

II-098 - CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE LAGOAS DE POLIMENTO RASAS PARA PEQUENAS COMUNIDADES COM USO DE TRAÇADOR SALINO (CLORETO DE SÓDIO)

Ricardo Gomes Passos⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Engenheiro Ambiental na Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - INFRAERO.

Mateus Pimentel de Matos

Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Recursos Hídricos e Ambientais, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (UFV). Doutorando em Saneamento no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Daniel Filipe Cristelo Dias

Licenciado em Engenharia Civil pela Universidade do Algarve (Portugal). Mestrado em Geotecnia e Ambiental, no Programa de Mestrado em Engenharia Civil, pela Universidade da Beira Interior (Portugal). Doutoramento em Saneamento no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos na Universidade Federal de Minas Gerais.

Marcos von Sperling

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutor em Engenharia Ambiental pelo Imperial College (Universidade de Londres). Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Endereço⁽¹⁾: Av. Antônio Carlos 6627 – Escola de Engenharia, Bloco 1 – sala 4622; 31270-901 – Belo Horizonte - MG, Brasil - e-mail: ricardogpassos@yahoo.com.br.

RESUMO

São registrados aqui os principais resultados de ensaios com traçador salino em duas lagoas de polimento rasas para pequenas comunidades, sendo uma sem chicanas e outra com duas chicanas longitudinais e com menor profundidade. A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), em Belo Horizonte – MG. O traçador utilizado foi o sal de cozinha comum (cloreto de sódio) em solução com água. Observou-se uma tendência geral à mistura completa nos sistemas, até mesmo (e pronunciadamente) na lagoa com chicanas, onde havia a perspectiva de maior aproximação ao regime de fluxo em pistão. Os valores do número de dispersão d obtidos indicam elevada dispersão em ambas as lagoas. Os principais resultados deste trabalho e as percepções dos autores quanto aos testes realizados permitiram considerações práticas no que diz respeito ao uso de traçador salino em sistemas de lagoas.

PALAVRAS-CHAVE: Lagoas de polimento, chicanas, traçador salino, caracterização hidráulica.

INTRODUÇÃO

Do ponto de vista hidráulico, as lagoas são conceitualmente simples. As definições de projeto devem ser tais que permitam resultar em um tempo de detenção hidráulica (TDH) conhecido e suficiente para que as reações biológicas ocorram. Entretanto, esse valor de TDH (volume/vazão) é apenas teórico e pode ocultar fenômenos de curto circuito, zonas mortas, zonas de estagnação, dispersão, estratificação térmica, influência do vento, entre outros, que tornam o TDH real diferente do teórico e podem resultar em baixas eficiências de tratamento. No caso das lagoas de maturação ou polimento, por serem dimensionadas principalmente para remoção de patógenos, o TDH tem ainda maior influência na eficiência. Portanto, o conhecimento do real comportamento hidráulico é fundamental para a adequada operação desses sistemas.

Na grande maioria das pesquisas em lagoas, a identificação desses fatores hidráulicos é realizada por meio da técnica estímulo-resposta com o uso de traçadores. Levenspiel (2000) apresenta um dos mais conhecidos referenciais teóricos a respeito do assunto. Dentre os tipos de traçador disponíveis, citam-se os traçadores radioativos, traçadores fluorescentes, traçadores salinos e até mesmo traçadores biológicos (uso de bactérias), com vantagens e desvantagens no uso de cada tipo. Por exemplo, os traçadores radioativos são menos reativos, têm densidade próxima à da água e requerem menores quantidades nos ensaios, mas apresentam a desvantagem de dependerem de aparato mais sofisticado para leitura de dados (e por isso muitas vezes equipamentos mais caros e de difícil aquisição), bem como de pessoal treinado para manipulação dos equipamentos e para evitar que ocorram acidentes com danos ambientais mais graves. Traçadores fluorescentes (ex.: rodamina B, rodamina WT, fluoresceína) também têm a vantagem de serem detectáveis em baixas concentrações (não tem concentração de background) e não são tóxicos, com exceção da rodamina B, que é relatada na literatura como potencialmente carcinogênica. Apresentam inconvenientes como risco de degradação pela ação da luz solar e sorção, mas não são absorvíveis e não apresentam os problemas relacionados à densidade. Dentre os traçadores fluorescentes, o mais amplamente utilizado é a rodamina WT, que não apresenta riscos conhecidos à saúde. Já os traçadores salinos são geralmente mais baratos e de mais fácil aquisição e quantificação (podendo ser utilizado um condutivímetro comum), não são tóxicos e não apresentam riscos de poluição ambiental ou à saúde, mas apresentam como desvantagens a possível adsorção no meio que está sendo avaliado (no caso das lagoas, na matéria orgânica, biomassa ou lodo, por exemplo), a maior densidade da solução e a necessidade de aplicação de grandes quantidades da substância, devido à elevada concentração de background das lagoas. Essas e outras vantagens e desvantagens são comentadas com ênfase em sistemas naturais de tratamento de esgotos por diversos autores como Alvarado *et al.* (2011); Camargo Valero e Mara (2009); Lin *et al.*, (2003); Keefe *et al.* (2004); Silva *et al.* (2009); Chazarenc *et al.* (2003); Lange *et al.* (2014); Whitmer *et al.* (2000); Xu *et al.* (2004).

