

Comparação de leituras de turbidez com diferentes equipamentos: contribuições à regulamentação brasileira de qualidade da água para consumo humano

Comparison of turbidity measurements in different instruments: contribution to the Brazilian drinking-water quality regulation

▶ **Data de entrada:**
26/06/2017

▶ **Data de aprovação:**
14/06/2018

Larissa Candian Ferreira¹ | Rafael Kopschitz Xavier Bastos^{1*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.029>

ORCID ID

Ferreira LC  <https://orcid.org/0000-0001-5399-3817>

Bastos RKX  <https://orcid.org/0000-0001-8792-0253>

Resumo

Foram avaliadas a confiabilidade analítica e as diferenças entre leituras de turbidez de amostras de água bruta, decantada e filtrada, obtidas com quatro turbidímetros portáteis de duas marcas, seis equipamentos *online* de duas marcas e um turbidímetro de bancada. Apesar de diferenças terem sido observadas tanto entre equipamentos como entre operadores, por vezes estatisticamente significativas, estas foram de pequena magnitude, de tal forma que não comprometeriam a interpretação do atendimento / violação dos limites de 0,50 uT e 0,30 uT estabelecidos na norma brasileira de qualidade da água para consumo humano. Sugere-se, portanto, que o padrão de turbidez de água filtrada pode ser verificado independentemente do tipo de equipamento utilizado.

Palavras-chave: Padrão de potabilidade, Turbidez, Turbidímetros.

Abstract

The analytical reliability and differences between turbidity readings of raw, settled and filtered water samples, obtained with four portable turbidimeters of two different brands, six on-line turbidimeters of two different brands, and one benchtop instrument were evaluated. Although differences between readings from both analysts and instruments have been detected, sometimes with statistical significance, they were of such (small) magnitude that the interpretation of the compliance with / violation of the 0.3 NTU and 0.5 NTU threshold values of the Brazilian drinking-water regulation would not be jeopardized. It is therefore suggested that the filtered water turbidity standard can be confidently checked regardless of the turbidimeter type.

Keywords: Drinking-water standard. Turbidity. Turbidimeters.

¹ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil - Viçosa - Minas Gerais - Brasil.

* **Autor correspondente:** rkxb@ufv.br.

1 INTRODUÇÃO

A turbidez, talvez a principal característica física de qualidade da água, é causada por partículas em suspensão, inorgânicas e orgânicas, tais como argila, silte, precipitados de elementos químicos (ferro e manganês, por exemplo), plâncton e resíduos vegetais. Expressa a transparência de um líquido a partir da medida da dispersão e absorção de luz pelas partículas em suspensão (APHA, AWWA, WEF, 2012; HEALTH CANADA, 2012).

É, portanto, uma variável com significado estético, que interfere na aceitação / rejeição da água e, nesse sentido, compõe o padrão organoléptico de potabilidade em normas de qualidade da água para consumo humano dos mais variados países (PINTO, 2012). Mas a turbidez apresenta também significado para a saúde, na medida em que partículas em suspensão podem servir de abrigo para microrganismos, comprometendo a desinfecção (HEALTH CANADA, 2012). Além disso, a remoção de turbidez por meio da filtração, como indicador da remoção de partículas em suspensão, é associada à remoção de cistos e oocistos de protozoários, mais especificamente de *Giardia* e *Cryptosporidium* (HEALTH CANADA, 2012; WHO, 2017) – dois parasitas humanos de reconhecida transmissão via consumo de água (BALDURSSON e KARANIS, 2011). Há inclusive relatos de associação de turbidez da água de consumo com incidência de doenças gastrointestinais (De ROOS et al., 2017). Dessa forma, a turbidez da água pós-filtração / pré-desinfecção tem sido incorporada como parte do (ou associada ao) padrão microbiológico de potabilidade em várias normas / diretrizes de referência internacional, tais como as dos Estados Unidos (EUA), Nova Zelândia, Canadá e Austrália (USEPA, 2006; MINISTRY OF HEALTH, 2008; HEALTH CANADA, 2017; NHMRC / NRMMC, 2017), além da própria norma brasileira (BRASIL, 2011); na América do Sul, porém essa associação é menos evidente (PINTO, 2012).

O padrão estético / organoléptico usualmente se encontra em torno de 5,0 uT, acima do qual a turbidez pode ser perceptível a olho nu e afetar a aceitação da água para consumo (NHMRC, NRMMC, 2017; WHO, 2017). Em geral, o valor limite recomendado de turbidez pré-desinfecção é 1,0 uT (HEALTH CANADA, 2012; NHMRC, NRMMC, 2017; WHO, 2017). No que diz respeito ao padrão de turbidez de efluentes de filtros rápidos, a regulamentação dos EUA (USEPA, 2006) tem se consolidado como referência internacional. Até o ano de 2006, o padrão da USEPA de 0,50 uT (em 95% do tempo, em monitoramento mensal, e nunca acima de 1,0 uT) visava ao alcance de 2,0 log e 2,5 log de remoção cistos de *Giardia*, respectivamente para filtração direta e tratamento convencional (ciclo completo: coagulação-floculação-decantação-filtração) (USEPA, 2006); essa era também a abordagem vigente no Brasil à época da publicação do presente artigo (BRASIL, 2011), sendo que na versão anterior da norma brasileira o padrão era de 1,0 uT (BRASIL, 2004). A partir de 2006, *Cryptosporidium* se torna o organismo alvo na norma dos EUA e o padrão é reduzido para 0,30 uT (em 95% do tempo, em monitoramento mensal, e nunca acima de 1,0 uT), em tese correspondente à remoção de 2,5 e 3,0 log de oocistos, respectivamente, para filtração direta e tratamento convencional (USEPA, 2006). Essa é também, fundamentalmente, a abordagem no Canadá e na Nova Zelândia. Na norma canadense encontra-se uma recomendação adicional de que se busque, como meta, a produção de água filtrada com 0,1 uT (HEALTH CANADA, 2012, 2017). Na Nova Zelândia, créditos adicionais de 0,5 log e 1 log de remoção oocistos de *Cryptosporidium* podem ser considerados, caso a turbidez da água filtrada não exceda, respectivamente, 0,15 uT e 0,10 uT em mais do que 5% do tempo, em monitoramento (mensal) (MINISTRY OF HEALTH, 2008). Na Austrália, o valor recomendado é de 0,2 uT (NHMRC, NRMMC, 2017).

Nota-se, assim, que o padrão de turbidez da água filtrada tem se tornado cada vez mais restritivo (com valores recomendados tão baixos quanto 0,30 uT ou mesmo 0,10 uT); além disso, atribui-se significado sanitário para variações ou diferenças não tão estreitas quanto 0,20 uT ou 0,15 uT: por exemplo, qual organismo se estaria removendo mais efetivamente, se *Giardia* (0,50 uT) ou *Cryptosporidium* (0,30 uT), ou com que eficiência o mesmo organismo estaria sendo potencialmente removido (oocistos de *Cryptosporidium*: 3,0 log com 0,30 uT; 3,5 log com 0,15 uT e 4,0 log com 0,10 uT). Torna-se, então, nítida a necessidade de garantir qualidade nas medidas de turbidez, incluindo aspectos de sensibilidade dos equipamentos, precisão e acurácia das medidas (SADAR, 1998; HEALTH CANADA, 2012).

