

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE TURBIDÍMETRO DE BAIXO CUSTO

Caroline de Boer Dias^{1}; Bruna Minetto²; Rutinéia Tassi³ & Daniel Gustavo Picillini Allasia⁴*

RESUMO: A turbidez é uma característica física das águas que representa a quantidade de sólidos em suspensão que impedem a passagem de luz. Os equipamentos aptos a realizarem leituras de turbidez são chamados nefelômetros, tendo como resposta medidas em Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Para mitigar custos elevados destes equipamentos, é apresentado nesse trabalho um protótipo de turbidímetro, desenvolvido na plataforma de *hardware* livre *Arduino*, utilizando o SEN0189 como módulo o sensor de turbidez. O equipamento foi calibrado inicialmente, apresentando resultados insatisfatórios, com erros da ordem de 40 NTU. Para melhorar os resultados do equipamento, nesse artigo é proposta a calibração utilizando faixas de valores para comportamento de medição semelhante, com correções adicionadas ao código fonte do sensor. Essa metodologia permitiu corrigir os erros de medição para um valor máximo de 1,14 NTU, em relação à medida com turbidímetro de referência, mostrando que o método aqui apresentado foi eficaz, aumentando a confiabilidade do sensor de baixo custo. Além disso, o custo deste tipo de sensor é um grande atrativo, já que o valor final de desenvolvimento do protótipo corresponde a 4% de um dispositivo comercial com mesma função.

ABSTRACT: Turbidity is a physical water characteristic which represents the amount of suspended solids avoiding the transmittance of light through a water sample. Nephelometers are equipments used for turbidity monitoring, and the results are expressed in terms of nephelometric turbidity units. Due to high costs of these equipments, this works presents a turbidimeter prototype, developed on the open source hardware platform *Arduino*, using as a turbidity module the SEN0189 sensor. The equipment was initially calibrated, presenting unsatisfactory results, with precisions errors reaching 40 NTU. To improve the equipment results, it was proposed the use of value bands, to relate similar behaviors of measurement, with corrections added in the source code of the sensor. The adjustment reduced the errors of measure to a maximum value of 1,14 NTU, in comparison to the real measure, showing that the method, here presented was effective in proportion to the used classic procedure, increasing the low-cost sensor reliability. Furthermore, the cost of this kind of sensor is appealing, since the final value of development of the prototype correspond to 4% of a commercial device with the same purpose

Palavras-chave: Turbidez, Monitoramento, *Arduino*.

¹Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Santa Maria, carol.dboer@gmail.com

²Mestranda em Engenharia Civil: Universidade Federal de Santa Maria, bruna_minetto@hotmail.com

³Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Santa Maria, rutineia@gmail.com.

⁴Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Santa Maria, dallasia@gmail.com.

2 INTRODUÇÃO

A turbidez pode ser definida como uma característica óptica da água, que demonstra a quantidade de luz dispersada por partículas dissolvidas ou em suspensão, sendo que, quanto maior a taxa de retenção de luz, maior a turbidez. Altas concentrações de partículas influenciam negativamente os corpos hídricos, causando problemas associados à eutrofização, carregamento de partículas pesadas e, por fim, tornam o rio ou lago mais propenso a inundações pelo depósito de sedimentos no leito (Davies-Colley, Smith, 2001).

Os compostos que causam o aumento da turbidez nos corpos d'água são: matéria orgânica, algas, argila, silte, resíduos solúveis contendo cor e organismos vivos microscópicos. Ao encontrar estes componentes, há alteração no comprimento de onda da luz, que é definida como um valor característico em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU) (USGS, 2018). Atualmente, é possível medir e armazenar dados de turbidez com sensores automáticos que auxiliam na coleta de dados e possibilitam a previsão de cenários, entretanto, tais componentes possuem elevados valores de mercado, não sendo acessíveis a comunidades com baixo poder econômico (DOE – WASHINGTON ST., 2018).