Neste trabalho são registrados os principais resultados de ensaios com traçador salino em duas lagoas de polimento rasas para pequenas comunidades. O traçador utilizado foi o sal de cozinha comum (cloreto de sódio) em solução com água. A partir dos resultados obtidos, buscou-se avaliar os principais parâmetros hidráulicos das lagoas, bem como apontar as principais percepções quanto ao uso do traçador escolhido.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e unidade experimental

A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), em Belo Horizonte – MG. A ETE experimental está inserida na ETE Arrudas, operada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), que recebe e trata a maior parcela do esgoto gerado na cidade. Após passar pelo tratamento preliminar da ETE Arrudas (unidade de gradeamento composto por grade grossa manual e fina mecanizada, seguido de desarenador), um pequeno percentual do esgoto é encaminhado à estação experimental, alimentando várias unidades de pesquisa, incluindo as do presente trabalho.

O aparato experimental consiste em um sistema composto de duas lagoas de polimento rasas, concebidas para o pós-tratamento de efluente de reator UASB em pequenas comunidades. O sistema foi projetado para atender uma população de 250 habitantes e uma vazão aproximada de 40 m³/d.

As unidades experimentais do CePTS foram construídas em 2001 e começaram a operar em 2002. Ao longo desse tempo, as lagoas passaram por diferentes arranjos e condições operacionais (funcionamento em série ou paralelo; com ou sem chicanas; com ou sem meio filtrante; diferentes tempos de detenção hidráulica, vazão afluente e profundidades). Este trabalho compreende a atual configuração, na qual as lagoas operam em série, sendo a primeira com lodo acumulado de 12 anos (denominada aqui lagoa 1), e a segunda sem lodo, operando com menor profundidade e com duas chicanas longitudinais (lagoa 2) (Figura 1).

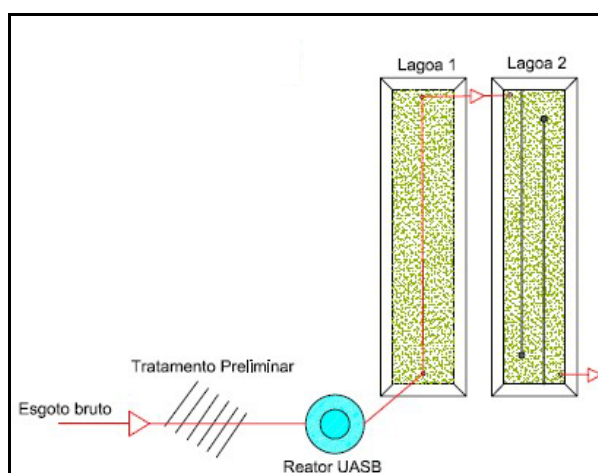


Figura 1: Desenho esquemático ilustrativo do arranjo operacional da ETE experimental CePTS UFMG/COPASA na configuração atual: lagoas em série, com chicanas na segunda.

As paredes das chicanas na lagoa 2 foram confeccionadas com lonas de poliéster, sustentadas por cabos de aço e ancoradas na base com ajuda do peso de vigotas de concreto. As lonas eram presas aos cabos de aço por meio de abraçadeiras de nylon em orifícios igualmente espaçados, de forma que funcionavam como cortinas; permitindo assim flexibilidade quanto ao ajuste do comprimento de operação.