Hoje, praticamente todos os turbidímetros têm funcionamento baseado na nefelometria: emissão de um feixe luminoso e medição da intensidade de luz dispersa em detector situado a 90° em relação à fonte de luz incidente; essa medida é convertida em sinal elétrico e registrada como valor de turbidez no painel do equipamento em unidades nefelométricas de turbidez - UNT (HEALTH CANADA, 2012) (neste trabalho, acompanhando a notação utilizada na Portaria MS nº 2914 / 2011, as medidas de turbidez são expressas simplesmente como unidades de turbidez - uT). Existem turbidímetros que utilizam outros ângulos de medição de luz, mas já se tem padronizado que os nefelômetros são os mais adequados para medidas de turbidez abaixo de 40 uT (APHA, AWWA, WEF, 2012; HEALTH CANADA, 2012). Entretanto, para efeito de compensação das medidas de turbidez por interferências devidas à cor (decorrentes da presença de partículas que absorvem luz), alguns equipamentos usam mais de um detector, um deles situado em ângulo diferente de 90° (ASTM INTERNATIONAL, 2011; HEALTH CANADA, 2012). Os turbidímetros / nefelômetros variam também de acordo com a fonte de luz, podendo operar nas faixas de luz visível (400–600 nm) ou

infravermelha (800–900 nm) (USEPA, 1993; ISO, 1999; APHA, AWWA, WEF, 2012; HEALTH CANADA, 2012); a fonte mais comumente utilizada em nefelômetros é a lâmpada de filamento de tungstênio (luz branca). Lâmpadas de tungstênio são mais sensíveis para partículas menores, mas a presença de cor nas amostras geralmente interfere no resultado; por outro lado, instrumentos com saída de 860 nm não são tão sensíveis a partículas pequenas, mas são menos propensos a sofrer interferência de cor (SADAR, 1998). Por fim, cabe registrar que turbidímetros / nefelômetros fabricados de acordo com métodos padronizados são, em tese, capazes de detectar diferenças de turbidez tão pequenas quanto 0,02 uT em amostras com turbidez inferior a 1 uT (HEALTH CANADA, 2012), e que há métodos padronizados específicos para a fabricação de equipamentos e determinação de turbidez inferior a 5 uT (ASTM, 2007, 2010).

A medição de turbidez pode, entretanto, estar sujeita a elevada variabilidade, devida a interferências de fatores tais como: frequência de calibração, qualidade dos padrões de calibração, estado do equipamento, estado e manuseio das cubetas, manuseio das amostras e experiência do operador; em turbidímetros *online* (também referidos na literatura nacional como turbidímetros de processo ou de fluxo contínuo), a formação de bolhas de ar pode também constituir fonte de interferência (SCARDINA et al., 2006; HEALTH CANADA, 2012). Além disso, conforme Sadar (2002), o tipo e a magnitude da interferência podem depender da faixa de turbidez em questão.

No Brasil, como já referido, o padrão de turbidez da água filtrada é de 0,50 uT em 95% das amostras medidas mensalmente, não podendo ultrapassar 1,0 uT nas 5% amostras restantes (filtração rápida). Entretanto, na Portaria 2914 / 2011 encontra-se também a recomendação de que se obtenha turbidez menor ou igual a 0,30 uT em 95% das amostras mensais quando da detecção

de oocistos de *Cryptosporidium* spp. acima de determinada concentração no(s) ponto(s) de captação (BRASIL, 2011). Não há, contudo, menção a possíveis variações de medidas de turbidez por diferentes tipos de equipamentos, apesar de haver registros na literatura neste sentido (LETTERMAN et al., 2002; TEIXEIRA et al., 2004; BASTOS et al., 2015). O presente trabalho visa, portanto, somar contribuições na avaliação da confiabilidade analítica de medidas de turbidez e, por conseguinte, na interpretação e aplicação do padrão de potabilidade estabelecido na norma brasileira de qualidade da água para consumo humano.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrição dos ensaios

Amostras de água bruta, decantada e filtrada da estação de tratamento de água (ETA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) foram submetidas a leituras de turbidez em diferentes equipamentos. As leituras foram realizadas em conformidade com o estabelecido no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, método 2130 B – leitura nefelométrica de turbidez (APHA, AWWA, WEF, 2012) e por manuais de fabricantes, seguindo sempre procedimentos padronizados de leitura e de cuidados com os equipamentos (manutenção e calibração). O trabalho foi dividido em dois estudos, independentes um do outro, com delineamentos experimentais específicos e realizados em momentos distintos.

2.1.1 Estudo 1

Realizado entre maio de 2015 e junho de 2016, o Estudo 1 envolveu a avaliação de amostras de água bruta (AB), decantada (AD) e filtrada (filtro 1 - F1; filtro 2 - F2; filtro 1 + filtro 2 - AF) da ETA UFV, com medidas de turbidez realizadas por dois operadores (OP1 e OP2) em cinco equipamentos: um turbidímetro digital de bancada (equipamen-

to pertencente à ETA UFV) e quatro turbidímetros digitais portáteis (equipamentos cedidos por empréstimo pelos respectivos fabricantes), sendo três de mesma marca e modelo (TP1a, TP1b e TP1c). Os dois operadores trabalharam ao mesmo tempo e no mesmo ambiente durante cada bateria de ensaios, revezando equipamentos e aplicando os mesmos procedimentos padrão de operação. O Operador 2 (OP2) foi treinado pelo Operador 1 (OP1). Os dados de turbidez foram inicialmente separados por tipo de água (bruta, decantada e filtrada) e estação do ano (seca ou chuvosa) mas, devido à predominância de valores baixos, foram reclassificados nos seguintes intervalos, independentemente da origem: (i) 0,00 a 0,30 uT (173 dados), sendo 0,30 uT o padrão da norma dos EUA para turbidez da água filtrada e presente na norma brasileira como recomendação; (ii) 0,31 a 0,50 uT (43 dados), sendo 0,50 uT o valor máximo permitido (VMP) pela norma brasileira em 95% das medidas em um mês; (iii) 0,51 a 1,0 uT (35 dados), sendo 1,0 uT o VMP na norma brasileira nos restantes 5% das medidas em um mês; (iv) 1,1 a 5,0 uT (42 dados); (v) 5,1 a 10 uT (25 dados).

2.1.2 Estudo 2

O Estudo 2 foi realizado entre julho de 2016 e setembro de 2017. Nessa etapa foram realizadas 2984 medidas de água bruta (AB), 973 de água decantada (AD), 2224 de água filtrada 1 (F1), 2784 de água filtrada 2 (F2) e 2402 de água filtrada 1 + filtrada 2 (AF = F1 + F2) da ETA UFV. Foram utilizados seis equipamentos: cinco turbidímetros *online* de mesma marca e modelo (pertencentes à ETA UFV), cada um com uma das amostras de água acima referidas; um sexto equipamento *online*, cedido por empréstimo pelo representante comercial, em que foram realizadas leituras apenas de amostras de água filtrada (AF); e um turbidímetro digital de bancada (o mesmo equipamento utilizado no Estudo 1, per-

tencent à ETA UFV). Esse estudo foi incorporado à rotina de operação da ETA UFV, de modo que os dados coletados nos turbidímetros *online* acompanharam a frequência horária das leituras no turbidímetro de bancada, as quais eram realizadas pelos próprios operadores da estação.

2.2 Descrição dos equipamentos – especificações dos fabricantes

Turbidímetro digital portátil Marca 1 (TP1).