Os equipamentos utilizados para a medição de turbidez podem ser manuais ou eletrônicos. Os equipamentos manuais de uso em campo, como o disco de Secchi (Harrington *et al.*, 1992) e os tubos de turbidez (Anderson e Davie, 2004) tem baixo custo e fácil leitura. Entretanto, necessitam de disponibilidade de tempo para a coleta de dados e, geralmente, tem precisão limitada a fatores humanos, como detecção de cor, ou visualização de nível.

A fim de tornar este processo mais eficiente, surgiram os equipamentos eletrônicos chamados nefelômetros. Para que haja leitura, um feixe de luz é direcionado à amostra em ângulo de 90° em relação a base do equipamento, e os raios que forem captados novamente informarão a quantidade de partículas em suspensão no fluido. Para que aconteça o controle sobre o procedimento de coleta de dados e produção de resultados, são empregados padrões como a ISO 7027:1999 e o método de amostragem 180.1: Determinação de turbidez por nefelometria da Agência de Proteção Ambiental – Estados Unidos (EPA) (Kelley, 2014) nos equipamentos utilizados para as leituras. Os equipamentos comerciais aptos a realizarem este tipo de medição podem ter um custo superior a U\$ 600 (seiscentos dólares) sendo, portanto, inacessíveis a comunidades com baixo poder aquisitivo (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2018).

Há, atualmente, dois métodos para aplicações de medição de turbidez: Em laboratório, utilizando-se de amostras coletadas em diferentes pontos do local de interesse; e em campo, usando sensores estacionários em diferentes pontos dos corpos hídricos que se deseja medir. Ambos meios

são úteis em diferentes contextos, mas para aplicação em cenários de pequena escala há foco maior em equipamentos alocados em campo, já que não exigem treinamento para coleta de dados, e demonstram bons resultados em meios com altas taxas de sólidos em suspensão (Orwin e Smart, 2005).

Diversos trabalhos discutem sobre a criação e utilização de turbidímetros próprios para ambientes industriais (Saravanan, 2018; Siahaan *et al.*, 2018; Lambrou *et al.*, 2014) e, em campo, para determinar sólidos em suspensão (Pule *et al.*, 2017; Faustine *et al.* 2014). Nesses casos, os turbidímetros podem ser desenvolvidos com dispositivos eletroeletrônicos de circuito próprio, adequados aos ambientes nos quais estarão inseridos. Nesse sentido, este trabalho apresenta a construção e validação de um dispositivo de baixo custo que permite a medição e armazenamento dos dados referentes a turbidez, especialmente desenvolvido para uso em rios e lagos, ou seja, uma aplicação em campo aberto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a criação de sensores de baixo custo foram utilizadas tecnologias livres, tanto de *hardware* quanto de *software*, sendo escolhida a plataforma *Arduino*, atualmente a mais utilizada e indicada já que comporta os princípios necessários para diminuição dos custos. O protótipo de turbidímetro portátil foi concebido para a forma portátil na placa de prototipagem *Arduino*, junto do microprocessador ATmega 328PU-TH, sendo que para essa plataforma utiliza-se a linguagem própria baseada em C.

O componente destinado à coleta dos dados de turbidez é o sensor SEN0189, sendo que há no corpo encapsulado um emissor e receptor de luz a 90° em relação ao solo. Ademais, são encontrados potenciômetros em dois pontos do sensor para o controle de tensão, estando um junto ao corpo do dispositivo e outro próximos aos pinos de saída. Estes componentes eletrônicos garantem confiabilidade na leitura do sensor, já que permitem ajuste de tensão adequado a dispositivos baseados em *Arduino* que, neste caso, é de $4,1V \pm 0,3V$, segundo a fabricante. Para o processo de obtenção de dados externo foi escolhido o método analógico de dados, pois os dados digitais tendem a discretizar as informações em blocos inteiros e não conseguem, por consequência, captar pequenas variações que os sistemas reais podem apresentar (Ali *et al.*, 2016).

