

# Tube de turbidez para determinação de baixo custo da turbidez em corpos d'água superficiais

*Turbidity tube for low-cost turbidity measurements in surface water bodies*

Submetido em: 13/03/17

Revisado em: 08/06/17

Aprovado em: 20/06/17

**Dóris Regina Falcade  
Michael Mannich  
Geovana Thaís Colombo**

## RESUMO

A turbidez, importante parâmetro de qualidade e de potabilidade da água, mede a transparência da água, afetada pela quantidade de sólidos suspensos presentes, que impedem a passagem de luz. Normalmente a medida é feita por meio de equipamentos eletrônicos como o turbidímetro, ou um método mais simples como o disco de secchi. No entanto, há situações em que limitam o uso destes instrumentos, seja de natureza técnica ou orçamentária. Uma alternativa simples e de baixo custo é o tubo de turbidez. Neste contexto, objetiva-se estabelecer o método de medição com o tubo de turbidez, calibrando a relação entre turbidez e altura da coluna de água. O tubo de turbidez é um método de medição de turbidez através da extinção visual de um padrão localizado no fundo do tubo concebido como alternativa às medições com disco de secchi. Ele foi calibrado utilizando-se soluções padrões preparadas a partir da formazina, das quais se conhecia o valor de turbidez, medindo-se a altura da coluna d'água em que o alvo não era mais visualizado. Dessa forma, obteve-se uma equação ajustada da turbidez (NTU) em função da altura da coluna d'água (cm), que foi testada em campo. Observou-se que a luminosidade do ambiente interfere nas medições e então realizou-se o processo de calibração em duas condições distintas, ensolarada e nublada. Por meio de mais medições realizadas em campo, reduziu-se o erro quadrático médio de 25,80 para 20,89 após a utilização da equação de acordo com a condição do ambiente. Considerando as limitações do tubo de turbidez, recomenda-se seu uso para monitoramentos de qualidade da água nos quais não possuem muitos recursos financeiro, para condições de baixa turbidez e para projetos de educação ambiental.

Palavras-chave: qualidade da água; tubo de turbidez; turbidímetro.

## ABSTRACT

Turbidity is an important parameter of water quality and potability. It measures the transparency of the water, affected by the amount of suspended solids present, which prevent the passage of light. Usually the measurements are made by electronic equipment like the turbidimeter, or a simpler method like the secchi disk. However, some technical or budget restrictions can limit the use of these instruments. A simple and low-cost alternative is the turbidity tube. In this context, we aim to build and calibrate a turbidity tube, relating turbidity and height of the water column. The turbidity tube was designed as an alternative to secchi disk and its measurement is based on visually extinction of a target located at the bottom of the tube. The calibration was done based on reference turbidity samples prepared from formazine and measuring the height of the water column at which the target was no longer visualized. A fitted equation was obtained as a function of the height of the water column (cm) and turbidity (NTU). During field tests it was observed that the ambient light interferes with the measurements. Then the calibration process was carried out under two different conditions: sunny and cloudy conditions. The mean square error of 25.80 was reduced to 20.89 after using the equation according to the ambient condition. Considering limitations of the turbidity tube, it is recommended to use it for water quality monitoring with low financial resources, for low turbidity conditions and for environmental education projects.

Keywords: water quality; turbidity tube; turbidity meters

## INTRODUÇÃO

A turbidez é o efeito das propriedades ópticas de uma amostra líquida que faz com que os raios de luz sejam absorvidos e dispersos ao invés de serem transmitidos de forma retilínea através da amostra (WAGNER et al., 2006; ANDERSON, 2005;

APHA, 2005). A turbidez é um importante parâmetro indicador de qualidade da água, associada à presença de sólidos suspensos presentes na água que interferem a passagem de luz, reduzindo a transparência da água (EFFLER, 1988). É afetada pela presença de sólidos suspensos e dissolvidos como argila, silte, areia, matéria orgânica, organismos aquáticos, ácidos

orgânicos e corantes. Adicionalmente, os sólidos suspensos podem carregar substâncias tóxicas, como metais e pesticidas, e microorganismos patogênicos (DAHLGREN; NIEUWENHUYSE; LITTON, 2004), tornando a turbidez um parâmetro relevante na avaliação de qualidade da água, normatizado pela

Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA e de potabilidade da água, normatizado pela Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde.