As lagoas apresentam como principais dimensões e características os valores apresentados na Tabela 1

Tabela 1: Principais dimensões/características das lagoas de polimento do CePTS UFMG/COPASA.

	Lagoa 1	Lagoa 2
Configuração geométrica (fundo)	25,00m x 5,25m	25,00m x 5,25m *
Presença de lodo (altura média)	Sim (~0,34m**)	Não
Relação comprimento/largura	~ 4	~ 44
Profundidade de operação	0,80 m	0,44 m
Área do espelho d'água	182 m ²	159 m ²
Área de fundo	131 m ²	131 m ²
Inclinação dos taludes internos	1 : 1	1 : 1
Vazão afluyente (projeto)	40 m ³ /d	40 m ³ /d
TDH teórico (projeto)*	3,1 d / 1,7 d***	1,6 d

* A lagoa 2 possui duas chicanas longitudinais igualmente espaçadas, cada uma ocupando 90% do comprimento

Batimetria realizada por Possmoser-Nascimento *et al.* (2014). *Excluindo-se o volume ocupado pelo lodo, obtido na batimetria de Possmoser-Nascimento *et al.* (2014)

Ensaios com traçador

O traçador utilizado nos ensaios foi o sal de cozinha comum (cloreto de sódio - NaCl) em solução aquosa. Os ensaios foram realizados por meio da técnica de estímulo-resposta (LEVENSPIEL, 2000) com injeção de pulso do traçador na entrada das lagoas e análise da condutividade elétrica na saída. As leituras de condutividade foram realizadas com a sonda YSI 600XLM V2® (faixa, de detecção de 0 a 100 mS cm⁻¹) com *datalogger* interno no teste na lagoa 1 e com sondas Global Water WQ301A-O (faixa de detecção de 0 a 5.000 µS cm⁻¹), acopladas a um *datalogger* GL500-7-2 Global Water®, no teste na lagoa 2. Ambos os modelos de sensores foram calibrados conforme o manual dos fabricantes. A frequência de medição nos ensaios foi de 10 minutos. Os sensores utilizados fazem automaticamente a correção da condutividade para uma temperatura de referência (25°C).

As soluções do traçador foram preparadas em reservatórios de 200 e 800L (caixas d'água), com adição do sal e homogeneização contínua. Antes da aplicação do sal foram realizadas medidas da condutividade natural das lagoas, para definição dos valores de background. As quantidades de sal de cozinha utilizadas nos ensaios foram definidas a partir de ensaios exploratórios, quando se chegou à uma quantidade mínima por lagoa (de acordo com o volume) capaz de superar o valor de *background* em 3 a 4 vezes no pico e não ultrapassar o limite de quantificação da sonda. De forma a reduzir o volume de traçador para aproximar a aplicação a uma

injeção do tipo pulso e facilitar a mistura da massa líquida, o volume de água utilizado para diluição foi o mínimo necessário, observado o limite de solubilidade do NaCl em água à temperatura ambiente.

Após preparo da solução, o traçador foi introduzido nas lagoas lentamente, para reduzir a sedimentação da solução salina (mais densa), mas sempre em período de tempo inferior a 2% do TDH das lagoas, para não descaracterizar a aplicação em pulso, conforme recomendações de Bracho et al. (2009). A vazão nas lagoas também foi aferida antes e ao longo de cada ensaio.

Os valores obtidos de condutividade foram convertidos para concentração de NaCl utilizando-se da equação de calibração da sonda apresentada por Possmoser-Nascimento (2014), em trabalhos no mesmo sistema (Equação 1).

$$[NaCl] = 0,528 \cdot (\text{condutividade}) - 3,4836 \quad R^2 = 0,999 \quad (1)$$

Apesar da condutividade nas lagoas ser originária de diferentes compostos dissolvidos, e não apenas do cloreto de sódio, a transformação de toda condutividade em concentração de NaCl possibilitou a subtração dos valores preexistentes dos valores encontrados após a injeção do traçador.

A Figura 2(a) apresenta registro de um dos ensaios de traçador (lagoa 2), utilizando o reservatório de 800L, com aplicação do traçador na tubulação de entrada da lagoa, e a Figura 2(b) registro da sonda YSI 600XLM V2 fixa ao cavalete para posterior inserção no final da lagoa 1.