Fonte de luz branca (lâmpada de tungstênio) e detector de fotocélula de silício. Possui dois modos de medição: média de sinal (automática ou manual) e *fast settling* (utilizado para amostras com elevada turbidez e rápida sedimentação). Faixa de medição de 0 a 1000 uT. Precisão de 2% na faixa de leitura de 0 a 500 uT e de 3% na faixa de 500 a 1000 uT. Incerteza máxima de 2% em toda a escala. Calibração com conjunto de padrões de formazina estabilizada nas concentrações de < 0,10, 20, 100 e 800 uT. Função de compensação de cor.

Turbidímetro digital portátil Marca 2 (TP2).

Fonte de luz infravermelha (LED) e três fotocélulas detectoras. Três modos de medição: normal, média (média de leituras no intervalo de tempo de 5 s) e sedimentação rápida. Faixa de medição automática de 0 a 1000 uT, podendo ser ajustada para outros intervalos. Precisão de 0,03 uT ou 3% da leitura (o que for maior). Calibração com padrões de formazina estabilizada em quatro pontos: 10, 100 e 500 uT, além do padrão “zero” (0,02 uT), que deve ser preparado pelo usuário a partir de bifiltração de água destilada ou deionizada em membrana 0,45µm. Compensação automática de cor.

A frequência de calibração adotada para esses equipamentos foi trimestral, já que não é especificada pelos fabricantes.

Turbidímetro digital de bancada (TB). Lâmpada de filamento de tungstênio (luz branca) como fonte de luz. Faixa de medição automática de 0 a 10.000 uT, podendo ser ajustada para outros intervalos. Com a função de compensação de cor ativada, a precisão das medidas de turbidez é de $\pm 2\%$ da leitura mais 0,01 uT na faixa de 0 a 1000 uT, $\pm 5\%$ da leitura na faixa de 1000 a 4000 uT e $\pm 10\%$ da leitura na faixa de 4000 a 10000 uT; sem compensação de cor, a precisão é de $\pm 2\%$ da leitura mais 0,01 uT na faixa de 0 a 40 uT (de acordo com recomendações do fabricante, essa função deve ser utilizada na maioria das medições, devendo, obrigatoriamente, estar ativada na medição de amostras com turbidez acima de 40 uT). Função média de sinal (*signal averaging*), utilizada para corrigir variações de leitura causadas por flutuações de partículas ao acaso na amostra; quando essa função está ativada (recomendação do fabricante para a maioria das amostras), uma leitura média é calculada a cada três segundos e apresentada no *display* do equipamento. Calibração com soluções de formazina estabilizada nas concentrações de < 0,1, 20, 200, 1000, 4000 e 7500 uT; foi adotada frequência de calibração trimestral, conforme recomendação do fabricante.

Turbidímetro online Marca 1 (TO1). Fonte de luz branca. Faixa de medição de 0 a 100 uT. Precisão de $\pm 2\%$ da leitura ou $\pm 0,02$ uT (o que for maior) para valores entre 0 e 40 uT, e $\pm 5\%$ da leitura para valores entre 40 uT e 100 uT. Resolução de 0,0001 uT para valores até 9,9999 uT; 0,001 uT para valores entre 10,000 e 99,999 uT; e 0,01 uT para 100,00 uT. Taxa de fluxo de 250 a 750 mL.min⁻¹, dependendo da turbidez da água. Calibração em apenas um ponto, com solução de formazina de 20 uT, que pode ser comprada pronta para uso (formazina estabilizada) ou ser preparada pelo usuário a partir da solução padrão de 4000 uT – opção que foi utilizada neste estudo; a frequência de calibração foi trimestral, conforme recomendação do fabricante.

Turbidímetro online Marca 2 (TO2). No interior do equipamento, a amostra passa por uma cubeta com capacidade para 20 mL, diferentemente do TO1, que possui capacidade interna para 1 L de amostra. Fonte de luz infravermelha. Faixa de medição de 0 a 10 uT. Precisão de $\pm 2\%$ da leitura ou $\pm 0,02$ uT. Resolução de 0,0001 uT. Pressão máxima de operação de 1380 kPa e taxa de fluxo recomendada de 100-1000 mL.min⁻¹. Calibração com soluções de formazina estabilizada nas concentrações de 0,02 e 10 uT; frequência de calibração trimestral, conforme recomendação do fabricante.

2.3 Análise dos dados

2.3.1 Sistematização inicial

Inicialmente, os resultados obtidos nos dois estudos foram avaliados em termos de estatística descritiva com o software Excel®2013. As leituras de turbidez, separadas por operador (somente no caso do Estudo 1) e equipamento (Estudos 1 e 2), foram descritas por medidas de posição (média, mediana, máximo, mínimo, 1º e 3º quartis) e dispersão (variância, desvio-padrão e coeficiente de variação).

2.3.2 Testes de diferenças entre leituras de turbidez

Com o objetivo de verificar a ocorrência de diferenças entre leituras fornecidas por diferentes operadores e equipamentos, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com o software Minitab®17. No Estudo 1 foi empregado delineamento em blocos casualizados (DBC) com análise fatorial 5x2, isto é, cinco equipamentos e dois operadores. Cada dia de medição correspondeu a um bloco, já que as condições experimentais (turbidez da água bruta e no decorrer do tratamento) variaram ao longo dos dias. Para cada faixa de valor de turbidez foi realizada uma ANOVA, com posterior aplicação

do teste Tukey para verificação de diferenças de medidas de turbidez entre pares de equipamentos e operadores. O Estudo 2 foi concebido em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com análise de um fator (equipamento), tendo sido utilizados dois equipamentos para as águas bruta, decantada, filtrada 1 e filtrada 2, e três equipamentos para a água filtrada (F1 + F2); cada dia de medição correspondeu a uma repetição. Para cada tipo de água foi realizado teste Tukey para verificação de diferenças de medidas de turbidez entre pares de equipamentos. As diferenças foram verificadas para nível de significância (α) de 5%.

2.3.3 Teste de confiabilidade das medidas de turbidez

Consiste em verificar a concordância dos resultados, ou seja, avaliar a precisão da medição em relação a um equipamento padrão – o TB foi adotado como padrão em razão da maior robustez em relação aos TP e pelo uso bem mais frequente no país em relação aos TO. Conforme detalhado em Teixeira et al. (2004), a verificação da proporção de concordância entre pares de valores fornecidos por equipamentos diferentes foi realizada com base no cálculo do índice Kappa, cujos valores foram interpretados da seguinte forma: $K < 0$: sem concordância; $0 < K < 0,19$: concordância pobre; $0,20 < K < 0,39$: concordância regular; $0,40 < K < 0,59$: concordância moderada; $0,60 < K < 0,79$: concordância substancial; $0,80 < K < 1,00$: concordância quase perfeita (LILIENTHAL e STOLLEY, 1994).

2.3.4 Estimativa de validade das medidas de turbidez

Novamente, o TB foi considerado como equipamento padrão, ou seja, como aquele que apresentou os valores “verdadeiros” de turbidez; conforme detalhado em Teixeira et al. (2004), a

validade das medidas de turbidez foi estimada a partir das proporções de acertos (verdadeiros positivos e verdadeiros negativos) e erros (falso-positivos e falso-negativos) dos demais equipamentos em relação ao TB. Em outras palavras estimou-se a *sensibilidade* (capacidade de detectar resultados verdadeiramente positivos - valores de turbidez obtidos com os demais equipamentos que fossem inferiores aos obtidos com o TB) e a *especificidade* (capacidade de detectar verdadeiros negativos - valores de turbidez obtidos com os demais equipamentos que estivessem acima daqueles obtidos com o TB).

