reliability and relationship of turbidity and settleable solids. **Biosystems Engineering**, v.90, n.1, p.75-83, 2005.

POLETO, C. (Ed.) **Sedimentologia fluvial: estudos e técnicas**. Porto Alegre, RS: ABRH, 2014, v.1, 218 p.

POLETO, C.; MERTEN, G. H. **Qualidade dos sedimentos**. Porto Alegre, RS: ABRH, p. 20, 2013.

PORTO, R. **Hidráulica básica**. 4ª ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

ROCHA, O.; PIRES, J.S.R.; SANTOS, J.E. A bacia hidrográfica como unidade de estudo e planejamento. In: ESPÍNDOLA, E.L.G. (Coord.) **A bacia hidrográfica do rio Monjolinho: uma abordagem ecossistêmica e a visão interdisciplinar**. RIMA, São Carlos, 188p., 2000.

ROBERT, E., et al. Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field reflectance data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 52, p. 243-251, 2016.

SARI, V.; CASTRO, N.M.R.; KOBİYAMA, M. Estimativa da concentração de sedimentos suspensos com sensores ópticos: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, p. 816-836, 2015.

SARI, V. et al. Efeitos do tamanho da partícula e da concentração de sedimentos suspensos sobre a turbidez. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, 213-219, 2017.

SARI, V.; POLETO, C.; CASTRO, N. M. R. Caracterização dos processos hidrossedimentológicos em bacias rurais e urbanas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, p. 624, 2013.

SCHOELLHAMER, D. H.; WRIGHT, S. A. Continuous measurement of suspended-sediment discharge in rivers by use of optical backscatterance sensors. **International Association of Hydrological Sciences Publications**, v. 283, p. 28-36, 2003.

SHELLENBARGER, G. G.; WRIGHT, S. A.; SCHOELLHAMER, D. H. A sediment budget for the southern reach in San Francisco Bay, CA: implications for habitat restoration. **Marine Geology**, v. 345, p. 281-293, 2013.

STONE, P.M.; WALLING, D.E. Particle size selectivity considerations in suspended sediment budget investigations. **Water, Soil and Air Pollution**, v. 99, p. 63-70, 1997.

SUN, H; CORNISH, P.S.; DANIELL, T.M. Turbidity-based erosion estimation in a catchment in South Australia. **Journal of Hydrology**, v. 253, n. 1-4, p. 227-238, 2001.

TENA, A. et al. Suspended sediment dynamics in a large regulated river over a 10-year period (the lower Ebro, NE Iberian Peninsula). **Geomorphology**, v. 125, p. 73-84, 2011.

Anexo A- Turbidez e CSS do experimento 1

Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)
1	20,00	7,353	7	44,00	20,697	13	8,00	2,939	19	36,00	4,408	25	68	20,697
	24,00	7,353		40,00	20,697		8,00	2,939		40,00	4,408		72	28,176
	28,00	7,353		40,00	20,697		4,00	2,939		40,00	4,408		64	35,703
	7,353				20,697						5,880			41,757
	7,353				22,189						5,880			49,368
	8,828				23,683						5,880			58,563
	8,828				25,179						5,880			53,957
	8,828				23,683						5,880			69,376
13,265			26,677				5,880		55,490					
2	40,00	20,697	8	36,00	22,189	14	0,00	4,408	20	20,00	4,408	26	112,00	29,678
	36,00	22,189		40,00	22,189		12,00	4,408		32,00	4,408		96,00	35,703
	40,00	22,189		48,00	22,189		0,00	4,408		20,00	4,408		88,00	46,318
	22,189				23,683						4,408			49,368
	22,189				25,179						4,408			55,490
	23,683				25,179						4,408			60,102
	23,683				25,179						4,408			74,038
	23,683				25,179						4,408			69,376
25,179			25,179				5,880		72,482					
3	56,00	28,176	9	36,00	23,683	15	4,00	2,939	21	32,00	4,408	27	124,00	49,368
	52,00	26,677		32,00	25,179		12,00	2,939		44,00	4,408		136,00	52,426
	52,00	26,677		36,00	25,179		8,00	2,939		36,00	11,784		108,00	61,643
	28,176				26,677						11,874			72,482
	28,176				25,179						10,305			78,717
	29,678				25,179						8,828			91,277
	32,687				26,677						8,828			86,553
	37,214				26,677						7,753			89,701
37,214			29,678				8,828		94,436					
4	76,00	43,276	10	24,00	22,189	16	0,00	2,939	22	44,00	5,880	28	136,00	61,643
	84,00	43,276		32,00	22,189		8,00	2,939		44,00	5,880		144,00	78,717
	84,00	43,276		48,00	23,683		0,00	2,939		52,00	7,353		144,00	84,982
	43,276				23,683						7,353			89,701
	49,368				25,179						7,353			99,189
	46,318				25,179						8,828			100,777
	47,842				25,179						8,828			111,944
	49,368				25,179						10,305			105,551
49,368			26,677				11,704		110,343					
5	92,00	52,426	11	32,00	25,179	17	0,00	2,939	23	548,00	270,829	29	136,00	72,482
	104,00	49,368		28,00	25,179		0,00	2,939		468,00	270,829		116,00	74,038
	72,00	50,896		44,00	25,179		0,00	2,939		456,00	246,114		136,00	86,553
	55,490				26,677						240,685			91,277
	53,957				29,678						240,865			107,147
	53,957				31,181						232,156			99,189
	55,490				29,678						209,730			100,777
	60,102				28,176						189,812			103,958
58,563			28,176				182,566		103,958					
6	24,00	28,176	12	4,00	5,880	18	24,00	2,939	24	48,00	7,353	30	104,00	67,825
	36,00	26,677		8,00	5,880		16,00	2,939		44,00	13,265		104,00	66,277
	32,00	25,179		4,00	5,880		28,00	2,939		44,00	17,719		92,00	83,413
	26,677				5,880						19,207			102,366
	26,677				5,880						23,683			97,603
	28,176				5,880						10,305			92,856
	29,678				5,880						11,784			100,777
	32,687				7,353						11,784			102,366
32,687			7,353				11,784		100,777					

Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)
31	204,00	119,978	37	152,00	64,730	43	144,0	67,825	49	780,00	319,535	55	452,00	360,233
	192,00	131,303		132,00	96,019		124,0	81,846		692,00	339,770		480,00	390,403
	252,00	121,590		124,00	115,152		144,0	80,281		728,00	328,705		372,00	367,731
		149,287			119,978			81,846			356,496			379,033
		159,192			113,547			83,413			382,816			379,033
		164,169			124,820			88,126			401,841			388,504
		167,497			123,204			88,126			373,374			380,924
		150,933			129,680			91,277			365,854			380,924
		160,849			129,680			94,436			371,491			369,610
32	200,00	97,603	38	100,00	89,701	44	172,00	86,553	50	508,0	276,173	56	564,00	330,544
	196,00	103,958		112,00	94,436		184,00	96,019		524,0	321,365		480,00	411,424
	176,00	121,590		124,00	107,147		180,00	103,958		556,0	315,880		412,00	398,021
		119,978			110,343			105,551			326,867			419,124
		126,438			116,759			116,759			328,705			398,021
		149,287			115,152			118,367			349,044			390,403
		147,642			113,547			123,204			349,044			384,710
		159,192			113,547			121,590			354,630			384,710
		152,581			110,343			118,367			336,074			390,403
33	200,00	97,603	39	300,00	136,185	45	220,00	160,849	51	800,00	646,935	57	460,00	341,621
	164,00	111,944		240,00	165,832		248,00	165,832		1112,00	690,095		550,00	399,930
	124,00	128,058		252,00	189,312		184,00	160,849		1496,00	812,659		340,00	388,504
		124,820			197,787			165,832			858,637			388,504
		139,449			206,309			170,833			810,380			379,033
		142,721			187,623			169,164			716,352			392,305
		147,642			191,003			177,526			711,957			379,033
		150,933			182,566			170,833			692,273			394,208
		137,816			180,884			165,832			729,581			375,258
34	208,00	97,603	40	288,00	115,152	46	260,00	149,287	52	1060,00	550,518	58	580,00	315,880
	160,00	129,680		256,00	160,849		224,00	160,539		1096,00	659,804		530,00	365,854
	196,00	124,820		252,00	172,503		192,00	165,832		1230,00	729,581		460,00	354,630
		150,933			194,391			174,176			774,169			401,841
		149,287			194,391			189,312			821,795			396,114
		149,287			199,487			182,566			810,380			403,754
		154,231			211,444			180,884			835,554			384,710
		157,536			209,730			180,884			819,508			375,258
		159,192			211,444			184,250			783,177			380,924
35	40,0	20,880	41	280,0	129,680	47	340,0	174,176	53	256,00	92,856	59	648,0	184,250
	44,0	23,683		264,0	165,832		356,0	242,613		224,00	119,978		608,0	232,156
	12,0	20,697		268,0	199,487		260,0	242,613		140,00	142,721		588,0	239,120
		29,678			213,160			226,952			157,536			270,829
		22,189			201,190			232,156			170,833			253,138
		25,179			216,597			235,634			162,508			251,379
		26,677			208,019			223,493			172,503			267,276
		29,678			209,730			225,222			160,849			256,661
		29,678			213,160			223,493			170,833			265,502
36	152,00	61,643	42	336,0	105,551	48	592,00	265,502	54	416,0	274,390	60	940,00	598,230
	160,00	115,152		324,0	146,000		556,00	270,829		352,0	297,719		1164,00	546,417
	184,00	124,820		252,0	194,391		600,00	285,118		300,0	274,390		1040,00	564,934
		126,438			239,120			317,706			319,535			517,914
		129,680			254,898			299,526			286,912			456,111
		137,816			260,192			288,709			274,390			430,731
		137,816			260,192			321,365			269,052			424,919
		128,058			276,173			285,118			292,307			426,855
		126,438			228,685			292,307			279,745			460,044

Anexo B- Turbidez e CSS do experimento 2

GR1			GR2			GR3			GR4		
Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)
1	8,0	2,939	1	0,0	2,939	1	0,0	2,939	1	4,0	2,939
	4,0	5,880		0,0	4,408		0,0	2,939		4,0	2,939
	4,0	5,880		0,0	5,880		0,0	4,408		4,0	2,939
		8,828			7,353			5,880			2,939
		10,305			8,828			7,353			2,939
		10,305			8,828			5,880			2,939
2	20,0	11,784	2	16,0	5,880	2	0,0	4,408	2	16,0	7,356
	20,0	13,265		8,0	10,305		8,0	4,408		8,0	7,353
	16,0	16,232		12,0	11,784		8,0	4,408		12,0	7,353
		17,719			13,265			5,880			7,353
		19,207			14,748			5,880			7,353
		19,207			14,748			5,880			7,353
3	24,00	20,697	3	16,00	8,828	3	8,00	4,408	3	20,00	7,353
	32,00	17,719		16,00	13,265		0,00	5,880		24,00	7,353
	24,00	22,189		16,00	14,748		0,00	5,880		20,00	7,353
		20,697			17,719			7,353			8,828
		22,189			19,207			7,353			8,828
		22,189			19,207			7,353			8,828
4	20,00	23,683	4	36,00	17,719	4	12,00	7,353	4	16,00	8,828
	32,00	23,683		32,00	19,207		8,00	8,828		24,00	10,305
	32,00	25,179		36,00	22,189		16,00	8,828		20,00	10,305
		26,677			31,181			11,784			10,305
		28,176			34,194			11,784			11,784
		28,176			34,194			11,784			10,305
5	20,00	28,176	5	0,00	17,719	5	24,00	10,305	5	40,00	11,784
	36,00	26,677		48,00	22,189		28,00	13,265		36,00	11,784
	36,00	32,687		36,00	25,179		12,00	11,784		40,00	19,207
		31,181			35,703			13,265			23,683
		35,703			41,757			14,748			23,683
		38,726			41,757			13,265			23,683
6	44,00	35,703	6	44,00	20,697	6	12,00	10,305	6	40,00	16,232
	40,00	38,726		44,00	20,697		16,00	10,305		36,00	16,232
	36,00	40,241		40,00	38,726		12,00	11,784		28,00	16,232
		49,368			40,241			13,265			16,232
		43,276			40,241			14,784			17,719
		41,757			40,241			14,784			17,719