O primeiro instrumento utilizado para medir turbidez foi o diafanômetro, tubo metálico com

Tabela 1 - Métodos de medição de turbidez (Adaptado de Colombo e Mannich (2015))

Método	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Diafanômetro	Equipamento histórico, um tubo de metal com um fundo de vidro que refletia a luz. A água é colocada dentro do tubo até que o fundo não esteja mais refletindo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipamento portátil;</li> <li>• Fácil manuseio e entendimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não consegue medir valores baixos de turbidez.</li> </ul>
Turbidímetro de vela de Jackson	Uma vela é colocada próxima ao fundo do tubo para padronizar a fonte de luz. A água era vertida até que luz da vela não pudesse ser mais vista.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil manuseio e entendimento;</li> <li>• Possui fonte de luz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não consegue medir valores baixos de turbidez.</li> <li>• Tem unidade de turbidez própria (JTU).</li> </ul>
Turbidímetro de Parr	Desenvolvimento posterior ao Turbidímetro de vela de Jackson, em que a vela é substituída por uma luz elétrica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil manuseio;</li> <li>• Possui fonte de luz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não consegue medir valores baixos de turbidez.</li> </ul>
Disco negro	Um alvo preto é visto horizontalmente debaixo d'água usando um periscópio. Requer duas pessoas: uma segurando o alvo preto e outra se afastando com o periscópio até não conseguir enxergar mais o alvo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faz a medida na horizontal;</li> <li>• Pode ser usado em pequenos riachos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É difícil posicionar o alvo, pois pode encostar em plantas e suspender partículas sedimentadas.</li> </ul>
Disco de Secchi	É um disco preto e branco (padrão de Secchi) colocado na água e ele é afundado e então é medida a profundidade em que o disco desaparece de vista.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo;</li> <li>• Fácil manuseio;</li> <li>• Pode ser usado em lagos e rios sem correnteza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não pode ser usado em rios com muita correnteza e em pequenos riachos.</li> </ul>
Nefelômetro eletrônico	É um turbidímetro eletrônico que possui dentro de seu dispositivo uma fonte de luz para iluminar a amostra e um ou mais detectores de dispersão da luz localizado a 90° do feixe incidente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consegue medir valores baixos de turbidez;</li> <li>• Equipamento portátil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto custo;</li> <li>• Frágil;</li> <li>• Requer energia e calibração.</li> </ul>
Tubo de turbidez	Junção do Turbidímetro de vela de Jackson e do disco de Secchi. No fundo do tubo possui o padrão de Secchi, e a água é vertida até que o padrão não possa ser mais visto, e então a altura da coluna d'água é medida.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo;</li> <li>• Fácil manuseio;</li> <li>• Portátil;</li> <li>• Pode ser usado em qualquer corpo d'água.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não consegue medir valores de turbidez muito baixos.</li> </ul>

o fundo de vidro parcialmente pintado, no qual a porção não pintada formava um cruzamento de duas linhas. A água era colocada até não ser mais possível visualizar esse cruzamento e a turbidez era obtida por meio da altura da coluna de água medida. Posteriormente, surgiu o turbidímetro de vela de Jackson, no qual o alvo de extinção era uma vela. O turbidímetro de Parr foi um refinamento deste instrumento, substituindo a vela por uma fonte de luz (KILROY; BIGGS, 2002).

O princípio básico, bastante difundido, para medição da transparência da água foi de extinção visual de um alvo submerso. Há outros métodos com esse mesmo princípio como o Disco de Secchi e o Tubo de Turbidez. O Disco de Secchi é um disco dividido em quatro quadrantes com as cores preto e branco intercaladas, que é inserido no corpo d'água até não ser mais possível vê-lo. Mede-se a profundidade atingida pelo disco. O Tubo de Turbidez ou Tubo de Transparência é um tubo transparente graduado, com um Disco de Secchi no fundo, em que se registra a altura na qual não é mais possível visualizar o disco.

Atualmente, os equipamentos mais comuns para medir-se turbidez são os turbidímetros ou nefelômetros, que são equipamentos eletrônicos em que feixes de luz dispersos atravessam a amostra de água e a turbidez é medida por detectores localizados a 90° dos feixes de luz incidentes (DAVIES-COLLEY, 1988). Quanto maior a intensidade da luz dispersa, maior é a turbidez, apresentada em unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

A diferença entre os turbidímetros ou nefelômetros e os equipamentos baseados no princípio de extinção visual estão associados à precisão, influência do operador, luminosidade externa e custo. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre estes instrumentos.

Por razões de custo, praticidade e simplicidade o Disco de Secchi é extensivamente utilizado na caracterização da transparência da água em reservatórios. Dentre muitas limitações, sua aplicação é limitada em condições com fluxo de água, baixa profundidade ou baixa turbidez, e presença de vegetação aquática como é comum em alguns rios (DAVIES-COLLEY, 1988; STEEL; NEUHAUSER, 2002). Adicionalmente, o brilho e o reflexo da superfície da água (SMITH, 2001), o sombreamento (SMITH; HOOVER, 1999) e outras restrições associadas às propriedades ópticas da amostra podem

limitar as medições por meio do Disco de Secchi (PREISENDORFER, 1986).

Neste contexto, o Tubo de Turbidez é o equipamento mais indicado, pois a água é coletada de forma segura, com uma corda e um balde lançados de uma ponte ou perto da costa, e a análise realizada fora do corpo de água (DAHLGREN; NIEUWENHUYSE; LITTON, 2004). Adicionalmente, é utilizado com sucesso em programas de monitoramento voluntário em rios (U.S.EPA, 1997). Todavia, apesar o uso comum deste instrumento, não foi encontrado relato técnico ou científico do uso deste instrumento no Brasil. Isto exposto, objetiva-se desenvolver e calibrar um tubo de turbidez, bem como investigar as principais interferências nas medições como influência da luminosidade e do avaliador.

## MATERIAIS E MÉTODOS

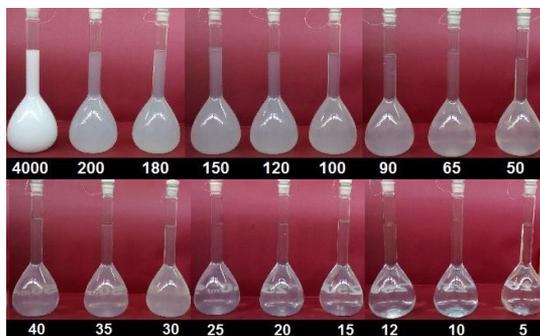
O tubo de turbidez (Figura 1) foi construído com um tubo de acrílico de 100 cm de comprimento, 6,4 cm de diâmetro interno e 7,0 cm de diâmetro externo. No fundo do tubo colocou-se um disco de PVC dividido em quatro quadrantes pintados com as cores preto e branco intercaladas e uma tampa de borracha. Fixou-se, na parte externa do tubo, uma fita métrica de escala de 1 mm para efetuar as medições da altura da coluna d'água em que a visualização do alvo é extinta. Na parte inferior do tubo foi instalada uma válvula para possibilitar a liberação gradual da amostra de água.

A calibração do tubo utilizando uma solução de formazina, solução padrão utilizada na calibração de turbidímetros eletrônicos, que possui 4000 NTU de turbidez. Esta solução foi diluída obtendo-se 17 padrões de turbidez (Figura 2). Mediu-se a altura da coluna d'água correspondente a cada valor de turbidez.

O processo de medição, ilustrado na Figura 3, resume-se em colocar a amostra de água aos poucos no tubo de turbidez, posicionado verticalmente e na região sombreada pelo observador, até a extinção do alvo no fundo do tubo, cuja distância é medida. A água é então retirada por meio da válvula até o reaparecimento do alvo, cuja distância também é medida. O valor registrado é a média entre as alturas em que o alvo é extinto e em que reaparece. Nos processos de calibração e nas medições realizadas



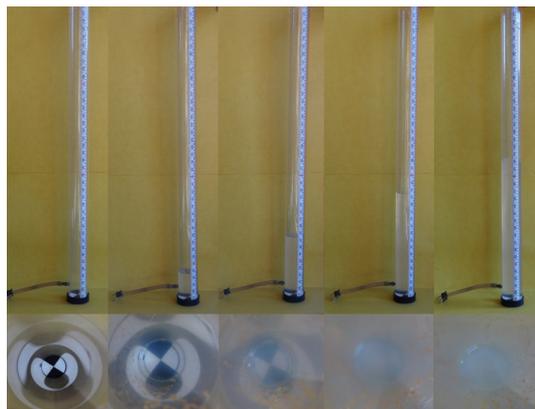
**Figura 1 – Peças do tubo de turbidez separadas e tubo montado**



**Figura 2 – Ilustração dos diferentes padrões de calibração de turbidez em NTU**

em campo, mediu-se uma altura máxima, que corresponde a altura da coluna d'água em que o disco não é visualizado, e uma altura mínima, na qual ainda é possível visualizar parcialmente o disco. O valor registrado foi a média entre estas medidas e uma equação de ajuste foi obtida para relacionar a turbidez (em NTU) em função da altura (em cm) (ANDERSON; DAVIC, 2004).

A intensidade da radiação solar e a posição do operador em relação ao solo interferem nas medições. Procurando incorporar ou avaliar parte destas características no processo de calibração foram realizadas duas análises procurando manter a simplicidade do método. A primeira foi realizar a calibração em ambiente externo em duas condições distintas: (i) condição ensolarada e (ii) condição nublada de modo similar ao realizado por Kilroy e Biggs (2002).



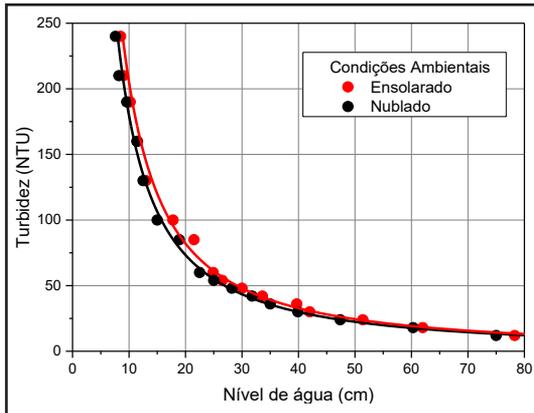
**Figura 3 – Representação do processo de medição com o Tubo de Turbidez para o padrão de 20 NTU que evidencia o desaparecimento do alvo a medida que o nível de água se eleva**

A segunda avaliação objetivou comparar a variação de medições realizadas por diferentes operadores não treinados previamente. Foram escolhidas cinco soluções padrões (de 20, 70, 115, 160 e 210 NTU) e submetidas a sete diferentes operadores, incluindo o avaliador principal desta pesquisa.

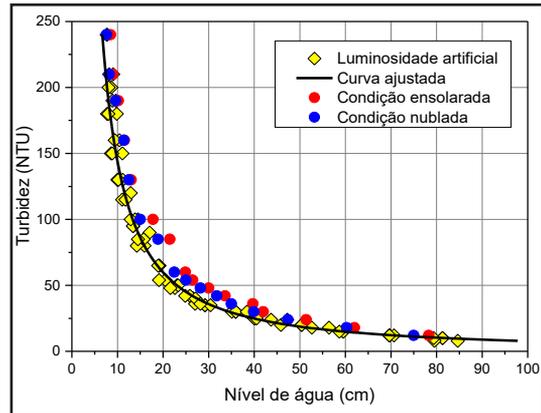
Para avaliar o desempenho do Tubo de Turbidez foram realizadas amostragens no Rio Belém, na região do Parque São Lourenço, no município de Curitiba-PR e comparadas com leituras de um turbidímetro portátil modelo 2100Q da marca Hach. A comparação entre esses dois métodos de turbidez foi realizada utilizando-se a calibração geral e também as calibrações para as situações particulares da condição ambiental.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados da calibração em condições de ambiente externo, tanto em condição ensolarada quanto nublada. Para uma mesma turbidez, a leitura correspondente de nível na condição ensolarada é em média 2 cm maior do que na condição nublada. Este efeito é consequência da luminosidade e evidencia a influência da condição ambiental na medição de turbidez por meio do tubo de turbidez. Neste contexto, quanto maior a intensidade luminosa, maior o nível de água medido e, conseqüentemente, menor é a turbidez correspondente.



**Figura 4 – Curva de calibração do Tubo de Turbidez para condições ambientais nublado e ensolarada**



**Figura 5 – Curvas de todos os processos de calibração realizados**

Kilroy e Biggs (2002) não detectou influência significativa das condições ambientais realizando as medições com o tubo na horizontal.

As equações 1 e 2 foram as regressões para uma função de potência obtidas para os dois casos anteriores. A equação 1 com  $r^2=0,99987$ , e a equação 2 com  $r^2=0,99995$  correspondem, respectivamente, à calibração a condição ensolarada e nublada.

$$Turb (NTU) = 562,17463 H(cm)^{-0,75693} \quad (1)$$

$$Turb (NTU) = 554,87442 H(cm)^{-0,77372} \quad (2)$$

As leituras do nível correspondente para um valor de turbidez podem sofrer variações tanto em condições com luminosidade artificial (em ambiente interno), quanto para condições naturais (ambiente externo). Neste contexto, o processo de calibração foi repetido 7 vezes contemplando as diferentes condições citadas. A figura 5 apresenta os resultados de todos os procedimentos, de modo que observa-se uma envoltória dos resultados. Para baixos valores de turbidez, a altura da coluna d'água correspondente é pouco dependente das condições ambientes, no entanto, para valores superiores de turbidez, a derivada é acentuada e, portanto, o valor de turbidez é sensível à variações na leitura do nível de água.

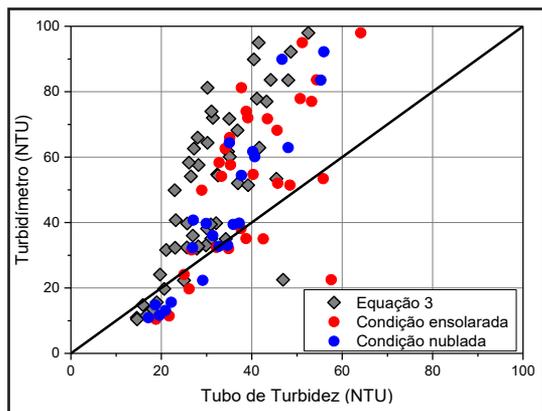
A equação 3, que representa o ajuste considerando todos os dados em conjunto, apresenta  $r^2=0,99978$ .

Diferente das equações 1 e 2, a equação 3 não é específica para uma condição ambiental sob luminosidade natural. Neste caso a equação 3 pode ser utilizada de forma mais geral para qualquer situação, enquanto as equações 1 e 2 podem ser utilizadas para uma situação específica conhecida.

$$Turbidez (NTU) = 504,18402 H(cm)^{-0,78867} \quad (3)$$

O desempenho do Tubo de Turbidez foi verificado por meio de medidas simultâneas com turbidímetro em um rio e lago urbano. A Figura 6, ilustra a comparação entre a turbidez obtida com o turbidímetro e a obtida com o Tubo de Turbidez. Compararam-se os valores de turbidez determinados utilizando-se a equação 3 (a equação geral) com os valores de turbidez determinados utilizando-se a equação de acordo com a condição do ambiente (equações 1 e 2).

Para valores de turbidez baixos, a correspondência entre as medidas é melhor, no entanto, a medida que a turbidez é maior, o Tubo de Turbidez subestima os valores em relação ao turbidímetro de forma mais consistente. A utilização das equações específicas para a condição do ambiente refletiu em uma melhora no desempenho comparativo, todavia, mantendo o mesmo perfil entre subestimativa para turbidez mais elevada. A Tabela 1 destaca os resultados de erro quadrático médio e desvio máximo utilizando a equação 3 e as equações específicas ao ambiente.



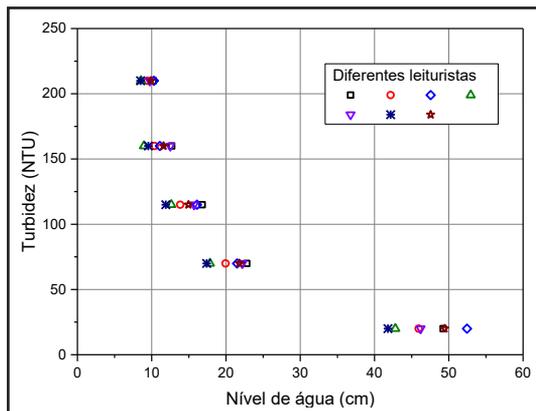
**Figura 6 - Relação entre os valores de turbidez (em NTU) medidos com o turbidímetro e com o tubo de turbidez comparando os valores obtidos utilizando a equação geral e utilizando as equações de acordo com a condição do ambiente**

Tabela 1 – Estatísticas das comparações entre medições do turbidímetro e tubo de turbidez considerando as equações geral e particular da condição ambiental.

	EQQ (NTU)	Desvio máx. e mín. (NTU)
Eq. 3	25,80	53,47 / -24,43
Eq. 1 e 2	20,89	43,80 / -35,07
Eq. 1	22,95	43,80 / -35,07
Eq. 2	17,58	43,19 / -8,02

A Figura 7 apresenta as medições realizadas com 7 diferentes leituristas não treinados previamente. Observa-se que, de modo geral, a diferença entre as leituras aumenta conforme a turbidez diminui. Para baixos valores de turbidez (20 NTU) a diferença entre as leituras do nível de água foi de 10,6 cm, enquanto para turbidez de 210 NTU a diferença entre as leituras foi de 1,8 cm. Estas diferenças estão associadas à dificuldade de determinar com exatidão a extinção do alvo, e dependem da interpretação do leiturista como também foi observado por Kilroy e Biggs (2002) em um tubo horizontal.

Considerando todos os aspectos de medição e calibração, o tubo de turbidez apresentou a limitação de medição a 8 NTU. Isto é, para valores de turbidez inferiores a 8 NTU não é possível realizar a medição da altura de coluna de água,



**Figura 7 – Medições realizadas com diferentes sete diferentes leituristas, que evidencia a variações na leitura média dos níveis de água para uma determinada turbidez, em especial sob baixos valores de turbidez**

pois mesmo com o tubo cheio de água, ainda é possível visualizar o padrão de Secchi no fundo do tubo, como mostra a Figura 8. De acordo com Anderson e Davic (2004), um tubo similar apresentou limitação para turbidez de 3 NTU. Essa diferença ocorre em função das diferentes dimensões dos tubos



**Figura 8 – Medida realizada em campo com amostra de água com turbidez de 8 NTU, evidenciando o alvo ainda visível, de modo que não é possível realizar uma leitura**

de turbidez, espessura da parede e transparência do material utilizado.

## CONCLUSÕES

O Tubo de Turbidez demonstrou ser um método de medição de turbidez que, embora não seja tão preciso quanto o turbidímetro, possui baixo custo e fácil manuseio, manutenção e compreensão por novos usuários, podendo inclusive, ser utilizado por pessoas sem capacitação técnica.

O seu desempenho em campo na medição de turbidez em corpos d'água superficiais rasos e/ou com correnteza, como rios, demonstrou ser um substituto ao tradicional Disco de Secchi, cuja utilização é impraticável.

Em contrapartida, a leitura de turbidez com o tubo de turbidez sofre influência do operador e também das condições ambientais no momento da amostragem. Por meio da calibração realizada para cada condição do ambiente, nublada e ensolarada, reduziu-se a diferença entre as leituras com o tubo de turbidez e o turbidímetro. As diferenças entre as observações também estão associadas à natureza da medição. Enquanto o turbidímetro realiza uma

medida do espalhamento da luz o tubo de turbidez mede uma propriedade óptica aparente por meio da leitura vertical visual da extinção do alvo.

As diferenças das leituras entre os operadores estão associadas a percepção do ponto exato de aparecimento ou desaparecimento do alvo e a experiência do observador. As diferenças maiores ocorrem em amostras de menor turbidez.

A influência da condição ambiente e as diferenças encontradas entre diferentes leituristas implicam em incertezas associadas que devem ser consideradas se o tubo de transparência for utilizado em programas de monitoramento de qualidade da água. Considerando as limitações apresentadas o tubo de turbidez é recomendável: (i) para monitoramentos de qualidade da água nos quais não possuem muitos recursos financeiro, (ii) como substituto temporário aos turbidímetros, (iii) para condições de baixa turbidez (~40 NTU), (iv) medição por observador treinado, (v) avaliação rápida de qualidade da água e programas de monitoramento voluntário e (vii) para projetos de educação ambiental ou como instrumento para indicação de outras variáveis ambientais como realizado por Zawiski (2007).

## Referências

- ANDERSON, C. W. Turbidity (version 2.1). [s.l.] U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. A6., sec. 6.6, 2005. Disponível em: <<https://water.usgs.gov/owq/FieldManual/index.html>>.
- ANDERSON, P.; DAVIC, R. 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.
- APHA. Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater. [s.l.] American Public Health Association and American Water Works Association and Water Environment Federation, 2005.
- COLOMBO, G. T.; MANNICH, M. Determinação de Baixo Custo da Turbidez em Corpos d'água Superficiais. *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Anais...Brasília: 2015
- DAHLGREN, R.; NIEUWENHUYSE, E.; LITTON, G. Transparency tube provides reliable water-quality measurements. *California Agriculture Home*, v. 58, n. 3, p. 149-153, 2004.
- DAVIES-COLLEY, R. J. Measuring water clarity with a black disk. *Limnology and Oceanography*, v. 33, n. 4, p. 616-623, 1988.
- EFFLER, S. W. Secchi Disc Transparency and Turbidity. *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n. 6, 1988.

KILROY, C.; BIGGS, B. J. F. Use of the SHMAK clarity tube for measuring water clarity: Comparison with the black disk method. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, v. 36, n. 3, p. 519-527, 2002.

PREISENDORFER, R. W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters1. *Limnology and Oceanography*, v. 31, n. 5, p. 909-926, 1986.

SMITH, D. G. A Protocol for Standardizing Secchi Disk Measurements, Including Use of a Viewer Box. *Lake and Reservoir Management*, v. 17, n. 2, p. 90-96, 2001.

SMITH, D. G.; HOOVER, C. M. USE OF A VIEWER BOX IN SECCIII DISK MEASUREMENTS1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, n. 5, p. 1183-1189, 1999.

STEEL, E. A.; NEUHAUSSER, S. Comparison of methods for measuring visual water clarity. *Journal of the North American Benthological Society*, v. 21, n. 2, p. 326-335, 2002.

U.S.EPA. Volunteer Stream Monitoring: A Methods Manual. (Doc. No. EPA 841-B-97-003), Section 2.3. [s.l.: s.n.].

WAGNER, R. J. et al. Guidelines and standard procedures for continuous water-quality monitors: station operation, record computation, and data reporting. [s.l.] US Department of the Interior, US Geological Survey. Reston, Virginia, USA., 2006.

ZAWISKI, B. Transparency tube monitoring as an indicator of fish community health. **The Ohio Journal of Science**, v. 107, n. 4, p. 82, 2007.

Dóris Regina Falcade

Universidade Federal do Paraná,  
Curitiba, PR, Brasil. Email: dorisfalcade@gmail.com

Contribuição do autor:

Calibração, experimentos laboratoriais e de campo. Processamento e análise de dados. Redação e revisão.

Michael Mannich

Universidade Federal do Paraná, Curitiba,  
PR, Brasil. Email: mannich@ufpr.br

Contribuição do autor:

Processamento e análise de dados. Redação e revisão.

Geovana Thaís Colombo

Universidade Federal do Paraná,  
Curitiba, PR, Brasil. Email: geocolombo@gmail.com

Contribuição do autor:

Desenvolvimento do equipamento, calibração, experimentos laboratoriais..