Os outros componentes presentes no dispositivo encontram-se conectados como demonstra a Figura 1 sendo eles, um *Real Time Clock* (RTC), chip registrador de tempo; um *Datalogger*

responsável por armazenar os dados obtidos em mídia física, ou seja, um cartão de memória magnética e, por fim um, diodo emissor de luz (LED), para resposta direta do estado do código.

A utilização do LED para interpretação dos estados de execução do microcontrolador, além de, reduzir os custos quando comparado a displays, diminui consideravelmente o consumo de bateria caso haja falha na rede de transmissão de energia (Atkin, 2016). Sensores emissores/receptores de luz tiveram suas primeiras aplicações em equipamentos que utilizam os conceitos de turbidez equipamentos como máquinas de lavar louça (Taylor e Bull, 1998) e de lavar roupas (Neff e Johnson, 1999). Por outro lado, esses sensores já possuem aplicação no monitoramento ambiental, como a utilização para determinar a quantidade de solo e matéria orgânica deslocada por eventos extremos de chuva (Grinham *et al.*, 2014) e para o controle automatizado de biomassa em tanques de cultivo de algas (Nguyen e Rittmann, 2018).

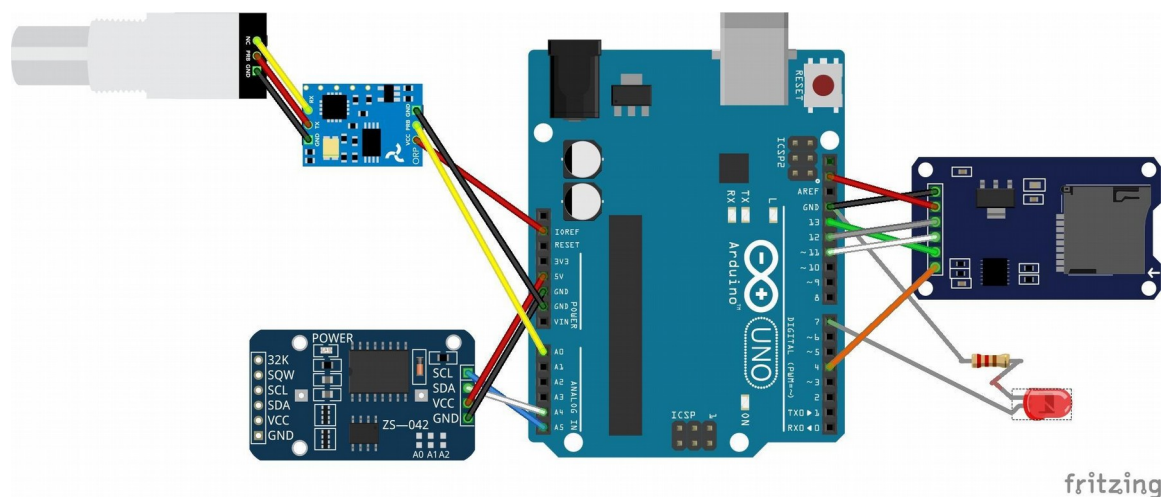


Figura 1 – Desenho esquemático do dispositivo medidor de turbidez contendo RTC, Datalogger e sensor de turbidez.

3.2 Métodos

Para converter os sinais elétricos emitidos pelo sensor em dados que representem medidas de turbidez, é necessária a calibração do equipamento com a ajuda de dispositivos comerciais laboratoriais que dispõem de uma alta resolução e baixos erros. Dessa forma, é possível armazenar internamente equações que realizem de forma automática a conversão da resposta da leitura do sensor em dados de NTU.