GR1			GR2			GR3			GR4		
Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)	Medida	CSS (mg/L)	T (NTU)
7	40,00	19,207	7	52,00	47,842	7	20,00	11,784	7	24,00	8,828
	32,00	20,697		48,00	52,426		24,00	14,784		20,00	8,828
	36,00	38,726		56,00	44,796		16,00	16,232		24,00	8,828
		43,276			50,896			17,719			8,828
		41,757			49,368			22,189			10,305
		41,757			49,368			22,189			10,305
8	40,0	29,678	8	48,0	26,677	8	28,0	23,683	8	40,00	10,305
	40,0	37,214		48,0	35,703		32,0	20,697		48,00	11,784
	44,0	41,757		48,0	47,842		32,0	17,719		40,00	13,265
		44,796			49,368			20,697			13,265
		43,276			52,426			23,683			13,265
		43,276			52,426			25,179			13,265
9	48,00	40,241	9	60,00	50,896	9	32,00	11,784	9	72,00	11,784
	44,00	40,241		52,00	58,563		12,00	11,784		72,00	11,784
	48,00	44,796		60,00	64,730		16,00	13,265		112,00	13,265
		50,896			63,186			17,719			14,748
		50,896			67,825			22,189			17,719
		50,896			67,825			20,697			17,719
10	84,00	26,677	10	48,00	28,176	10	24,00	20,697	10	100,00	22,189
	76,00	40,241		40,00	35,703		36,00	19,207		100,00	22,189
	76,00	61,643		48,00	50,896		36,00	20,697		84,00	22,189
		69,376			52,426			23,683			23,683
		77,155			58,563			26,677			29,678
		77,155			58,563			26,677			37,214
11	96,00	40,241	11	68,00	31,181	11	52,00	16,232	11	104,00	28,176
	92,00	50,896		56,00	43,276		48,00	29,678		108,00	26,677
	96,00	88,126		56,00	60,102		40,00	31,181			23,683
		92,856			60,102			28,176			23,683
		96,019			61,643			31,181			22,189
		91,277			60,102			29,678			20,697
12	76,00	43,276	12	60,00	31,181	12	48,00	17,719	12	144,00	23,683
	76,00	66,277		52,00	40,241		52,00	35,703		124,00	25,179
	68,00	75,596		48,00	47,842		48,00	34,194		192,00	26,677
		86,553			57,026			41,757			31,181
		102,366			53,957			43,276			44,796
		83,413			53,957			43,276			44,796

Anexo C- Turbidez e CSS do Q_{ss1} do experimento 3

Turbidez (NTU)											
1				2				3			
GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4
4,41	0,01	1,47	0,01	185,94	97,60	347,19	172,50	321,37	115,15	314,06	164,17
22,19	23,68	8,83	4,41	189,31	97,60	356,50	201,19	334,23	132,93	526,02	179,20
44,80	25,18	53,96	10,31	197,79	107,15	337,92	180,88	314,06	214,88	513,87	187,62
69,38	29,68	50,90	136,19	155,88	132,93	239,12	165,83	292,31	213,16	596,14	204,60
92,86	25,18	29,68	132,93	170,83	164,17	226,95	124,82	281,53	290,51	507,82	232,16
116,76	89,70	23,68	131,30	202,89	142,72	197,79	131,30	216,60	232,15	594,04	265,50
116,76	167,50	20,70	194,39	230,42	141,08	115,15	142,72	247,87	242,61	632,01	261,96
102,37	119,98	20,70	208,02	214,88	169,16	152,58	144,36	214,88	247,87	638,39	281,53
146,00	150,93	16,23	189,31	177,53	155,88	240,87	150,93	208,02	279,75	621,40	295,91
137,82	81,85	14,75	175,85	214,88	196,09	230,42	139,45	253,14	251,38	596,14	290,51
139,45	172,50	11,78	197,79	221,77	223,49	202,89	147,64	286,91	244,36	617,17	292,31
132,93	84,98	11,78	199,49	260,19	155,88	247,87	179,20	277,96	242,61	666,26	304,96
141,08	80,28	13,27	182,57	192,70	72,48	53,96	371,49	301,34	169,16	538,24	286,91
129,68	96,02	25,18	192,70	256,66	180,88	25,18	254,90	303,15	192,70	550,52	310,41
121,59	72,48	137,82	202,89	276,17	152,58	20,70	221,77	290,51	270,83	606,63	295,91
113,55	131,30	184,25	206,31	240,87	221,77	265,50	218,32	220,04	253,14	550,52	274,39
103,96	126,44	129,68	197,79	258,43	94,44	365,85	206,31	285,12	177,53	511,85	274,39
89,70	108,74	164,17	214,88	263,73	185,94	358,36	197,79	306,78	226,95	589,86	263,73
99,19	46,32	180,88	214,88	286,91	169,16	434,62	170,83	326,87	199,49	467,93	263,73
108,74	52,43	201,19	202,89	272,61	80,28	392,31	167,50	367,73	177,53	513,87	279,75
105,55	60,10	152,58	208,02	230,42	194,39	336,07	170,83	328,71	187,62	585,69	274,39
103,96	72,48	160,85	194,39	240,87	94,44	473,87	157,54	306,78	256,66	452,19	286,91
108,74	84,98	152,58	180,88	246,11	169,16	413,35	160,85	367,71	202,89	424,92	269,05
116,76	91,28	146,00	185,94	237,38	169,16	467,93	160,85	306,78	218,32	465,96	240,87
129,68	103,96	155,88	197,79	228,69	64,73	446,31	155,88	330,54	174,18	505,81	270,83
97,60	108,74	149,29	184,25	269,05	63,19	428,79	180,88	388,50	294,11	415,22	261,96
116,76	58,56	146,00	196,09	220,04	75,60	350,90	170,83	299,53	157,54	444,36	270,83
100,78	108,74	194,23	185,94	239,12	192,70	399,93	165,83	270,83	218,32	499,79	277,96
129,68	81,85	214,88	179,20	277,96	115,15	446,31	162,51	323,20	242,61	538,24	261,96
110,34	141,08	239,12	162,51	246,11	182,57	354,63	150,93	304,96	159,19	467,93	267,28
111,94	128,06	185,94	146,00	226,95	150,93	371,49	150,93	310,41	137,82	517,91	279,75
113,55	160,85	239,12	119,98	221,77	144,36	373,37	155,88	332,39	152,58	415,90	281,53
102,37	83,41	220,04	132,93	191,00	78,72	317,71	159,19	325,03	185,94	542,32	279,75
113,55	77,16	142,72	179,20	191,03	164,17	434,62	147,64	319,54	249,62	471,89	283,33
108,74	80,28	119,98	194,39	214,88	189,31	386,61	147,64	345,33	187,62	442,41	272,61
149,29	52,43	103,96	172,50	216,60	141,08	332,39	165,83	315,88	274,39	538,24	272,61
132,93	41,76	102,37	160,85	281,53	174,18	337,92	154,23	314,06	221,77	530,08	277,96
131,30	38,73	75,60	159,19	246,11	159,19	401,84	144,36	343,47	226,95	596,14	295,91
124,28	113,55	139,45	159,19	218,32	126,44	314,06	146,00	334,23	283,33	670,58	301,34
141,08	126,44	111,94	155,88	256,66	81,85	377,15	160,85	326,87	256,66	585,69	283,33
131,30	66,28	61,64	147,64	242,61	113,55	373,37	160,85	292,31	246,11	615,06	272,61
134,56	55,49	191,00	155,88	247,87	115,15	401,84	154,23	283,35	225,22	661,96	279,75
147,64	72,48	144,36	165,83	247,87	80,28	325,03	159,19	270,83	177,53	485,79	277,96