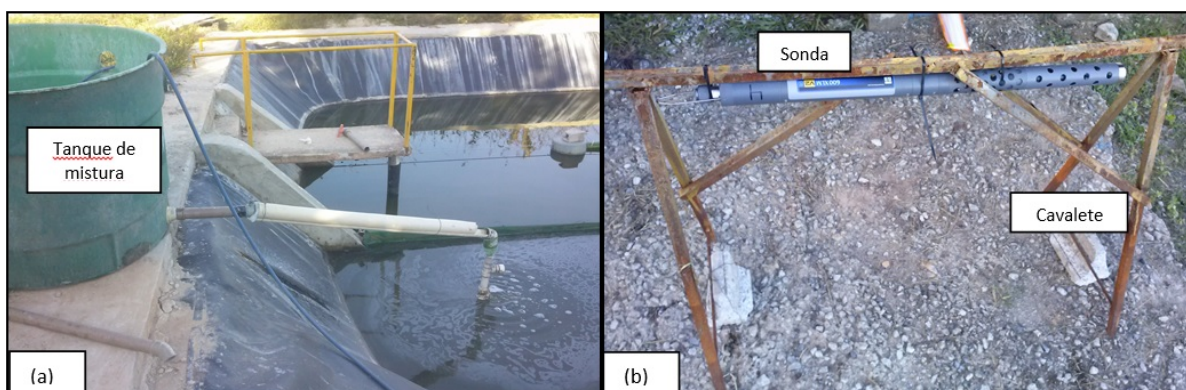


Figura 2: Registro fotográfico (a) do ensaio na lagoa 2 e (b) da sonda YSI 600XLM V2 fixada ao cavalete para posterior inserção no final da lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA.

A Tabela 2 sumariza as condições de realização dos ensaios nas duas lagoas.

Tabela 2: Resumo das condições de realização dos ensaios de traçador nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

	Ensaio n° 1	Ensaio n° 2
Período	29/04/14 a 19/05/14	09/08/14 a 27/08/14
Unidade de tratamento	Lagoa 1	Lagoa 2
Massa adicionada do traçador (kg)	320	160
Volume da solução (m³)	1,1	0,6
Tempo de aplicação (h)	2,0	0,8
Vazão afluente medida antes do ensaio (m³/d)	40	31
TDH teórico (d)	3,1 / 1,7*	2,1

*Excluindo-se o volume ocupado pelo lodo, obtido na batimetria de Nascimento *et al.* (2013)

A partir dos resultados dos ensaios foi possível determinar os tempos de detenção hidráulica médios, assim como as variâncias, baseado na distribuição discreta dos intervalos de tempo medidos. Os valores obtidos foram então utilizados para determinar o número de dispersão de cada lagoa.

Tendo em vista que a curva de traçador é definida por uma distribuição discreta de intervalos de tempo, o tempo de detenção hidráulica médio pode ser obtido por meio da Equação 2. A variância dos dados pode ser definida de acordo com a Equação 3 e sua forma adimensional (σ_θ^2) pode ser relacionada ao número de dispersão d por meio da Equação 4 (LEVENSPIEL, 2000; METCALF & EDDY, 2003). Para obtenção de d utilizou-se método iterativo com auxílio da ferramenta *solver* do Microsoft Excel®, a partir da qual foi encontrado o valor de d que mais aproximava de zero a diferença entre os termos dos dois lados da Equação 4.

$$\overline{TDH}_{\Delta c} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (2)$$

$$\sigma_{\Delta c}^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - (\overline{TDH}_{\Delta c})^2 \quad (3)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_{\Delta c}^2}{\overline{TDH}_{\Delta c}^2} = 2d - 2d^2 \left[(1 - e^{-1/d}) \right] \quad (4)$$

Para as quais:

$\overline{TDH}_{\Delta c}$ = tempo médio de detenção baseado na discretização do intervalo de tempo

t_i = tempo no intervalo i de medição

τ = tempo de detenção hidráulica teórico (volume/vazão)

C_i = concentração no intervalo i de medição

Δt_i = Incremento de tempo

Von Sperling (2002) apresenta equações empíricas de literatura para estimativa do número de dispersão (POLPRASERT E BATHARAI, 1983; AGUNWAMBA et al., 1992; YANEZ, 1993 e VON SPERLING, 1999) com base em características geométricas das lagoas. Os valores de d obtidos pelos testes com traçador serão comparados com os valores obtidos com o uso dessas equações.

Outros parâmetros hidráulicos determinados foram os índices de curto-circuito ϕ (METCALF & EDDY, 2003) e S (TA E BRIGNAL, 1998); números de tanques em série N , baseado em Levenspiel (2000) e N_p baseado no TDH real médio e no tempo de pico do traçador (KADLEC E WALLACE, 2009); eficiência volumétrica E_v (KADLEC E WALLACE, 2009); fração de zonas mortas Ψ ; e eficiência hidráulica λ , conforme proposto por Persson *et al.* (1999):

$$\phi = \frac{t_i}{\tau} \quad (5)$$

$$S = \frac{t_{16}}{\tau} \quad (6)$$

$$N = \frac{1}{2d - 2d^2 (1 - \exp^{-1/d})} \quad (7)$$

$$N_p = \frac{\overline{TDH}_{\Delta c}}{\overline{TDH}_{\Delta c} - t_p} \quad (8)$$

$$E_v = \frac{\overline{TDH}_{\Delta c}}{\tau} \quad (9)$$

$$\Psi = 1 - E_v \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{t_p}{\tau} \quad (11)$$

Em (5), (6) e (11), t_i é tempo no que ocorre a primeira aparição do traçador e t_p é o tempo corresponde ao pico (maior concentração), respectivamente.

O percentual de recuperação do traçador foi calculado com o emprego da Equação 12:

$$\% R = \frac{\sum Q_i C_i \Delta t_i}{m_0} \quad (12)$$

Para a qual Q_i é a vazão efluente no intervalo i (considerada constante) e m_0 a massa de traçador adicionada.

RESULTADOS

Parâmetros hidráulicos

As Figuras 2a e 2b apresentam gráficos com os dados de concentração do traçador ao longo do tempo de duração dos ensaios. O tempo zero (início da injeção do traçador) corresponde a 12:00h do dia 29/04/14 para o ensaio na lagoa 1 e 16:00h do dia 09/08/14 para o ensaio na lagoa 2. O teste na lagoa 1 durou cerca de 20 dias e o teste na lagoa 2 cerca de 18 dias, superando consideravelmente, em ambos os casos, a recomendação genérica existente na literatura de que a duração do ensaio de traçador seja de 3 vezes o TDH teórico em cada unidade.

Os dois ensaios sofreram interrupção de chegada do afluente por falta de energia no centro experimental. No teste realizado na lagoa 1, a interrupção ocorreu por cerca de 28 horas, a partir das 05:00h do dia 02/05/14 (registros do operador da ETE). No teste realizado na lagoa 2 também houve intermitência, mas por pequenos intervalos não registrados.

Os formatos das curvas indicam tendência à mistura completa, até mesmo na lagoa com chicanas, onde havia a perspectiva de maior aproximação ao regime de fluxo em pistão (Figura 3).

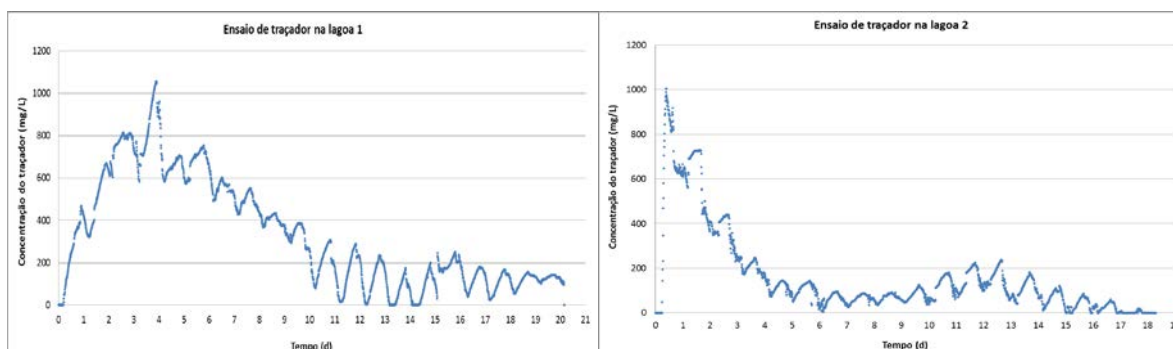


Figura 3: Curvas concentração de traçador versus tempo obtidas nos ensaios (a) na lagoa 1 e (b) na lagoa 2. CePTS UFMG/COPASA.

As oscilações nas curvas ocorrem diariamente e podem ser atribuídas aos eventos de estratificação, com movimento para o fundo de parte da solução salina (mais densa), e desestratificação, com mistura vertical. Portanto, durante esses eventos, os sensores da superfície registram continuamente camadas do fluido mais concentradas e menos concentradas a cada ocorrência dos eventos de estratificação. Tais assertivas são corroboradas por Passos e Von Sperling (2015), que comprovam eventos diários de estratificação térmica e desestratificação no mesmo sistema de lagoas.

Os parâmetros hidráulicos obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros hidráulicos obtidos com a realização dos ensaios de traçador nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

	τ (d)	\overline{TDH}_{Ac} (d)	%R	d	N	N_p	ϕ	t_i (min)	t_p (min)	E_v	Ψ	λ
Lagoa 1	3,1	7,1	92,7	0,37	2	2	0,05	230	5600	2,27	-1,27	1,25
Lagoa 2	2,1	6,1	89,0	0,73	1	1	0,11	350	575	2,98	-1,98	0,19

Os valores do número de dispersão d obtidos indicam elevada dispersão em ambas as lagoas, de acordo com a classificação de Metcalf e Eddy (2003) ($d \geq 0,25$). Destaca-se o elevado valor de d obtido na lagoa 2, sendo inclusive consideravelmente superior ao obtido na lagoa 1. Os índices de curto circuito (ϕ) próximos de zero e o reduzido número equivalente de tanques em série (N e N_p) também indicam elevado grau de mistura nas duas lagoas. Devido a presença das chicanas na lagoa 2, havia a perspectiva de maior aproximação ao regime idealizado de fluxo em pistão, o que não ocorreu.

A Tabela 4 apresenta comparação entre os valores de d obtidos com os testes de campo e aqueles obtidos com equações empíricas da literatura registradas por Von Sperling (2002).

Tabela 4 – Números de dispersão (d) obtidos para as duas lagoas com base em equações de literatura e comparação com os obtidos com as curvas de traçador.

	Lagoa 1	Lagoa 2
Polprasert e Batharai (1983)	0,11	0,01
Agunwamba <i>et al.</i> (1992)	0,20	0,03
Yanez (1993)	0,22	0,02
Von Sperling (1999)	0,23	0,02
Curva do traçador	0,37	0,73

Observa-se que os valores obtidos por meio das curvas de traçador foram inferiores aos valores obtidos com as equações de literatura, em ambas as lagoas. Entretanto, tais valores foram consideravelmente discrepantes no caso da lagoa 2, visto que, de fato, não era esperada grande dispersão nessa unidade. Em relação a essas equações, importante destacar que são empíricas e geralmente utilizadas para prever o valor do número de dispersão d quando do projeto de futuras instalações (VON SPERLING, 2002). Ademais, suas formulações não contemplam fatores de grande influência no comportamento hidrodinâmico das lagoas, como as condições de entrada e saída, estratificação térmica, ventos e turbulência.

A antecipação do pico do traçador foi mais pronunciada na lagoa 2, resultando em valor de λ substancialmente menor nesta unidade, o que também não era esperado. Tal resultado pode ser indicativo de curtos circuitos entre as chicanas, via passagem do fluido por baixo dos defletores ou próximo aos pontos de fixação das lonas na parede dos taludes. A antecipação do pico também está relacionada à grande dispersão na unidade.

Outra observação importante é que os TDH médios resultaram superiores aos teóricos (em mais que o dobro), o que pode ter ocorrido devido às intermitências do afluente que ocorreram durante os ensaios e também à presença de zonas de estagnação e zonas de troca lenta nas lagoas, causando, em ambos os casos, retardo na chegada de volume considerável do traçador à saída. Esses resultados também conduziram a valores de E_v superiores à unidade e, conseqüentemente, valores negativos para a fração de zonas mortas.

Uso do traçador salino

Conforme já mencionado, as quantidades de sal de cozinha utilizadas nos testes foram definidas a partir de ensaios exploratórios, quando se chegou a uma quantidade mínima por lagoa (de acordo com o volume) capaz de superar razoavelmente o valor de *background* (3 a 4 vezes) e não ultrapassar o limite de quantificação da sonda. Buscou-se diluir o traçador em volume mínimo de água que facilitasse a mistura e assegurasse a dissolução.

Ao se observar tais requisitos, chegou-se nas quantidades mínimas de 320 kg de no ensaio da lagoa 1 e 160 kg no ensaio da lagoa 2; que diluídos em 1,1 m³ e 0,6 m³ de água, respectivamente, resultaram em concentrações de solução de traçador inferiores a 300 kg/m³, com folga no que diz respeito ao limite de solubilidade do NaCl

em água à 20°C (de 360 kg/m³), para viabilizar a mistura. Nota-se então que, mesmo para um sistema de menor porte como este em estudo, as quantidades mínimas utilizadas do sal de cozinha são consideráveis e podem inviabilizar o transporte em veículo comum (passando a demandar veículo de carga), principalmente quando se considera que as estações de tratamento de esgoto comumente ficam situadas a longa distância dos centros urbanos e comerciais.

A etapa de homogeneização do traçador também exigiu bastante esforço. Cada ensaio demandou cerca de 6h para ser completamente concluído por 2 pessoas. A menos que a mistura seja mecânica, muita dificuldade também pode ser encontrada para movimentar a massa d'água manualmente. Em termos práticos, observou-se que a forma mais eficiente de preparo da solução (menor dificuldade de mistura manual) ocorre com o preenchimento inicial da metade do recipiente com água, depois adição da maior parte do sal com mistura instantânea até a saturação e então adição sequencial de água e novamente sal a cada vez que se observar saturação da solução.

Em termos de custos, estima-se que foram gastos cerca de R\$ 300,00/teste, valor que pode não ser competitivo quando se compara com testes com os demais traçadores (aqueles com custos maiores associados aos equipamentos), principalmente em casos em que há previsão de repetições.

Por fim, há de se considerar o fator densidade da solução, visto que a solução do traçador (mais densa) tende a ir para o fundo da lagoa e seguir em direção à saída sem mistura com as camadas superiores do líquido. Nas lagoas do presente estudo houve a desestratificação em eventos diários, o que favoreceu a mistura e foi responsável pelos picos menores do traçador a cada dia. Entretanto, em lagoas mais profundas, a realização de testes com traçador salino em eventos de estratificação térmica mais duradouros pode sofrer influência do efeito da densidade da solução, eventualmente revelando um curto-circuito que pode não ocorrer na realidade. Neste sentido, recomenda-se o ajuste da densidade da solução via controle da concentração e temperatura da mistura ou realização dos ensaios preferencialmente em períodos nos quais seja observada a mistura vertical na lagoa.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Observa-se uma tendência geral à mistura completa nos sistemas, até mesmo (e pronunciadamente) na lagoa com chicanas, onde havia a perspectiva de maior aproximação ao regime de fluxo em pistão. Além do número de dispersão, os índices de curto circuito próximos de zero e o reduzido número equivalente de tanques em série também indicam elevado grau de mistura nas duas lagoas. A considerável antecipação do pico do traçador na lagoa com chicanas pode ser indicativo de curtos circuitos entre as chicanas, via passagem do fluido por baixo dos defletores ou próximo aos pontos de fixação das lonas na parede dos taludes. Os tempos de detenção hidráulica reais médios resultaram superiores aos teóricos, o que pode ter ocorrido devido às intermitências do afluente que ocorreram durante os ensaios e também à presença de zonas de estagnação e zonas de troca lenta nas lagoas, causando retardo na chegada de volume considerável do traçador à saída.

Os principais resultados deste trabalho e as percepções dos autores quanto aos testes realizados permitiram algumas considerações no que diz respeito ao uso de traçador salino em sistemas de lagoas. Essas substâncias são mais acessíveis e simples de quantificar, mas as quantidades requeridas dificultam o transporte, o preparo da solução e o controle da homogeneidade da mistura, geralmente demandando elevado esforço e tempo em cada ensaio. Em lagoas maiores, a aplicação torna-se praticamente inviável quando são consideradas as quantidades necessárias de sal. A densidade da solução também pode resultar em respostas irreais nas lagoas, já que é difícil evitar o gradiente de concentração do traçador ao longo do perfil vertical, principalmente em lagoas com períodos mais duradouros de estratificação térmica (mais profundas). Neste sentido, observando as vantagens e desvantagens do traçador e as percepções registradas neste trabalho, pode-se considerar que em sistemas com meio poroso (a exemplo de *wetlands* construídos), o sal de cozinha pode ser utilizado com mais sucesso, visto que o fator densidade terá influência reduzida e a quantidade necessária do soluto será menor (em geral, a metade da requerida em lagoa com mesmas dimensões).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Capes, Finep, Copasa e Fundação Bill e Melinda Gates (projeto “Saneamento para o Pobre Urbano”, coordenado pelo Unesco-IHE).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVARADO, A.; VEDANTAM, S.; DURAZNO, A.; NOPENS, I. Hydraulic assessment of waste stabilization ponds: Comparison of computational fluid dynamics simulations against tracer data. *MASKANA*, v. 2, n. 1, p. 81-89, 2011.
2. CAMARGO VALERO, M. A.; MARA, D. The influence of algal biomass on tracer experiments in maturation ponds. *Desalination and Water Treatment – Science and Engineering*, v. 4, p. 89-92, 2009.
3. CHAZARENC, F.; MERLIN, G.; GONTHIER, Y. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v. 21, p. 165–173, 2003.
4. KADLEC, R. H.; WALLACE, R. D. *Treatment Wetlands*. 2 ed. Florida: CRC Press, 2009, 1016 p.
5. KEEFE, S. H.; BARBER, L. B.; RUNKEL, R. L.; RYAN, J. N.; MCKNIGHT, D. M.; WASS, R. D. Conservative and reactive solute transport in constructed wetlands. *Water Resources Research*, v. 40, p. 1-12, 2004.
6. LANGE J.; SCHÜTZ T.; GREGOIRE C.; ELSÄSSER D.; SCHULZ R.; PASSEPORT E.; TOURNEBIZE J. Multi-tracer experiments to characterise contaminant mitigation capacities for different types of artificial wetlands. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, v. 91, n. 7-8, p. 768-785, 2011.
7. LEVENSPIEL, O. *Chemical Reaction Engineering*. 3rd ed. New York: John Wiley e Sons, 2000. 668p.
8. LIN, A. Y. C.; DEBROUX, J. F.; CUNNINGHAM, J. A.; REINHARD, M. Comparison of rhodamine WT and bromide in the determination of hydraulic characteristics of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v. 20, n. 1, p. 75–88, 2003.
9. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse*. 4ª ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1818p.
10. PASSOS, R. G.; VON SPERLING, M. Avaliação da ocorrência de estratificação térmica em lagoas de polimento rasas para pequenas comunidades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28, 2015, Rio de Janeiro. [Anais...] Rio de Janeiro: ABES, 2015.
11. PERSSON, J.; SOMES, N. L. G.; WONG, T. H. F. Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, v.40, n.3, p. 291–300, 1999.
12. POSSMOSER-NASCIMENTO, T. E. *Lodo em lagoas de polimento: acúmulo e implicações no comportamento hidrodinâmico e no desempenho do sistema*. 2014. 117 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
13. POSSMOSER-NASCIMENTO, T. E.; RODRIGUES, V. A. J.; VON SPERLING, M.; VASEL, J-L.; Sludge accumulation in shallow maturation ponds treating UASB reactor effluent: results after 11 years of operation. *Water Science and Technology*, v. 70, n. 2, p. 321–328, 2014.
14. SILVA, L. L.; DONNICI, C. L.; AYALA, J. D.; FREITAS, C. H.; MOREIRA, R. M.; PINTO, A. M. F. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. *Química Nova*, v. 32, n. 6, p. 1576-1585, 2009.
15. TA, C. T.; BRIGNAL, W. J. Application of computational fluid dynamics technique to storage reservoir studies. *Water Science and Technology*, v. 37, n. 2, p. 219-226, 1998.
16. VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*. Vol. 3: Lagoas de estabilização. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2002. 196 p.
17. WHITMER, S.; BAKER, L.; WASS, R. Loss of bromide in a wetland tracer experiment. *Journal of Environmental Quality*, v. 29, p. 2043-2045, 2000.
18. XU, S.; LERI, A. C.; MYNENI, S. C. B.; JAFFE, P. R. Uptake of bromide by two wetland plants (*Typha latifolia* L. and *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud). *Environmental Science & technology*, v. 38, n. 21, 2004.