Para calibração, os equipamentos comerciais disponíveis contam com cinco cubetas com solução de formazina de 0,02NTU, 1NTU, 10NTU, 100NTU e 1000NTU. A formazina é uma solução composta de água, sulfato de hidrazina e hexametilenotetra que, segundo sua classificação FISPQ/ABNT 14725-4, é tóxico à saúde humana, sendo carcinogênico, de custo moderado e

disponível somente mediante a registro em conselho competente, portanto, inviável ao uso de sistemas de baixo custo. Pensando nesse aspecto, Lambrou *et al.* (2009) e Kelley (2014) sugerem o uso de alternativas como fluídos de corte hidrofílico, que podem sofrer diluição até atingir os padrões pretendidos.

Considerando essas premissas, neste estudo foram feitas dezessete amostras, tendo como linha de ajuste as cubetas de calibração. Cada amostra foi analisada pelos equipamentos com a solução de fluído para corte por cinco vezes. Os mesmos testes foram repetidos em um período de 24h e 48h, para que a influência da deposição do óleo não interferisse de forma negativa nas leituras comerciais e de baixo custo. Após as medições, foi realizada a interpolação das tensões medidas pelo dispositivo de baixo custo com os valores de turbidez medidos pelo turbidímetro comercial, marca Policontrol AP2000, considerado como de referência.

Pode-se adotar dois métodos no processo de calibração: a geração de uma única equação para toda faixa de valores, ou a separação em grupos que apresentem mesmo comportamento elétrico. Wijnen *et al.* (2014) escolheram para calibração de equipamento o primeiro método, obtendo resultados aceitáveis, mas com erros que não permitiriam o uso sem controle de correção de erros. Já Kelley *et al.* (2014) preferiram separar suas calibrações em faixas, o que permitiu diminuir os erros experimentados por outros pesquisadores.

Para definir o melhor método de calibração aplicável a este sensor, foi proposto por este estudo a construção de curvas de calibração fazendo o uso de uma e de múltiplas equações. Na sequência, foram empregados métodos estatísticos para definir qual a metodologia mais indicada ao tipo de amostra e ao local de obtenção de dados.

4 RESULTADOS

Após a análises realizadas, verificou-se que o resultado da calibração pode ser apresentado em única equação, conforme a Figura 2, sendo possível constatar que a resposta do sensor à turbidez se apresenta em conformidade à equação polinomial de segundo grau. Apesar de seu coeficiente de determinação ser bom ($R^2=0,977$) o comportamento da curva tende a se alterar conforme crescem os valores de turbidez, o que influencia negativamente os resultados, gerando erros absolutos de 40,23 NTU.

Assim, pensando no aspecto da qualidade de dados, as medidas de calibração foram separadas em faixas com variação de 40 NTU, aproximadamente. Como mostram as Figuras 3a à 3d, a curva tende a se ajustar melhor conforme a quantidade de pontos. Na Figura 3a, é apresentado

o ajuste para a faixa 0,02 a 30 NTU, sendo que o erro absoluto calculado foi de, no máximo, 0,5 NTU em relação ao comercial, e coeficiente de $R^2 = 0,99$. Já o resultado de menor adequação está contido na Figura 3b, faixa 50 a 80 NTU, tendo um erro máximo de 1,14 NTU e coeficiente de $R^2 = 0,98$.

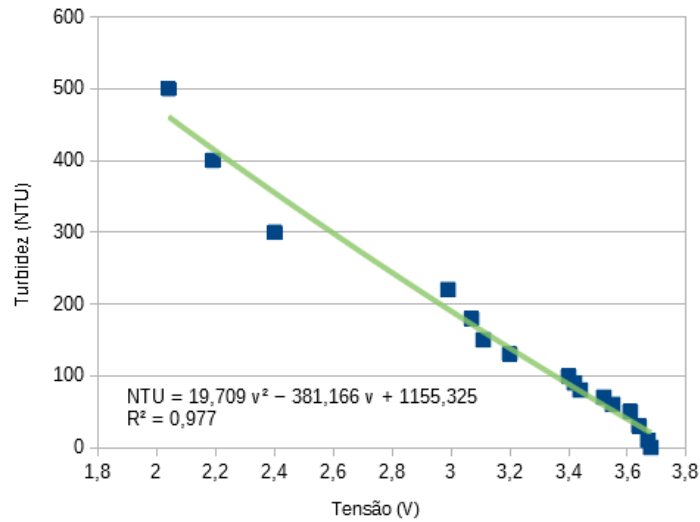


Figura 2 – Relação turbidez x tensão em faixa de 0,02 a 500 NTU .