Turbidez (NTU)											
4				5				6			
GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4
285,12	244,36	606,63	277,96	426,86	672,74	794,48	462,01	392,31	952,85	940,91	612,95
336,07	277,96	634,13	265,50	421,05	655,51	760,71	452,19	473,87	872,58	945,68	621,40
343,47	358,36	589,86	256,66	444,36	858,64	814,94	501,79	532,12	758,48	1107,32	687,92
371,49	379,03	436,56	392,31	450,23	789,95	685,75	542,32	567,00	881,91	1092,29	738,44
345,33	407,59	615,06	442,41	444,36	709,76	1099,80	536,20	575,29	924,27	1435,89	854,01
356,50	598,23	718,55	428,79	415,27	762,95	984,11	632,01	558,75	1087,29	1340,93	765,19
430,73	358,36	683,57	405,67	450,23	736,22	1072,35	644,80	540,28	900,66	1235,23	893,61
428,79	365,85	725,16	438,51	456,11	765,19	1104,81	617,17	538,24	1005,94	1292,99	819,51
436,56	360,23	826,37	454,15	458,08	837,85	945,68	556,69	604,53	867,92	1386,77	771,92
428,79	419,12	796,75	589,86	390,40	738,44	943,29	536,20	585,69	948,07	1351,67	740,66
460,04	392,31	679,24	511,85	434,62	716,35	826,37	560,81	621,40	814,94	1427,66	765,19
442,41	409,50	687,92	513,87	452,19	681,40	847,07	600,33	556,69	762,95	1306,25	751,78
454,15	350,90	629,88	542,32	450,23	771,92	952,85	606,63	585,69	998,65	1217,04	760,71
450,23	436,56	589,86	556,69	458,08	707,57	1057,47	577,36	564,93	976,87	1219,63	692,27
430,73	471,89	623,52	513,87	493,78	833,26	974,46	558,75	602,43	948,07	1237,83	714,15
413,35	521,96	638,40	534,16	442,41	749,55	974,46	583,60	598,23	1102,30	1142,66	711,96
432,67	442,41	638,39	550,52	503,80	789,95	1062,43	536,20	594,04	830,96	1150,28	747,33
428,79	440,46	627,76	487,78	511,85	681,40	893,61	575,29	629,88	1130,00	1130,00	756,24
390,40	446,31	655,51	511,85	462,01	674,90	1037,75	569,07	623,52	976,87	1147,74	720,75
432,67	403,75	655,51	511,85	462,01	694,45	910,08	587,77	640,53	948,07	1079,81	670,58
358,36	396,11	657,65	493,78	467,93	837,85	893,61	556,69	674,90	705,38	1117,38	711,96
384,71	417,20	659,80	467,93	495,78	810,38	955,24	591,95	672,74	974,46	1132,53	738,44
371,49	511,85	674,90	469,91	477,84	685,75	849,38	644,80	598,23	884,25	1047,60	718,55
371,49	462,01	687,92	452,19	462,01	657,65	789,95	668,42	606,63	910,08	1035,29	655,51
365,85	532,12	623,52	456,11	485,79	668,42	891,27	638,39	636,26	727,37	1069,87	690,10
390,40	600,33	661,96	421,05	489,78	636,26	860,96	636,26	623,52	891,27	1069,87	734,01
377,15	489,78	664,11	463,98	475,85	742,88	856,32	560,81	571,14	986,68	1152,83	756,24
398,02	394,21	615,06	456,11	471,89	670,58	950,46	575,29	638,39	988,95	1035,29	756,24
390,40	460,04	569,07	444,36	487,78	774,17	840,16	575,29	606,63	849,38	1102,30	720,75
392,31	505,81	731,79	458,08	436,56	685,75	785,43	564,93	612,95	893,61	1099,80	627,76
354,63	388,50	687,92	448,27	497,78	636,26	783,18	562,87	602,43	849,38	1127,47	718,55
379,03	337,92	725,16	446,41	499,79	636,26	858,64	621,40	573,21	886,58	1008,38	751,78
349,04	419,12	629,88	448,27	530,08	803,55	874,57	571,14	610,84	840,16	979,28	888,93
352,77	438,51	627,76	436,56	523,99	707,57	1008,38	585,69	600,33	837,85	976,87	787,69
390,40	483,80	511,85	399,93	503,80	705,38	891,27	583,60	585,69	870,25	1035,29	731,79
380,92	493,78	792,22	450,23	513,87	696,63	905,37	571,14	521,96	830,96	1059,95	707,57
371,49	462,01	716,35	424,92	495,78	740,66	898,31	562,87	513,87	858,64	957,64	685,75
367,73	528,05	774,17	475,85	505,81	707,57	955,24	560,07	575,29	903,01	1045,13	629,88
367,73	503,80	738,44	438,51	473,87	754,01	870,25	564,93	587,77	778,67	1092,29	685,75
367,73	483,80	651,22	460,04	448,27	716,35	783,18	587,77	632,01	756,24	969,64	727,37
386,61	521,96	657,65	467,93	487,78	698,82	955,24	610,84	499,79	769,68	986,53	727,37
362,11	444,36	606,63	481,81	485,79	668,42	895,96	661,96	544,37	765,19	984,11	664,11
371,49	432,67	725,16	456,11	501,79	940,91	895,96	577,36	544,37	785,43	1050,06	727,37