Para a aplicação dos testes de confiabilidade e validade, é necessário estabelecer pontos de corte, ou seja, valores menores ou iguais aos quais se espera ou se deseja que os dados se mantenham; foram adotados os já referidos limites especificados na Portaria 2914 / 2011 para turbidez de efluentes de filtros rápidos: 0,50 uT (máximo permitido) e 0,30 uT (recomendação), indicadores, respectivamente, da remoção de cistos de *Giardia* e de oocistos de *Cryptosporidium*. Dessa forma, somente

os valores de turbidez de amostras de água filtrada foram submetidos a esses testes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudo 1

3.1.1 Descrição dos dados

A estatística descritiva dos dados de turbidez do Estudo 1 mostrou que os turbidímetros TB e TP2 foram os equipamentos que apresentaram os valores mais elevados para a faixa de turbidez de 0,00 a 0,30 uT, porém com diferença de apenas 0,05 uT entre a média desses equipamentos e a dos demais (TP1a, TP1b e TP1c). Nessa mesma faixa de valores, em todos os equipamentos avaliados, a média das leituras realizadas pelos dois operadores foi a mesma. O desvio-padrão dos dados obtidos por ambos os operadores com o equipamento de bancada (TB) foi o menor (0,048 - 0,050 uT), enquanto o equipamento TP1b apresentou o maior desvio-padrão (0,067 - 0,070 uT); porém, em geral, a variabilidade dos dados não diferiu tanto (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva das medidas de turbidez (uT) na faixa de 0,00 a 0,30 uT, por operador e equipamento, Estudo 1.

Parâmetro	OP1					OP2				
	TP1a	TP1b	TP1c	TP2	TB	TP1a	TP1b	TP1c	TP2	TB
N ° medidas	186	184	181	166	173	166	155	148	150	156
Mínimo	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Máximo	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Mediana	0,10	0,10	0,10	0,20	0,20	0,15	0,10	0,10	0,20	0,20
1º quartil (25%)	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,15	0,20
3º quartil (75%)	0,20	0,20	0,15	0,25	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25
Média aritmética	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20
Variância	0,0034	0,0044	0,0037	0,0038	0,0023	0,0043	0,0049	0,0041	0,0029	0,0025
Desvio padrão	0,058	0,067	0,061	0,062	0,048	0,066	0,070	0,064	0,054	0,050
Coef. variação (%)	41	46	43	33	24	40	47	43	26	23

OP: operador; TP: turbidímetro portátil; TB: turbidímetro de bancada.

Na faixa de 0,31 a 0,50 uT, as medidas realizadas pelos dois operadores apresentaram o mesmo valor médio em todos os equipamentos, enquanto a variabilidade (desvio-padrão) se mostrou ainda mais estreita que na faixa anterior de turbidez: entre 0,049 uT (TP1c) e 0,065 uT (TP1a) (coeficiente de variação entre 13 e 16) (Tabela 2). Na faixa de 0,51 a 1,0 uT (dados não incluídos), a única diferença de média de medidas entre operadores encontrada foi de 0,05 uT, em TP1a (OP1 = 0,70 uT e OP2 = 0,65 uT), enquanto a diferença média entre equipamentos não ultrapassou 0,15 uT (0,80 uT em TP1b e 0,65 uT em TP1c, TP2 e TB); o desvio-padrão variou entre 0,11 uT (TP1c, OP2) e 0,16 uT (TP1b, OP2 e TP2, OP1). Nas faixas seguintes as diferenças entre medidas médias se mostraram um pouco maiores (dados

não incluídos). Na faixa de 1,1 a 5,0 uT, a maior diferença média encontrada entre operadores foi da ordem de 0,20 uT (TP1b, OP1 = 3,3 uT x TP1b, OP2 = 3,1 uT; e TB, OP1 = 3,7 uT x TB, OP2 = 3,5 uT), ao passo que a diferença média entre equipamentos com o mesmo operador chegou a 0,50 uT (TP1b, OP2 = 3,1 uT x TP2, OP2 = 3,6 uT); o desvio-padrão variou entre 0,84 uT (TP1a, OP1) e 1,2 uT (TP1b, OP2). Finalmente, na faixa de valores mais altos de turbidez (5,1 a 10 uT), a maior diferença média encontrada, tanto entre operadores como entre equipamentos, foi de 0,30 uT: 6,8 uT (TP1c, OP1; TP2, OP1; TP2, OP2) x 7,1 uT (TP1a, OP1; TP1b, OP1; TB, OP1; TP1c, OP2); no entanto, os desvios-padrão permaneceram em faixas muito estreitas (1,3 uT em TP2, OP1 e 1,6 uT em TB, OP2).

Tabela 2. Estatística descritiva das medidas de turbidez (uT) na faixa de 0,31 a 0,50 uT, por operador e equipamento, Estudo 1.

Parâmetro	OP1					OP2				
	TP1a	TP1b	TP1c	TP2	TB	TP1a	TP1b	TP1c	TP2	TB
Nº medidas	36	25	44	51	43	46	44	65	55	56
Mínimo	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Máximo	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Mediana	0,40	0,40	0,35	0,40	0,40	0,40	0,35	0,40	0,40	0,40
1º quartil (25%)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
3º quartil (75%)	0,45	0,45	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,40	0,40	0,45
Média aritmética	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Variância	0,0037	0,0027	0,0033	0,0031	0,0032	0,0042	0,0036	0,0024	0,0029	0,0037
Desvio padrão	0,061	0,052	0,057	0,056	0,057	0,065	0,060	0,049	0,054	0,061
Coef. variação (%)	15	13	15	14	14	16	16	13	14	15

OP: operador; TP: turbidímetro portátil; TB: turbidímetro de bancada.

3.1.2 Diferenças entre leituras de turbidez

A ANOVA indicou que, em todas as faixas de valores de turbidez, não houve interação significativa entre os dois fatores: operadores e equipamentos ($p \gg 0,05$). O teste Tukey (Tabela 3) demonstrou que na comparação entre operadores foi encontrada diferença significativa somente nos intervalos de 0,00 a 0,30 uT (OP2 > OP1) e de 0,31 a 0,50 uT (OP1 > OP2). No entanto, mesmo considerando o arredondamento dos valores de turbidez de acordo com os critérios do *Standard Methods* (Tabela 3), a média obtida por

OP1 foi apenas 0,05 uT maior do que a obtida por OP2 no intervalo de 0,00 a 0,30 uT; na faixa de 0,31 a 0,50 uT, apesar da significância estatística, em valores absolutos a diferença entre médias foi praticamente inexistente. Com relação aos equipamentos, de forma similar, apesar de ter sido detectada diferença estatisticamente significativa entre TB e TP2 na faixa 0,00 a 0,30 uT, as médias de turbidez obtidas com ambos os turbidímetros foram praticamente as mesmas ($\approx 0,20$ uT), sendo estas somente 0,05 uT superiores (estatisticamente) à média

dos demais equipamentos (Tabela 3). Na faixa entre 0,31 e 0,50 uT, o teste Tukey apontou diferenças também entre equipamentos, apesar de, novamente, as médias praticamente não terem diferido em termos absolutos ($\approx 0,40$ uT). Em linhas gerais, isso se explicaria pela variabilidade muito estreita dos dados e, nos intervalos iniciais, pelos valores absolutos muito baixos de turbidez. Essa tendência permanece nas demais faixas de turbidez, porém com diferenças um

pouco superiores entre equipamentos: 0,8 uT em TB x 0,65 uT nos demais turbidímetros na faixa de 0,51 a 1,0 uT; 3,5 - 3,6 uT em TB, TP1a, TP1b e TP2 x 3,2 uT em TP1c na faixa de 1,1 a 5,0 uT. Na faixa de valores mais altos de turbidez (5,1 a 10 uT), os valores absolutos foram praticamente os mesmos e não houve diferenças estatisticamente significativas, tanto entre operadores como entre equipamentos (dados não incluídos na Tabela 3).

Tabela 3. Resultado dos testes de Tukey para verificação de diferenças de médias de medidas de turbidez entre operadores e equipamentos Estudo 1 ⁽¹⁾.

Operador / equipamento	N	Média teste	Média arredondada ⁽¹⁾	Operador / equipamento	N	Média teste	Média arredondada ⁽²⁾
0,00 a 0,30 uT				0,31 a 0,50 uT			
OP1	2670	0,162408 ^B	0,15	OP1	597	0,395499 ^A	0,40
OP2	2325	0,176900 ^A	0,20	OP2	798	0,387931 ^B	0,40
TB	987	0,206251 ^A	0,20	TP1a	246	0,401031 ^A	0,40
TP2	948	0,196907 ^B	0,20	TB	297	0,397568 ^A	0,40
TP1a	1056	0,152183 ^C	0,15	TP2	318	0,392753 ^{AB}	0,40
TP1b	1017	0,147208 ^C	0,15	TP1b	207	0,386163 ^{AB}	0,40
TP1c	987	0,145722 ^C	0,15	TP1c	327	0,381062 ^B	0,40
0,51 a 1,0 uT				1,1 a 5,0 uT			
OP1	495	0,692893 ^A	0,70	OP1	627	3,49611 ^A	3,5
OP2	633	0,681928 ^A	0,70	OP2	648	3,42715 ^A	3,4
TP1b	252	0,781384 ^A	0,80	TP2	246	3,61199 ^A	3,6
TP1a	216	0,673215 ^B	0,65	TB	255	3,58711 ^A	3,6
TB	225	0,663388 ^B	0,65	TP1c	234	3,46178 ^A	3,5
TP2	240	0,660293 ^B	0,65	TP1a	264	3,45341 ^A	3,5
TP1c	195	0,658774 ^B	0,65	TP1b	276	3,19385 ^B	3,2

(1) Médias nas mesmas colunas, por faixa de turbidez, que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes; (2) valores arredondados de acordo com a recomendação do *Standard Methods* (APHA, AWWA, WEF, 2012): múltiplo de 0,05 mais próximo para dados entre 0 e 1 uT; múltiplo de 0,1 mais próximo para dados entre 1 e 10 uT. OP: operador; TP: turbidímetro portátil; TB: turbidímetro de bancada.

Em trabalho semelhante a este (na mesma ETA), Bastos et al. (2015) compararam o comportamento de dois turbidímetros portáteis com equipamentos de bancada – um analógico e um digital, mas encontraram resultados de certa forma diferentes. Em período de estiagem, com valores de turbidez da água bruta próximos dos valores aqui avaliados (5 - 10 uT), todos os equipamentos forneceram leituras estatisticamente diferentes, muito embora apenas um dos turbidímetros portáteis tenha fornecido leitura média mais discrepante, acima dos demais ($\approx 8 \times 6$ uT). Na avaliação de amostras de água decantada (1 - 5 uT), o mesmo turbidímetro portátil forneceu as leituras

mais elevadas (com médias próximas a 5 uT e 3 uT, respectivamente em períodos de chuva e de estiagem), estatisticamente superiores e duas vezes ou mais acima das médias dos demais equipamentos, os quais, entre si, por vezes forneceram leituras estatisticamente semelhantes, por vezes distintas (médias de 2,2 - 2,5 uT no período de chuvas e $\approx 1,0$ - 1,8 uT em época de seca). Com relação à água filtrada (0,2 - 0,5 uT), novamente os turbidímetros portáteis, agora juntamente com o analógico de bancada, forneceram leituras mais elevadas (0,40 - 0,50 uT em época de chuvas e $\approx 0,30$ uT em período de seca) estatisticamente e mais de duas a três vezes acima das medi-

das médias do equipamento digital de bancada (0,20 - 0,30 uT e \approx 0,13 uT respectivamente em períodos de chuva e de estiagem). Em resumo, se no presente estudo há alguma indicação de que os equipamentos portáteis possam gerar leituras ligeiramente mais baixas que o de bancada, em Bastos et al. (2015) há sugestões em contrário, e foram identificadas diferenças mais largas entre as medidas com os equipamentos portáteis e de bancada, chegando inclusive a colocar em questão a interpretação do atendimento aos padrões de 0,5 uT e 0,3 uT para água filtrada. Um fator que eventualmente pode ajudar a explicar as diferenças entre esses dois estudos é a atenção com a calibração dos equipamentos, realizada rigorosamente no presente trabalho. Aliás, em estudo de Letterman et al. (2004), procedimentos de calibração específicos para leitura de valores baixos de turbidez revelaram-se como o principal fator determinante de diferenças de medidas observadas tanto em turbidímetros portáteis como de bancada: em faixa de turbidez de aproximadamente 0,01 a 0,5 uT turbidímetros que não contavam com calibração específica para valores baixos de turbidez forneceram leituras cerca de 0,1 a 0,3 uT mais altas do que as do grupo de equipamentos que contavam com tais cuidados. Por sua vez, em estudo interlaboratorial promovido pela

American Society for Testing and Materials (ASTM, 2010) envolvendo turbidímetros portáteis e de bancada, concluiu-se que a variabilidade de medidas efetuadas por diferentes operadores (desvio-padrão de 0,0190 uT de medidas de amostra padrão com 0,122 uT) foi mais importante do que aquela associada às medidas realizadas por um mesmo operador ($dp = 0,0089$ uT).

3.1.3 Confiabilidade das medidas de turbidez

De modo geral, os resultados do teste de confiabilidade das medidas de turbidez (Tabela 4) demonstraram que: (i) a acurácia das medidas fornecidas pelos equipamentos portáteis em relação ao equipamento padrão (TB) não foi boa; (ii) resultados piores foram obtidos para as medidas de valores mais baixos de turbidez. Para o ponto de corte de 0,50 uT, o TP1c apresentou concordância quase perfeita com o TB, porém os demais equipamentos portáteis apresentaram concordância entre pobre e moderada. Para o ponto de corte de 0,30 uT, os valores calculados para o índice Kappa foram ainda mais baixos, não ultrapassando 41% e 26% de concordância com o padrão, respectivamente nas leituras realizadas com TP1c pelos operadores OP1 e OP2.

Tabela 4. Resultados dos testes de concordância entre as medidas de turbidez com os equipamentos portáteis e o de bancada - valores do índice Kappa (K) para os pontos de corte de 0,30 e 0,50 uT, Estudo 1.

Ponto de corte de 0,30 uT					
OP1			OP2		
Equipamento	K	Concordância	Equipamento	K	Concordância
TP1a	0,15	Pobre	TP1a	0,15	Pobre
TP1b	0,11	Pobre	TP1b	0,17	Pobre
TP1c	0,41	Moderada	TP1c	0,26	Regular
TP2	0,19	Pobre	TP2	0,09	Pobre
Ponto de corte de 0,50 uT					
OP1			OP2		
Equipamento	K	Concordância	Equipamento	K	Concordância
TP1a	0,13	Pobre	TP1a	0,23	Regular
TP1b	0,16	Pobre	TP1b	0,27	Regular
TP1c	0,85	Quase perfeita	TP1c	0,53	Moderada
TP2	0,56	Moderada	TP2	0,29	Regular

OP: operador; TP: turbidímetro portátil.

Com relação ao fator operador, ainda na Tabela 4 se nota que discrepâncias apareceram mais nitidamente para o ponto de corte de 0,50 uT: os dados obtidos por OP1 levaram a estimativas de concordâncias pobres dos equipamentos portáteis TP1a e TP1b com o de bancada (regular quando operados por OP2), moderada para o equipamento TP2 (regular com OP2) e quase perfeita para TP1c (moderada com OP2). Para o ponto de corte de 0,30 uT, não houve diferenças importantes de concordância entre os dois operadores, tendo a maioria dos TP apresentado concordância pobre com TB, à exceção do equipamento TP1c: concordância moderada com OP1 e regular com OP2. Em suma e na prática, esses resultados sugerem que os equipamentos portáteis avaliados, em tese, apresentam problemas de identificação do “valor verdadeiro” de turbidez, particularmente para medidas abaixo de 0,30 uT.

3.1.4 Validade das medidas de turbidez

Em linhas gerais, os resultados do teste de validade das medidas de turbidez dos equipa-

mentos portáteis em relação ao turbidímetro de bancada revelaram que (Tabela 5): (i) tanto a sensibilidade (capacidade de detectar valores inferiores a determinado valor de referência quando o equipamento padrão também assim detecta) como a especificidade (capacidade de detectar valores acima do valor de referência quando o equipamento padrão também assim detecta) dos turbidímetros portáteis foram menores para as medidas mais baixas de turbidez (ponto de corte de 0,30 uT); (ii) a sensibilidade foi em geral alta, porém caiu um pouco nas medidas de turbidez mais baixas (ponto de corte de 0,30 uT) efetuadas pelo OP2; (iii) a sensibilidade se mostrou de forma mais errática: variou de 33-100% e de 50-100%, respectivamente nas mãos de OP1 e OP2 no ponto de corte de 0,50 uT, e foi bem mais baixa (\approx 30-50%) para medidas abaixo de 0,30 uT, com os dois operadores. Em resumo, esses resultados indicam que os turbidímetros portáteis avaliados apresentam bom “índice de acerto” na detecção do atendimento aos padrões de 0,30 uT e 0,50 uT, mas poderiam “mascarar” violações do padrão 0,30 uT (porém, nem tanto do padrão 0,50 uT).

Tabela 5. Sensibilidade (S) e especificidade (E) das medidas de turbidez de água filtrada com os equipamentos portáteis em relação ao turbidímetro de bancada para os pontos de corte de 0,30 e 0,50 uT, Estudo 1.

Ponto de corte de 0,30 uT					
OP1			OP2		
Equipamento	S (%)	E (%)	Equipamento	S (%)	E (%)
TP1a	89	28	TP1a	86	28
TP1b	86	28	TP1b	74	46
TP1c	92	56	TP1c	79	51
TP2	86	39	TP2	81	28
Ponto de corte de 0,50 uT					
OP1			OP2		
Equipamento	S (%)	E (%)	Equipamento	S (%)	E (%)
TP1a	95	33	TP1a	95	50
TP1b	91	67	TP1b	90	100
TP1c	99	100	TP1c	98	75
TP2	99	67	TP2	98	75

OP: operador; TP: turbidímetro portátil.

3.2 Estudo 2

3.2.1 Descrição dos dados

A estatística descritiva dos dados de turbidez das águas bruta, decantada e filtrada (filtro 1, filtro 2 e filtro 1 + filtro 2) obtidas pelo turbidímetro de bancada TB e pelos turbidímetros online TO1 e TO2 durante o Estudo 2 é apresentada na Tabela 6. Em termos médios, verifica-se que o TB apresentou valores superiores aos do TO1 para todos os tipos de água. Apesar de a diferença entre os equipamentos ter decaído ao longo das etapas do tratamento, nas amostras de águas filtradas ainda foi possível observar diferenças da ordem de 0,05 uT a mais na turbidez da água fornecida pelo equipamento TB – o que corresponde à metade do valor médio das leituras do equipamento TO1, mas por outro lado, em termos absolutos,

e práticos, isso perde significado ou importância. O equipamento TO2, utilizado somente para leitura de AF (F1 + F2), apresentou os maiores valores de turbidez entre os três equipamentos, com leituras chegando ao dobro do valor médio fornecido pelo equipamento TO1 ($TO2 = 0,25 \text{ uT} \times TO1 = 0,10 \text{ uT}$), porém apenas 0,05 uT acima da medida média de TB (0,20 uT). Com relação às medidas de dispersão, observa-se que os três equipamentos apresentaram baixo desvio padrão para as águas filtradas, com diferença entre equipamentos não superior a 0,02 uT. Para as águas bruta e decantada, o desvio padrão dos equipamentos foi maior, bem como a variabilidade entre eles: a diferença entre equipamentos foi de 0,08 para a AD e de 1,6 para a AB, sempre com o equipamento TB apresentando o maior desvio.

Tabela 6. Estatística descritiva das medidas de turbidez (uT) das amostras de água bruta, decantada e filtrada, separados por equipamento, Estudo 2.

Parâmetro	AB		AD		F1		F2		AF		
	TB	TO1	TB	TO1	TB	TO1	TB	TO1	TB	TO1	TO2
N	2984	2984	973	973	2224	2224	2784	2784	2402	2402	2402
Mínimo	1,8	1,0	0,25	0,15	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10
Máximo	40	36	2,1	1,2	0,60	0,55	0,80	0,90	0,75	0,65	0,85
Mediana	4,7	3,3	0,50	0,35	0,15	0,10	0,15	0,10	0,15	0,10	0,20
Primeiro quartil (25%)	3,6	2,7	0,40	0,25	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	0,15
Terceiro quartil (75%)	6,8	4,7	0,65	0,50	0,20	0,10	0,20	0,15	0,25	0,15	0,25
Média aritmética	6,5	4,5	0,60	0,40	0,15	0,10	0,15	0,10	0,20	0,10	0,25
Variância	27	13	0,08	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Desvio padrão	5,2	3,6	0,27	0,19	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08	0,10
Coefficiente de variação (%)	80	80	47	51	47	65	53	71	49	68	42

AB: água bruta; AD: água decantada; F1: filtro 1; F2: filtro 2; AF: filtro 1 + filtro 2; TB: turbidímetro de bancada; TO: turbidímetro online.

3.2.2 Diferenças entre leituras de turbidez

O teste de Tukey para as águas bruta, decantada, filtrada 1 e filtrada 2 (Tabela 7) revelou que a média de leitura obtida pelo turbidímetro de bancada TB foi estatisticamente superior à obtida pelo turbidímetro online TO1, em todos os casos. Revelou também que, para a água filtrada (filtro 1 + filtro 2), a média das leituras obtidas com o turbidímetro TO2 foi superior à do turbidímetro

TB e ambas foram superiores àquela obtida com o turbidímetro TO1. Porém, apesar das diferenças estatisticamente significativas, as médias de leituras fornecidas pelos equipamentos foram muito próximas entre si. Por exemplo, os valores médios fornecidos pelo equipamento de bancada para as águas F1 e F2 foram apenas 0,05 uT superiores àqueles fornecidos pelo equipamento TO1. Para a AF, a média de leitura fornecida pelo

equipamento TO2 foi 0,05 uT superior à fornecida pelo equipamento TB, que por sua vez foi 0,10 uT superior ao valor médio fornecido pelo

equipamento TO1; nesse caso, a maior diferença encontrada foi entre os equipamentos TO2 e TO1: 0,15 uT.

Tabela 7. Resultado dos testes de Tukey para verificação de diferenças de médias de medidas de turbidez entre equipamentos Estudo 2 ⁽¹⁾.

Equipamento	N	Média teste	Média arredondada ⁽²⁾	Equipamento	N	Média teste	Média arredondada ⁽²⁾
Água bruta				Água decantada			
TB	2984	6,527 ^A	6,5	TB	973	0,58530 ^A	0,60
TO1	2984	4,538 ^B	4,5	TO1	973	0,38294 ^B	0,40
Água filtrada 1				Água filtrada 1			
TB	2224	0,17044 ^A	0,15	TB	2784	0,15665 ^A	0,15
TO1	2224	0,10627 ^B	0,10	TO1	2784	0,10681 ^B	0,10
Água filtrada (filtro 1 + filtro 2)							
Equipamento	N	Média teste	Média arredondada ⁽²⁾				
TO2	2402	0,24569 ^A	0,25				
TB	2402	0,18554 ^B	0,20				
TO1	2402	0,10681 ^C	0,10				

(1) Médias nas mesmas colunas, por tipo de água, que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes; (2) valores arredondados de acordo com a recomendação do *Standard Methods* (APHA, AWWA, WEF, 2012): múltiplo de 0,05 mais próximo para dados entre 0 e 1 uT; múltiplo de 0,1 mais próximo para dados entre 1 e 10 uT. TB: turbidímetro de bancada; TO: turbidímetro *online*.

A *United States Environmental Protection Agency* sugere que turbidímetros *online*, em geral, apresentam leituras mais elevadas do que turbidímetros de bancada (USEPA, 2006). Entretanto, isso não foi confirmado no estudo de Teixeira et al. (2004) em instalação piloto: os resultados das análises da água filtrada com equipamento de bancada ($1,0474 \pm 0,3664$ uT) superaram em quase 30% (com significância estatística) as leituras obtidas com um turbidímetro *online* ($0,8097 \pm 0,2834$ uT). No já referido estudo de Bastos et al. (2015), as medidas de turbidez de água filtrada em turbidímetro *online* e de bancada forneceram leituras muito próximas entre si, ainda que por vezes estatisticamente diferentes: médias em torno de 0,20 - 0,25 uT para o turbidímetro *online* e de 0,30 uT para o de bancada em período de chuvas; 0,12 - 0,14 uT para o turbidímetro *online* e de 0,14 uT para o de bancada em período de seca; mas todas essas medidas foram quase a metade das fornecidas por turbidímetros portáteis. Por fim, reitera-se que, no presente trabalho, dos dois equipamentos *online* avaliados, um apresentou média de tur-

bidez 0,05 uT superior ao de bancada, enquanto o outro apresentou média 0,10 uT inferior ao de bancada (Tabela 7). Diferenças de desempenho entre turbidímetros *online* na leitura de valores baixos de turbidez foram também registradas por Letterman et al. (2002): o estudo encontrou pouca concordância entre diferentes equipamentos, com variação média nas medidas de turbidez de 0,50 uT; em parte, as discrepâncias foram atribuídas à formação de bolhas de ar. Em contrapartida, em outro estudo interlaboratorial promovido pela ASTM, leituras de uma amostra padrão com 0,10 uT em diferentes turbidímetros *online* resultaram em faixas estreitas de desvios-padrão: 7-12% (ASTM, 2007).

3.2.3 Confiabilidade das medidas de turbidez

De modo geral e talvez de forma um pouco diferente do Estudo 1, os resultados do teste de confiabilidade das medidas de turbidez de água filtrada (Tabela 8) demonstraram que: (i) a acurácia das medidas fornecidas pelos equipamen-

tos *online* em relação ao equipamento padrão (TB) foi de certa forma pior no ponto de corte de 0,50 uT do que no de 0,30 uT; (ii) ao menos foi mais errática no ponto de corte de 0,50 uT (concordância variando de pobre a quase perfeita com TO1; pobre com TO2) do que no ponto de corte de 0,30 uT (concordância consistentemen-

te moderada, com valores da estatística Kappa entre 0,40 e 0,60). Neste caso, os resultados sugerem que, em tese, os equipamentos *online* avaliados apresentam maiores dificuldades de identificação do “valor verdadeiro” de turbidez no intervalo entre 0,50 e 0,30 uT do que abaixo de 0,30 uT.

Tabela 8. Resultados dos testes de concordância entre as medidas de turbidez com os turbidímetros *online* e o de bancada - valores do índice Kappa (K) para os pontos de corte de 0,30 e 0,50 uT, Estudo 2.

Ponto de corte de 0,30					
0,30 uT			0,50 uT		
Tipo de água / equipamento	K	Concordância	Tipo de água / equipamento	K	Concordância
F1 - TO1	0,51	Moderada	F1 - TO1	0,20	Regular
F2 - TO1	0,56	Moderada	F2 - TO1	0,72	Quase perfeita
AF - TO1	0,58	Moderada	AF - TO1	0,12	Pobre
AF - TO2	0,40	Moderada	AF - TO2	0,12	Pobre

F1: filtro 1; F2: filtro 2; AF: filtro 1 + filtro 2; TB: turbidímetro de bancada; TO: turbidímetro *online*.

3.2.4 Validade das medidas de turbidez

A estimativa de validade das medidas de turbidez de água filtrada (Tabela 9) revelou elevada sensibilidade de todos os turbidímetros *online* em relação ao TB, independentemente do ponto de corte (0,30 ou 0,50 uT), ou seja, elevada capacidade dos TO de detecção de valores “verdadeiros positivos” (inferiores aos pontos de corte). Entretanto, com relação à especificidade (capacidade de detecção de valores de valores “ver-

dadeiros negativos”, superiores aos pontos de corte), foram observadas estimativas, em geral, mais baixas, particularmente para o equipamento TO1 nos dois pontos de corte. Neste caso, os resultados sugerem que os turbidímetros *online* avaliados apresentam bom “índice de acerto” na detecção do atendimento aos padrões de 0,30 e 0,50 uT, mas poderiam “mascarar” violações dos dois padrões: 0,30 uT e 0,50 uT.

Tabela 9. Sensibilidade (S) e especificidade (E) das medidas de turbidez água filtrada com os equipamentos *online* em relação ao turbidímetro de bancada para os pontos de corte de 0,30 e 0,50 uT, Estudo 2.

Ponto de corte de 0,30					
0,30 uT			0,50 uT		
Tipo de água / equipamento	S (%)	E (%)	Tipo de água / equipamento	S (%)	E (%)
F1 - TO1	100	36	F1 - TO1	100	11
F2 - TO1	100	43	F2 - TO1	100	56
AF - TO1	99	47	AF - TO1	100	7
AF - TO2	87	71	AF - TO2	97	59

F1: filtro 1; F2: filtro 2; AF: filtro 1 + filtro 2; TB: turbidímetro de bancada; TO: turbidímetro *online*.

4 CONCLUSÕES

Tomando como referência o turbidímetro de bancada e os limites de turbidez de 0,50 uT (valor máximo permitido para água filtrada da norma brasileira) e 0,30 uT (valor recomendado na norma brasileira e máximo permitido em normas de referência internacional), de modo geral, os resultados deste trabalho indicaram que:

(i) os equipamentos portáteis não apresentaram boa acurácia, particularmente para valores de turbidez abaixo de 0,30 uT; inversamente, os turbidímetros *online* mostraram desempenho mais consistente, em termos de acurácia, nas medidas de turbidez abaixo de 0,30 uT do que na faixa acima (< 0,50 uT);

(ii) os equipamentos portáteis apresentaram elevada sensibilidade, mas especificidade mais baixa para valores de turbidez abaixo de 0,30 uT; os turbidímetros *online* também apresentaram elevada sensibilidade, porém baixa especificidade, em ambos os casos nas duas faixas de turbidez consideradas;

(iii) na comparação entre os turbidímetros portáteis e o de bancada, quando houve diferenças, em geral os equipamentos portáteis forneceram leituras mais baixas; dos dois modelos de turbidímetros *online* testados, em geral, um produziu leituras mais baixas, e o outro mais elevadas, que o turbidímetro de bancada; embora, por vezes, essas diferenças tenham apresentado significância estatística, em termos absolutos as diferenças foram muito pequenas, particularmente nas leituras de turbidez de água filtrada (0,05-0,10 uT);

(iv) de forma similar, apesar de terem sido encontradas diferenças significativas entre leituras obtidas por dois operadores em amostras com até 0,50 uT, em termos absolutos as diferenças ocorreram, no máximo, na segunda casa decimal (0,05 uT de diferença).

Não obstante as diferenças registradas, tanto entre equipamentos de modelos e marcas diferentes como entre equipamentos de mesma marca e modelo, bem como entre operadores, a magnitude dessas discrepâncias foi pequena e não comprometeria interpretação do atendimento / violação dos padrões de 0,50 uT e 0,30 uT. Conclui-se que, a julgar pelos resultados deste trabalho, o padrão de turbidez de água filtrada da norma brasileira de qualidade da água para consumo humano pode ser verificado independentemente do equipamento utilizado. Os resultados não deixam, entretanto, de reafirmar a necessidade de adotar rigorosos procedimentos de calibração de turbidímetros e controle de qualidade analítica no monitoramento da turbidez. Por fim, é preciso destacar que essas conclusões merecem confirmação em estudos mais amplos.

5 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos de mestrado e de graduação (Programa Jovens Talentos para a Ciência). Às empresas Policontrol Instrumentos Analíticos e Digimed Instrumentação Analítica pela cessão, por empréstimo, de turbidímetros.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22nd ed. Washington, D.C.: APHA; AWWA; WEF, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. D6698-07: **Standard test method for on-line measurement of turbidity below 5 NTU in water**. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2007.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D6855-10: **Standard test method for determination of turbidity below 5 NTU in static mode**. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2010
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D7726-11: **Standard guide for the use of various turbidimeter technologies for measurement of turbidity in water**. ASTM, International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2011.
- BALDURSSON, S.; KARANIS, P. Waterborne transmission of protozoan parasites: 2004–2010. **Water Research**, v.45, n.20, p. 6603-6614, 2011.
- BASTOS, R. K.X.; FERREIRA, L.C.; LOPES, G. J. R. Avaliação comparativa de leituras de turbidez em amostras de água bruta e tratada utilizando diferentes equipamentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28º, 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2015 (anais eletrônicos).
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº. 518, de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2004.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº. 2914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2011.
- De ROOS, A. J.; GURIAN, P. L.; ROBINSON, L. F.; RAI, A.; ZAKERI, I.; KONDO, M. C. Review of epidemiological studies of drinking-water turbidity in relation to acute gastrointestinal illness. **Environmental Health Perspectives**, v. 125, n. 8, 086003-1 - 086003-9, 2017, 2017.
- HEALTH CANADA. **Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document - Turbidity**. Ottawa, Ontario: Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, 2012 (Catalogue No H144-9/2013E-PDF).
- HEALTH CANADA. **Guidelines for Canadian Drinking Water Quality—Summary Table**. Ottawa, Ontario: Water, Air and Climate Change Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. ISO 7027: **Water quality — Determination of turbidity**. Geneva, 1999. 19 p.
- LETTERMAN, R.D.; JOHNSON, C.E.; VISWANATHAN, S.; DWARAKANATHAN, J. **A study of low-level turbidity measurements**. Denver, Colorado: American Water Works Association Research Foundation and American Water Works Association, 2002.
- LETTERMAN, R.D.; JOHNSON, C.E.; SUDHAKAR, V. Low-level turbidity measurements: a comparison of instruments. **Journal American Water Works Association**, v.96, n.8, p.124-137, 2004.
- LILIENFELD, D. E; STOLLEY, P. D. **Foundations of Epidemiology**. 3th ed. Oxford: Oxford University Press, , 371 p., 1994.
- MINISTRY OF HEALTH. **Drinking-water Standards for New Zealand 2005 (Revised 2008)**. Wellington: Ministry of Health, 2008.
- NATIONAL HEALTH AND MEDICAL RESEARCH COUNCIL – NHMRC; NATIONAL RESOURCE MANAGEMENT MINISTERIAL COUNCIL – NRMCMC. **Australian drinking water guidelines 6 2011, version 3.4 updated october 2017**. Canberra: NHMRC, NRMCMC, Commonwealth of Australia, 2017.
- PINTO, V. G ; HELLER, L.; BASTOS, R. K. X. Drinking water standards in South American countries: convergences and divergences. **Journal of Water and Health**, v. 10, n. 2, p. 295-310, 2012.
- SADAR, M. J. **Understanding turbidity science**. Loveland, CO: Hach Company, 1998 (Technical Information Series, Booklet II). Disponível em: < <https://hach.com>>. Acesso em: 8 jun. 2018.
- SADAR, M.J. Turbidity instrumentation: An overview of today's available technology. In: TURBIDITY AND OTHER SEDIMENT SURROGATES WORKSHOP, Reno: April 30 – May 2, 2002. 3p. **Anais...** Disponível em: < <https://water.usgs.gov>>. Acesso em: 8 nov. 2017.
- SCARDINA, P.; LETTERMAN, R.D.; EDWARDS, M. Particle count and on-line turbidity interference from bubble formation. **Journal American Water Works Association**, v. 98, n. 7, p. 97-109, 2006.
- TEIXEIRA, A.R.; SANTOS, E.P.C.; PÁDUA, V.L.; HELLER, L.; DI BERNARDO, L.; LIBÂNIO, M. A confiabilidade analítica dos valores de turbidez da água filtrada e seu efeito no cumprimento do padrão de potabilidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.9, n.1. p. 65-72, 2004.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, USEPA. **Method 180.1: Determination of turbidity by nephelometry**. Cincinnati, Ohio: 1993. 10 p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **National primary drinking water. regulations: long term 2, enhanced surface water treatment rule**; Final Rule. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, Federal Register– Part II – 40CFR, Parts 9, 141 and 142. 2006.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Water quality and health – Review of turbidity: Information for regulators and water supplies. Technical brief**. Geneva: WHO, 2017 (WHO/FWC/WSH/17.01)