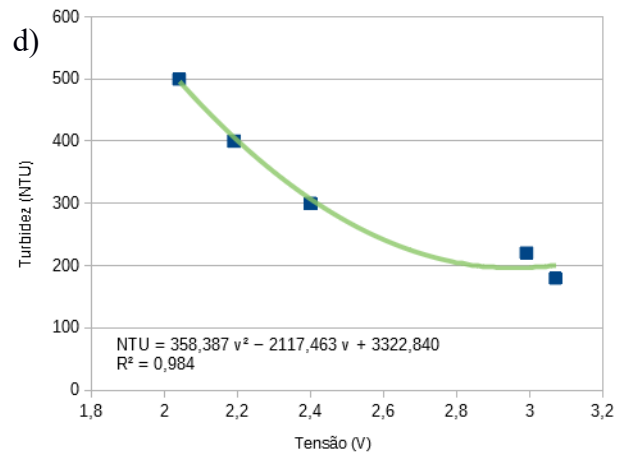
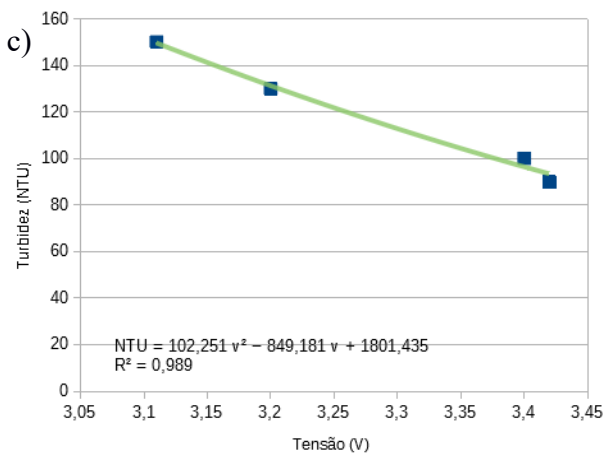
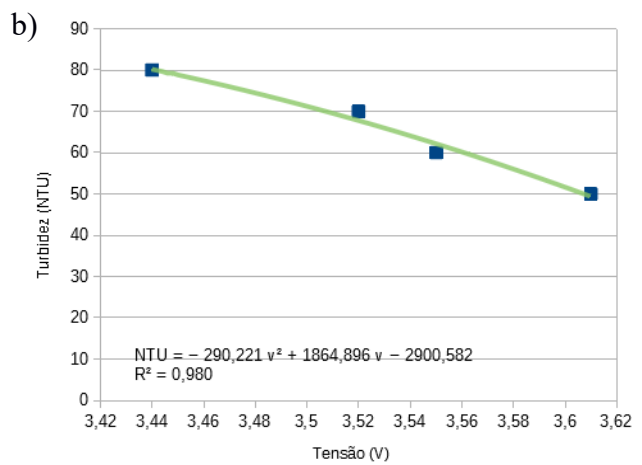
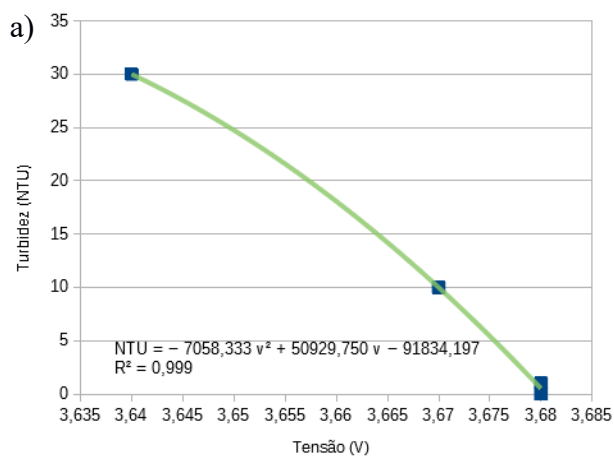


Figura 3 – Relação turbidez x tensão dividida em faixas de turbidez. Respectivamente a) 0,02 a 30 NTU; b) 50 a 80 NTU; c) 90 a 150 NTU e d) 180 a 500 NTU.