CSS (mg/L)				
Medida	GR1	GR2	GR3	GR4
1	32,0	8,0	8,0	24,0
	52,0	8,0	12,0	28,0
	44,0	12,0	8,0	24,0
2	52,0	24,0	120,0	56,0
	60,0	52,0	92,0	48,0
	64,0	28,0	128,0	56,0
3	120,0	64,0	212,0	108,0
	104,0	64,0	216,0	92,0
	128,0	72,0	232,0	100,0
4	148,0	212,0	308,0	152,0
	148,0	236,0	276,0	160,0
	160,0	280,0	288,0	164,0
5	212,0	368,0	340,0	240,0
	240,0	404,0	252,0	204,0
	232,0	440,0	272,0	212,0
6	348,0	536,0	292,0	292,0
	332,0	520,0	232,0	344,0
	340,0	468,0	336,0	308,0

Anexo D- Turbidez e CSS do Qss2 do experimento 3

Turbidez (NTU)											
1				2				3			
GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4
1,47	1,47	2,90	4,41	94,44	80,28	113,55	84,98	247,87	213,16	306,78	365,85
14,78	96,02	159,00	23,68	88,13	164,17	152,58	84,98	228,69	214,88	538,24	204,60
70,93	102,37	196,09	38,73	96,02	123,20	172,50	113,55	323,20	294,11	407,59	194,39
92,86	60,10	180,88	43,48	134,56	174,18	206,31	170,83	230,42	315,88	411,42	221,77
69,38	61,64	164,46	40,24	131,30	137,82	256,66	208,02	314,06	334,23	471,89	169,16
108,74	70,93	126,44	165,83	126,44	121,59	169,16	119,98	306,78	292,31	469,91	159,19
57,03	44,80	67,83	84,98	137,82	164,17	292,31	131,30	276,17	325,03	571,14	154,23
47,84	52,43	108,74	129,68	124,82	202,89	107,15	142,72	247,87	394,21	436,56	267,28
41,76	70,93	115,15	111,94	131,30	157,54	244,36	191,00	144,36	308,59	430,73	220,04
31,18	53,96	69,38	97,60	152,58	221,77	150,93	169,16	167,50	444,36	544,37	233,89
23,68	60,10	115,15	83,41	206,31	202,89	192,70	185,94	247,87	415,27	558,75	208,02
23,19	124,82	141,08	84,98	185,94	191,00	263,73	253,14	267,28	336,07	454,15	276,17
34,19	70,93	99,19	80,28	208,02	244,36	226,95	253,14	332,39	489,78	513,87	405,67
72,48	103,59	149,29	81,85	196,09	211,44	199,49	223,49	312,23	379,03	386,61	373,37
58,56	75,60	81,85	77,16	202,89	154,23	304,96	165,83	382,82	411,42	489,78	347,19
17,72	74,04	167,50	74,04	235,63	244,36	285,12	116,76	321,37	403,75	505,81	334,23
11,78	89,70	89,70	69,38	175,85	199,49	230,42	221,77	301,34	290,51	499,79	347,19
10,31	84,98	157,54	74,04	170,83	221,77	260,19	206,31	388,50	330,54	523,99	314,06
10,31	96,02	177,53	64,73	220,04	237,38	247,87	155,88	360,23	354,63	438,51	354,63
14,75	103,96	149,29	72,48	232,16	258,43	343,47	157,54	294,11	356,50	536,20	367,73
37,21	97,60	189,31	75,60	187,62	179,20	274,39	174,18	358,36	828,71	417,20	258,43
22,19	131,30	123,20	72,48	247,87	253,14	274,39	162,51	350,90	407,59	497,78	399,93
25,18	159,19	113,55	83,41	220,04	206,31	226,95	184,25	330,54	360,23	465,96	347,19
34,19	113,55	107,15	81,85	256,66	237,38	191,00	174,18	339,77	384,71	515,89	314,06
44,80	119,98	177,53	74,04	235,63	189,31	185,94	202,89	365,85	323,20	471,89	315,88
46,32	70,93	170,83	75,60	228,69	233,89	216,60	167,50	358,37	432,67	465,96	308,59
57,03	124,82	191,00	77,16	185,94	152,58	230,42	121,59	360,23	411,42	483,80	312,23
52,43	84,98	103,96	84,98	175,85	237,38	354,63	99,19	371,49	399,93	473,87	308,59
47,84	174,18	116,76	83,41	191,00	233,89	279,75	208,02	379,03	407,59	489,78	279,75
49,37	75,60	100,78	75,60	221,77	223,49	225,22	260,19	362,11	363,98	382,82	301,34
43,28	108,74	107,15	77,16	228,69	247,87	294,11	172,50	432,67	371,49	417,20	304,96
35,70	119,98	89,70	74,04	204,60	218,32	337,92	221,77	394,21	382,82	454,15	294,11
29,68	92,86	126,44	72,48	201,19	226,95	204,60	177,53	339,77	362,11	507,82	349,04
22,19	119,98	100,78	72,48	228,69	216,60	312,23	201,19	350,90	350,90	446,31	310,41
14,75	116,76	96,02	77,16	191,00	274,39	233,89	230,42	363,98	444,36	491,78	354,63
10,31	78,72	152,58	83,41	177,53	256,66	253,14	225,22	375,26	356,50	444,36	321,37
8,83	105,55	60,10	89,70	216,60	228,69	226,95	206,31	332,39	394,21	513,87	345,33
8,83	108,74	100,78	91,28	232,16	306,78	390,40	213,16	310,41	456,11	479,82	350,90
7,35	100,78	105,55	89,70	202,89	209,73	319,54	267,28	369,61	426,86	473,87	321,37
8,83	139,45	105,55	99,19	201,19	226,95	277,96	269,05	328,71	360,23	491,78	292,31
14,75	134,56	111,94	84,98	218,32	199,49	288,71	299,53	354,63	442,41	583,60	312,23
60,10	67,83	80,28	88,13	214,88	349,04	356,50	246,11	367,73	349,04	556,69	299,53
91,28	116,76	155,88	88,13	221,77	251,38	283,33	261,96	350,90	380,92	481,81	297,72

Turbidez (NTU)											
4				5				6			
GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4
276,17	373,37	612,95	295,91	573,21	569,07	760,71	479,82	619,28	742,88	863,28	774,17
398,02	538,24	497,78	424,92	579,44	742,88	718,55	794,48	670,58	952,85	993,80	729,58
442,41	523,99	491,78	505,81	558,75	615,06	952,85	888,93	683,57	986,53	1137,59	881,91
477,84	600,33	495,78	546,42	610,84	771,92	917,17	884,25	758,48	860,96	929,01	955,24
471,89	519,94	585,69	577,36	596,14	870,25	931,39	698,82	747,33	940,91	844,77	789,95
560,81	617,17	651,22	571,14	581,52	844,77	981,70	722,96	801,28	988,95	849,38	738,44
471,89	558,75	720,75	503,80	554,63	740,66	1072,35	814,94	646,94	1079,81	1102,30	874,91
411,42	517,91	575,29	562,87	554,63	664,11	960,03	780,92	677,07	1082,30	1037,75	981,70
424,92	434,62	747,33	511,85	594,04	714,15	957,64	844,77	705,38	661,96	1180,94	884,25
495,78	619,28	720,75	569,07	608,73	705,38	945,68	817,22	814,94	767,43	1193,79	863,28
428,79	479,82	672,74	540,28	694,45	640,53	998,65	817,22	801,28	835,55	1322,22	884,25
405,67	577,36	651,22	471,89	629,88	661,96	874,91	865,60	812,66	884,25	1089,79	863,28
467,93	471,89	558,75	542,32	479,82	701,00	964,83	867,92	865,60	854,01	1109,83	898,31
528,05	467,93	642,66	519,94	528,05	749,55	891,27	840,16	842,46	957,64	1150,28	895,96
436,56	407,59	714,15	608,73	644,80	874,91	865,60	819,51	830,90	821,80	1160,47	771,92
450,23	538,24	711,96	526,02	600,33	767,43	851,69	847,07	898,31	879,57	1132,53	967,24
458,08	532,12	625,64	540,28	642,66	754,01	895,96	840,16	886,58	835,55	1211,86	940,91
436,56	523,99	638,39	573,21	602,43	638,39	856,32	751,78	888,93	895,96	1052,53	856,32
489,78	507,82	636,26	564,93	644,80	727,37	979,28	725,16	854,01	842,46	1175,81	863,28
489,78	558,75	677,07	489,78	583,60	674,90	844,77	792,22	830,96	936,14	1097,29	998,65
465,96	463,98	632,01	554,63	615,06	745,10	986,53	787,69	826,37	984,11	1037,75	914,80
421,05	419,12	598,23	581,52	674,90	638,39	877,24	893,61	808,10	1084,80	1114,86	765,19
467,93	668,42	564,93	540,28	552,57	903,01	900,66	964,83	774,17	727,37	1047,60	914,80
438,51	634,13	629,88	579,44	534,16	828,67	854,01	837,85	731,79	762,95	1037,75	895,96
421,36	534,16	649,08	610,84	596,14	851,69	796,75	774,17	751,78	844,77	1097,29	858,64
388,50	604,53	602,43	569,07	560,81	740,66	799,01	805,83	707,57	877,24	1145,20	931,39
415,27	542,32	636,26	536,20	575,29	606,63	803,55	812,66	720,75	931,39	1035,29	988,95
477,84	653,36	703,19	569,07	655,51	787,69	796,75	701,00	638,39	872,58	1005,94	891,27
442,41	571,14	583,60	564,93	646,94	778,67	858,64	729,58	655,51	967,24	1124,95	936,14
415,27	544,37	681,40	417,20	612,95	661,96	926,64	771,92	672,74	842,46	988,95	952,85
411,42	608,73	640,53	523,99	554,63	718,55	921,90	819,51	666,26	792,22	926,64	812,66
442,41	554,63	640,53	530,08	523,99	840,16	808,10	805,83	672,74	769,68	903,01	856,32
452,19	528,05	657,65	577,36	571,14	921,90	936,14	787,69	664,11	774,17	907,72	789,95
403,75	550,52	591,95	493,78	600,33	569,07	931,39	747,33	651,22	865,60	938,53	765,19
434,62	623,52	698,82	536,20	692,27	567,00	917,17	821,80	677,07	828,67	996,22	860,96
477,84	542,32	567,00	519,94	550,52	769,68	840,16	774,17	655,51	856,32	952,85	847,07
444,36	575,29	600,33	515,89	644,80	632,01	847,07	769,68	640,53	780,92	936,14	817,22
489,78	481,81	668,42	534,16	571,14	696,63	919,53	828,67	638,39	778,67	874,91	844,77
487,78	493,78	679,24	523,99	594,04	711,96	840,16	808,10	674,90	769,68	814,94	785,43
526,02	398,02	623,52	428,79	604,53	751,78	842,46	778,67	621,40	720,75	879,57	874,91
493,78	319,54	749,55	519,94	538,24	596,14	943,29	830,96	615,06	668,42	950,46	758,48
450,23	221,77	629,88	452,19	493,78	608,73	884,25	767,43	606,63	754,01	870,25	808,10
409,50	517,91	679,24	458,08	612,95	659,80	945,68	670,58	634,13	729,58	847,07	858,64

CSS (mg/L)				
Medida	GR1	GR2	GR3	GR4
1	12,0	36,0	40,0	20,0
	8,0	36,0	20,0	16,0
	12,0	28,0	32,0	24,0
2	28,0	108,0	108,0	40,0
	20,0	100,0	84,0	44,0
	24,0	96,0	104,0	52,0
3	76,0	184,0	204,0	88,0
	108,0	188,0	196,0	88,0
	116,0	200,0	164,0	92,0
4	192,0	396,0	276,0	192,0
	212,0	404,0	228,0	164,0
	212,0	388,0	236,0	224,0
5	288,0	456,0	464,0	224,0
	308,0	516,0	460,0	300,0
	284,0	488,0	436,0	292,0
6	408,0	576,0	664,0	404,0
	420,0	648,0	632,0	404,0
	392,0	556,0	632,0	460,0

Anexo E- Turbidez e CSS do Q_{SS3} do experimento 3

Turbidez (NTU)											
1				2				3			
GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4
1,47	0,01	0,01	0,01	159,19	99,19	83,41	152,58	294,11	330,54	358,36	160,85
34,19	66,28	11,78	8,83	152,58	124,82	179,20	111,94	235,63	274,39	426,86	269,05
52,43	32,69	20,70	70,93	157,54	134,56	177,53	137,82	375,26	288,71	396,11	240,87
66,28	16,23	124,82	37,21	191,00	132,93	206,31	97,60	386,61	315,88	401,84	276,17
129,68	2,94	111,94	89,70	160,85	141,08	261,96	180,88	434,62	341,62	407,59	260,19
115,15	16,23	110,34	46,32	179,20	116,76	290,51	192,70	405,67	379,03	428,79	274,39
102,27	46,32	70,93	75,60	179,20	139,45	267,28	174,18	407,59	362,11	411,42	354,63
91,28	49,37	77,16	19,21	214,88	159,19	256,88	180,88	532,12	371,49	365,85	301,34
129,68	88,13	70,93	8,83	184,25	131,30	283,33	175,85	495,78	380,92	450,23	337,92
111,94	74,04	72,48	31,18	249,62	170,83	277,96	141,08	424,92	367,73	477,84	373,37
123,20	38,73	78,72	29,68	228,69	184,25	297,72	170,83	375,26	438,51	471,89	341,62
136,19	52,43	89,70	55,49	184,25	170,83	197,79	192,70	458,08	399,93	450,23	352,77
124,82	75,60	123,20	74,04	204,60	263,73	174,18	202,89	523,99	303,15	479,82	233,89
139,45	72,48	97,60	60,10	199,49	209,73	239,12	180,88	610,84	377,15	485,79	421,05
105,55	108,74	77,16	67,83	260,19	285,12	235,63	197,79	532,12	534,16	473,87	334,23
94,44	70,93	99,19	88,13	249,62	175,85	306,78	202,89	636,26	279,75	471,89	362,11
72,48	113,55	121,59	100,78	214,88	216,60	382,82	155,88	530,08	326,87	463,98	403,75
89,70	43,28	83,41	99,19	233,89	182,57	388,50	157,54	479,82	312,23	448,27	319,54
99,19	91,28	61,64	99,19	182,57	121,59	297,72	192,70	515,89	405,67	436,56	336,07
113,55	91,28	43,28	100,78	196,09	230,42	332,39	165,83	534,16	365,85	467,93	337,92
157,54	78,72	43,28	108,74	185,94	247,87	332,39	159,19	475,85	354,63	436,56	421,05
149,29	111,94	37,12	110,34	213,16	162,51	290,51	177,53	540,28	369,61	450,23	334,23
108,74	100,78	34,19	100,78	240,87	149,29	283,33	146,00	634,13	347,19	479,82	347,19
119,98	155,88	32,69	107,15	139,45	150,93	303,15	124,82	526,02	308,59	467,93	321,37
121,59	100,78	53,96	103,96	265,50	184,25	334,23	208,02	612,95	413,35	428,79	314,87
131,30	80,28	29,68	111,94	285,12	189,31	310,41	191,00	540,28	407,59	497,78	240,87
126,44	159,19	25,18	100,78	295,91	244,36	326,87	233,89	509,84	323,20	462,01	325,03
118,37	84,98	31,18	115,15	256,66	180,88	288,71	184,25	587,77	299,53	452,19	319,54
134,57	141,08	22,19	119,98	214,88	191,00	237,38	208,02	589,86	326,87	471,89	377,15
142,72	124,82	34,19	141,08	172,50	172,50	343,47	246,11	501,79	399,93	456,11	352,77
177,53	72,48	25,18	144,36	242,61	209,73	297,72	162,51	465,96	424,92	479,82	310,41
141,08	103,96	105,55	99,19	251,38	225,22	272,61	169,16	471,89	415,27	463,98	317,71
131,30	88,13	103,96	110,34	239,12	149,29	304,96	154,23	422,99	304,96	411,42	334,23
139,45	63,19	92,86	103,96	279,75	220,04	295,91	199,49	487,78	428,79	442,41	352,77
126,44	70,93	96,02	110,34	230,42	225,22	253,14	142,72	540,28	426,86	469,91	347,19
111,94	134,56	100,78	108,74	208,02	303,15	343,47	221,77	448,27	373,37	421,05	401,84
111,94	115,15	67,83	123,20	209,73	263,73	303,15	240,87	432,67	350,90	501,79	345,33
105,55	108,74	91,28	160,85	242,61	246,11	301,34	253,14	519,94	314,06	528,05	337,92
150,93	126,44	89,70	103,96	239,12	235,63	306,78	221,77	481,81	392,31	444,36	352,77
147,64	146,00	75,60	119,98	230,42	187,62	317,71	154,23	505,81	409,50	454,15	373,37
128,06	94,44	72,48	111,94	270,83	194,39	323,20	206,31	507,82	415,27	446,31	314,06
147,64	80,28	89,70	94,44	172,50	269,05	306,78	251,38	511,85	424,92	352,77	375,26
132,93	129,68	67,83	160,85	221,77	206,31	233,89	201,19	509,84	362,11	411,42	365,85

Turbidez (NTU)											
4				5				6			
GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4	GR1	GR2	GR3	GR4
668,42	521,96	407,59	375,26	705,38	596,14	711,96	617,17	698,82	931,39	943,29	701,00
765,19	462,01	538,24	526,02	826,37	619,28	747,33	738,44	808,10	905,37	957,64	727,37
803,55	440,46	564,93	530,08	900,66	718,55	803,55	765,19	1023,03	799,01	1240,44	805,83
817,22	499,79	523,99	558,75	903,01	819,51	830,96	787,69	984,11	969,64	1282,42	771,92
1037,75	444,36	610,81	668,42	874,91	986,53	1188,64	812,66	991,37	778,67	926,64	847,07
891,27	718,55	612,95	577,36	805,83	670,58	1295,64	860,96	714,15	948,07	898,31	870,25
854,01	546,42	679,24	629,88	783,18	785,43	1295,64	969,64	998,65	1107,32	1306,25	1062,43
778,67	483,80	774,17	672,74	819,51	751,78	1186,07	847,07	1064,90	888,93	1354,36	943,29
895,96	562,87	664,11	646,94	751,78	698,82	1132,53	844,77	1175,81	917,17	1340,93	993,77
877,24	521,96	552,57	674,90	747,33	799,01	1079,81	666,26	1023,03	907,72	1279,79	917,17
819,51	554,63	674,90	594,04	655,51	718,55	1072,35	769,68	1084,80	1092,29	1279,79	984,11
792,22	729,58	696,63	634,13	657,65	668,42	981,70	821,80	1064,90	898,31	1222,23	842,46
780,92	428,79	679,24	640,53	646,94	711,96	1089,79	801,28	1165,58	969,64	1201,52	933,76
847,07	685,75	608,73	556,69	668,42	783,18	1040,21	767,43	993,80	879,57	1204,10	747,33
872,58	505,81	600,33	583,60	754,01	666,26	1023,03	762,95	940,91	893,61	1160,47	870,25
842,46	606,63	594,04	634,13	711,96	812,66	943,29	835,55	872,58	917,17	1219,63	865,60
711,96	596,14	634,13	581,52	734,01	696,63	921,90	789,95	898,31	1001,08	1137,59	888,93
718,55	617,17	621,40	600,33	564,93	718,55	898,31	736,22	794,48	986,53	1104,81	785,43
738,44	562,87	629,88	657,65	692,27	837,85	993,80	756,24	863,28	893,61	1020,58	844,77
792,22	473,87	621,40	567,00	646,94	774,17	1003,51	716,35	895,96	943,29	1055,00	819,51
774,17	627,76	615,06	606,63	687,92	796,75	926,64	812,66	805,83	936,14	1062,43	707,57
812,66	591,95	519,95	651,22	623,52	826,37	1005,94	785,43	679,24	1077,32	1087,29	747,33
740,66	687,92	591,95	606,63	617,17	778,67	984,11	840,16	729,58	884,25	1069,87	718,55
727,37	615,06	711,96	615,06	668,42	703,19	948,07	738,44	677,07	895,96	1032,83	722,96
707,57	544,37	731,79	594,04	653,36	814,94	950,46	692,27	649,08	801,28	957,64	672,74
632,01	519,94	659,80	573,21	636,26	817,22	865,56	661,96	751,78	943,29	924,27	655,51
692,27	571,14	629,88	569,07	610,84	863,28	824,08	640,53	696,63	914,80	964,83	602,43
771,92	430,73	707,57	596,14	636,26	870,25	936,14	666,26	769,68	917,17	981,70	653,36
606,63	519,94	657,65	485,79	556,69	751,78	940,91	670,58	577,36	826,37	905,37	685,75
703,19	521,96	774,17	519,94	617,17	644,80	893,61	747,33	515,89	924,27	948,07	617,17
725,16	501,79	731,79	473,87	585,69	612,95	903,01	642,66	513,87	903,01	872,58	612,95
694,45	600,33	653,36	575,29	569,07	625,64	867,92	844,76	634,13	661,96	974,46	596,14
692,27	615,06	833,26	720,75	560,81	214,88	780,92	668,42	720,75	984,11	1084,80	694,45
751,78	419,12	542,32	517,91	577,36	256,66	867,92	796,75	701,00	981,70	940,91	581,52
651,22	542,32	690,10	477,84	649,08	446,31	840,16	819,51	758,48	972,05	874,91	602,43
659,80	538,24	638,39	540,28	585,69	456,11	799,01	685,75	718,55	1003,51	826,37	548,47
780,92	487,78	632,01	526,87	646,94	860,96	851,69	767,43	912,44	1037,75	854,01	581,52
587,77	517,91	598,23	569,07	594,04	840,16	835,55	623,52	856,32	950,46	865,60	585,69
608,73	534,16	666,26	604,53	536,20	742,88	1343,61	740,66	879,57	849,38	854,01	606,63
619,28	483,80	701,00	598,23	536,20	756,24	1047,60	690,10	830,96	1062,43	789,95	554,63
617,17	458,08	677,07	552,57	534,16	705,38	835,55	594,04	655,51	907,72	792,22	575,29
694,45	617,17	703,19	694,45	575,29	874,91	917,17	681,40	754,01	919,53	844,77	562,87
602,43	530,08	674,90	602,43	569,07	851,69	874,91	799,01	754,01	851,69	769,68	530,08

CSS (mg/L)				
Medida	GR1	GR2	GR3	GR4
1	24,0	20,0	64,0	12,0
	8,0	8,0	32,0	16,0
	8,0	12,0	32,0	8,0
2	84,0	60,0	116,0	24,0
	72,0	48,0	124,0	24,0
	80,0	68,0	152,0	40,0
3	208,0	104,0	224,0	148,0
	224,0	120,0	220,0	92,0
	200,0	112,0	208,0	116,0
4	256,0	192,0	304,0	232,0
	256,0	192,0	452,0	248,0
	260,0	200,0	312,0	260,0
5	424,0	272,0	536,0	412,0
	388,0	124,0	596,0	380,0
	380,0	316,0	436,0	344,0
6	432,0	388,0	768,0	376,0
	376,0	384,0	768,0	432,0
	484,0	376,0	684,0	364,0