Para compreendermos o escopo total, foram realizadas, além das amostras para calibração, outras dez medidas nos cinco valores padrão do sensor comercial para que fosse possível analisar, estatisticamente, as informações gravadas pelo equipamento de baixo custo. Estão representadas na Figura 4 os resultados obtidos, e na tabela 1 as informações referentes ao desvio padrão e ao erro padrão de cada medida.

Tabela 1 – Desvio e erro padrão (em NTU) de quinze amostras.

	Turbidez (NTU)				
	0,02	10	50	100	400
Desvio padrão	4,34	3,94	0,87	2,21	3,34
Erro Padrão	1,12	1,01	0,22	0,57	0,86

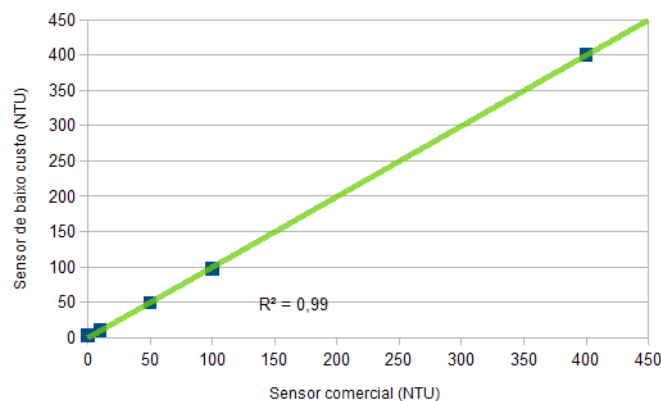


Figura 4 – Correlação linear entre sensor de baixo custo e comercial.

A Figura 2 demonstra a equação de calibração para toda faixa de valor, sendo assim, houve discrepância razoável em relação às medidas comerciais. Os erros relativos chegaram a 8%, ou 40NTU, impossibilitando seu uso em laboratório ou em campo. Já as resultantes da Figura 3 conseguiram superar estes erros ao separar faixas de turbidez, o maior erro absoluto foi de 0,5 NTU. Esta melhora torna mais viável medições de turbidez por equipamentos de baixo custo, pois permite resultados dentro de um padrão aceitável, não extrapolando 1 NTU, em média. Especialmente, a Figura 4 demonstra sua capacidade de realizar coleta e processamento de dados já que os erros padrão ficaram abaixo dos 1,12 NTU, mantendo a linearidade esperada de resposta, fazendo o uso de múltiplas equações.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta análise se propôs a construir e calibrar um sensor de baixo custo que meça adequadamente as variações de turbidez. Após a prototipagem, foi possível montar um dispositivo de baixo custo capaz de captar as variações de turbidez em águas, restando, somente sua calibração para funcionamento. Por seu custo reduzido, de aproximadamente R\$ 200,00, o dispositivo integrado de leitura de turbidez possui precisão adequada, visto que, equipamentos de mesma função podem chegar a quatro mil reais. Entretanto sua aplicação está restringida a medições em tempo real de campo, já que, em ambientes laboratoriais a acurácia de dados se faz necessária para a correta asserção de informações.

Em um contexto geral, equipamentos de baixo custo são de grande uso para o monitoramento contínuo em comunidades não servidas por análises laboratoriais. Acredita-se que outros fatores podem influenciar a exatidão dos dados obtidos por baixo custo como: variações na temperatura, que podem afetar a distribuição de partículas suspensas, e também, cor dos sólidos que cruzem a ponta de leitura. Ademais, podemos citar a capacidade para expansão de funcionalidades apresentadas pela plataforma *Arduino*, uma vez que existem módulos para correção de temperatura, ou até mesmo a transferência de dados via web.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR. 14725-4: Produtos químicos—informações sobre segurança, saúde e meio ambiente.
- ALI, Akram Syed et al. Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, v. 100, p. 114-126, 2016.
- ANDERSON, Paul; DAVIE, Robert D. Use of transparency tubes for rapid assessment of total suspended solids and turbidity in streams. *Lake and Reservoir Management*, v. 20, n. 2, p. 110-120, 2004.
- ATKIN, Keith. Construction of a simple low-cost teslameter and its use with Arduino and MakerPlot software. *Physics Education*, v. 51, n. 2, p. 024001, 2016.
- CAMPBELL SCIENTIFIC. Stainless-Steel SDI-12/RS-232 Pressure Transducer. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/cs451>. Acesso em: 11 de mar. 2019
- FAUSTINE, Anthony et al. Wireless sensor networks for water quality monitoring and control within lake victoria basin: Prototype development. *Wireless Sensor Network*, v. 6, n. 12, p. 281, 2014.
- GRINHAM, Alistair et al. Near-Bed Monitoring of Suspended Sediment during a Major Flood Event Highlights Deficiencies in Existing Event-Loading Estimates. *Water*, v. 10, n. 2, p. 34, 2018.

HARRINGTON JR, John A.; SCHIEBE, Frank R.; NIX, Joe F. Remote sensing of Lake Chicot, Arkansas: Monitoring suspended sediments, turbidity, and Secchi depth with Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, v. 39, n. 1, p. 15-27, 1992.

ISO, ISO et al. Water quality-determination of turbidity. ISO, v. 7027, p. 1999, 1999.

KELLEY, Christopher et al. An affordable open-source turbidimeter. *Sensors*, v. 14, n. 4, p. 7142-7155, 2014.

LAMBROU, Theofanis P. et al. A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems. *IEEE sensors journal*, v. 14, n. 8, p. 2765-2772, 2014.

LAMBROU, Theofanis P.; ANASTASIOU, Christos C.; PANAYIOTOU, Christos G. A nephelometric turbidity system for monitoring residential drinking water quality. In: *International Conference on Sensor Applications, Experimentation and Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 43-55.

NEFF, Mark B.; JOHNSON, Thomas M. Turbidity sensor that interrupts drain motor and water valve. U.S. Patent n. 5,957,144, 28 set. 1999.

NGUYEN, Binh T.; RITTMANN, Bruce E. Low-cost optical sensor to automatically monitor and control biomass concentration in microalgal cultivation. *Algal research*, v. 32, p. 101-106, 2018.

O'DELL, James W. Method 180.1 Determination of turbidity by nephelometry. *Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH*, v. 8, 1993.

ORWIN, John F.; SMART, C. Chris. An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment. *Geomorphology*, v. 68, n. 1-2, p. 3-15, 2005.

PULE, Mompoloki; YAHYA, Abid; CHUMA, Joseph. Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. *Journal of applied research and technology*, v. 15, n. 6, p. 562-570, 2017

SARAVANAN, Krishnann et al. Real-time water quality monitoring using Internet of Things in SCADA. *Environmental monitoring and assessment*, v. 190, n. 9, p. 556, 2018.

SIAHAAN, Andysah Putera Utama; ARYZA, Solly; NASUTION, Muhammad Dharma Tuah Putra. Arduino Uno-based water turbidity meter using LDR and LED sensors. 2018.

TAYLOR, Robert E.; BULL, David W. Turbidity sensor. U.S. Patent n. 5,828,458, 27 out. 1998.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo a Pesquisa do Rio Grande do Sul pela disponibilização de recursos através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PROBIC), bem como ao Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica e ao Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente.