

# Balanço de oxigênio dissolvido em lagoas de polimento tratando efluente de reator UASB

*Dissolved oxygen balance in polishing ponds treating UASB reactor effluent*

Ana Rachel Melo Nascimento<sup>1\*</sup> , Mariana Medeiros Batista<sup>2</sup> , Silvânia Lucas dos Santos<sup>1</sup> 

## RESUMO

Lagoas de polimento são unidades de pós-tratamento de efluente anaeróbio que atuam na remoção da matéria orgânica residual, bem como de patógenos e nutrientes. A operação dessas lagoas de forma intermitente favorece a eficiência de remoção dos constituintes. Neste trabalho, investigouse o balanço de oxigênio em lagoas de polimento experimentais operadas sob regime de bateladas sequenciais (0,4 m de profundidade e 1,5 m<sup>2</sup> de área superficial) com tempo de detenção hidráulica de 10 dias, alimentadas por efluente de reator UASB, sem inoculação inicial com microalgas. O sistema experimental foi instalado no município de Campina Grande, Paraíba, e operado no período de verão (radiação e temperatura elevadas). Os resultados obtidos mostraram que há o estabelecimento de um ambiente aeróbio nessas lagoas, sendo a produção de oxigênio dissolvido pela fotossíntese das microalgas suficiente para atender à demanda pelo consumo de oxigênio dissolvido para oxidação de matéria orgânica, respiração das microalgas e escape atmosférico por dessorção.

**Palavras-chave:** lagoa de polimento em bateladas sequenciais; microalgas; taxa de produção de oxigênio; taxa de consumo de oxigênio; trocas atmosféricas de oxigênio.

## ABSTRACT

Polishing ponds are post-treatment units for anaerobic effluents that act to remove residual organic matter as well as pathogens and nutrients. The intermittent operation of these lagoons favors the removal efficiency of these constituents. The oxygen balance was investigated in experimental polishing lagoons (0.4 m deep and 1.5 m<sup>2</sup> surface area), operated under sequential batch regime with HDT of 10 days, fed by UASB reactor effluent, without initial microalgae inoculation. The experimental system was installed in Campina Grande, Paraíba, and operated during the summer period (high levels of radiation and temperature). The results obtained showed that an aerobic environment was established in these lagoons, and the production of DO by the photosynthesis of microalgae is sufficient to meet the demand for DO consumption for oxidation of organic matter, respiration of microalgae, and atmospheric escape by desorption.

**Keywords:** sequential batch polishing ponds; microalgae; oxygen production rate; oxygen consumption rate; atmospheric oxygen exchanges.

## INTRODUÇÃO

A presença de lagoas de estabilização (anaeróbia, facultativa e/ou de maturação) ainda é realidade em muitos municípios do nordeste brasileiro, entretanto uma das desvantagens desses sistemas é a produção de um efluente final com concentrações praticamente inalteradas de nutrientes, além da elevada área superficial requerida para o tratamento (VAN HAANDEL; SANTOS, 2021a). Na busca de alternativas, no contexto de tecnologias naturais que visem minimizar os problemas associados aos sistemas clássicos de lagoas, destaca-se a combinação de reatores anaeróbios, como reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), e lagoas de polimento. O reator UASB tende a ter *performance* superior à das

lagoas anaeróbias e facultativas combinadas, sendo mais compacto e eficiente na remoção de material orgânico e sólidos suspensos, mas mantendo o baixo custo e simplicidade operacional (POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.*, 2014; VAN HAANDEL; SANTOS, 2021a). As lagoas de polimento, por sua vez, surgem como unidades de pós-tratamento do efluente anaeróbio, semelhantes às lagoas de maturação (em termos de configuração e dimensionamento), atuando na remoção de matéria orgânica residual, patógenos e nutrientes.

Convencionalmente, em escala real ou piloto, as lagoas de polimento são operadas em regime de fluxo contínuo (LPPC), porém pesquisas a níveis experimentais vêm mostrando que também é factível operar lagoas de polimento em

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Natal (RN), Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia - Manaus (AM), Brasil.

\*Autora correspondente: anaracheleng@gmail.com

**Conflitos de interesse:** os autores declaram não haver conflitos de interesse.

**Financiamento:** Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por meio do Projeto Universal, e pela Financiadora de Estudos e Projetos, por meio do Projeto Desenvolvimento de Soluções Tecnológicas a partir de Biogás Produzido em Sistema de Tratamento de Esgotos e Aterros Sanitários para Geração de EE.

**Recebido:** 25/02/2022 - **Aceito:** 17/09/2022 - **Reg. ABES:** 20220043

bateladas sequenciais (LPBS) após reatores UASB (CAVALCANTI, 2009; VAN HAANDEL; SANTOS, 2021a). Nessas condições, o fluxo de entrada/saída é nulo durante o ciclo de tratamento (METCALF; EDDY, 2016), e a lagoa comporta-se como um volume discreto de um reator de fluxo em pistão.

Quando se compara o desempenho do tratamento de lagoas de polimento entre os regimes de operação, estudos em pequena escala revelam que as LPBS se apresentam mais vantajosas que as lagoas em fluxo contínuo, conseguindo garantir qualidade sanitária em menor tempo de tratamento (BATISTA *et al.*, 2021), reduzindo os requisitos de área e a remoção praticamente total de nutrientes, nitrogênio e fósforo, e não apenas parcial (ALBUQUERQUE; SANTOS; VAN HAANDEL, 2021; SANTOS; SANTOS; VAN HAANDEL, 2021). Por outro lado, um dos inconvenientes das LPBS está relacionado ao fluxo do efluente, sendo geralmente requeridos unidade intermediária de transferência (transbordo) e equipamentos complementares para realizar o controle da alimentação e descarga do efluente nas lagoas (FRUTUOSO; SANTOS; VAN HAANDEL, 2021). Demais aspectos operacionais relacionados à aplicação em escala real desse tipo de lagoa são ainda incipientes na literatura, necessitando de investigação.

Nessas lagoas, as condições de reduzida carga orgânica afluyente, transparência do esgoto digerido e baixas profundidades permitem maior penetração da radiação solar, resultando no desenvolvimento da atividade fotossintética na coluna líquida e, conseqüentemente, no estabelecimento de um ambiente aeróbio com presença de microalgas (CAVALCANTI *et al.*, 2001) capaz de promover a oxidação do material orgânico. A reduzida produção de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por causa da baixa taxa de degradação da matéria orgânica, e o elevado consumo de  $\text{CO}_2$ , pelo processo de fotossíntese, afetam a acidez do meio e promovem a elevação do pH (ALVES; CAVALCANTI; VAN HAANDEL, 2011). Valores altos de pH favorecem a remoção de nutrientes, como o nitrogênio (dessorção da amônia) e o fósforo (precipitação de fosfatos), além de acelerar o decaimento bacteriano (VAN HAANDEL; SANTOS, 2021a).

É nítida a importância dos processos biológicos para o desempenho das lagoas de polimento. Dessa forma, aliando-se as características do efluente anaeróbio à alteração no fluxo da lagoa, de contínuo para intermitente, pode-se proporcionar um ambiente favorável à alta produtividade algal e à remoção de constituintes, em baixos tempo de detenção hidráulica (TDH). Sistemas semelhantes de tratamento com microalgas, como as lagoas de alta taxa (LAT), também foram desenvolvidos na busca de otimizar o tempo de tratamento e a produção fotossintética de oxigênio, só que mediante modificações na configuração física das lagoas convencionais (redução da profundidade, formato oval, sistema de pedais giratórios etc.) (ARBIB *et al.*, 2017). Apesar de eficientes na remoção de material orgânico e nutrientes, as LATs mantêm os problemas associados aos reatores de fluxo contínuo (dispersão no escoamento), bem como requerem tratamento complementar para adequação do efluente aos padrões de lançamento, de maneira especial relacionados aos patógenos e à elevada biomassa sedimentável (GARCÍA *et al.*, 2006).

Nesse ambiente aeróbio desenvolvido em sistemas com microalgas, as concentrações de oxigênio dissolvido sofrem flutuações diárias que variam em decorrência dos processos de fotossíntese, respiração e trocas atmosféricas do oxigênio (GROBBELAAR *et al.*, 1988). O balanço de oxigênio consiste basicamente em quantificar/mensurar as fontes de entrada e saída de oxigênio dissolvido (OD) e, assim, comparar a taxa de variação de OD na lagoa com as taxas dos processos que produzem ou consomem OD. Analisar o balanço do

oxigênio e as taxas envolvidas constitui uma ferramenta importante para acompanhar a operação e o desempenho das lagoas, uma vez que a produção deve:

- ser suficiente para atender ao consumo de OD utilizado na oxidação do material orgânico;
- contribuir para o aumento do pH, possibilitando a remoção de nutrientes.

Dessa forma, este estudo propôs-se a avaliar o balanço de OD em lagoas de polimento em bateladas sequenciais, determinando as taxas de absorção/dessorção, produção e consumo de oxigênio nessas unidades, a fim de contribuir para o melhor entendimento da operação e do desempenho de tratamento desse tipo de sistema.

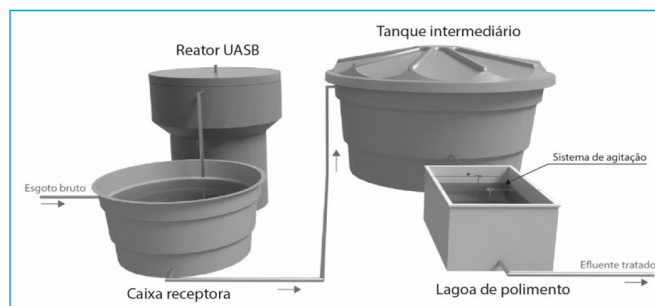
## METODOLOGIA

### Aparato experimental

A pesquisa foi desenvolvida na Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgotos Sanitários, no município de Campina Grande, Paraíba. O aparato experimental utilizado está apresentado na Figura 1. O reator UASB ( $V = 2,5 \text{ m}^3$ , TDH = 6 h e  $Q_{\text{max}} = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ), operado desde 2018, foi alimentado com esgoto municipal. Após o reator, o efluente anaeróbio era vertido em uma caixa receptora ( $1 \text{ m}^3$ ), de onde era bombeado para um tanque intermediário ( $5 \text{ m}^3$ ) para acumulação temporária (até 24 h) do efluente a fim de direcioná-lo, de uma única vez, à lagoa de polimento ( $H = 0,4 \text{ m}$ ,  $V = 0,6 \text{ m}^3$ ,  $As = 1,5 \text{ m}^2$ ), operada em bateladas sequenciais.

Após o enchimento completo da lagoa (às 9 h), deu-se início ao ciclo de tratamento, com TDH de 10 dias — tempo para atendimento dos parâmetros  $\text{NH}_3$ ,  $\text{DBO}_5$  e *Escherichia coli* aos padrões de Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 430/2011, Albuquerque, Santos e Van Haandel (2021), Aguiar, Santos e Van Haandel (2021) e Batista *et al.* (2021). Foram monitorados três ciclos de tratamento nos meses de janeiro a março de 2021 (estação do verão). Vale destacar que, no início de cada ciclo, a lagoa se encontrava vazia, sem volume residual e sem inoculação com microalgas.

Durante a operação, a massa líquida foi homogeneizada suavemente por meio de duas palhetas giratórias (espessura  $\times$  largura  $\times$  comprimento:  $0,03 \times 0,2 \times 0,8 \text{ m}$ ) posicionadas em alturas diferentes da lagoa (superfície e porção intermediária) e acionadas, cada uma, por um pequeno motor (3 W, 5/6 rpm). A mistura buscou uniformizar o conteúdo da fase líquida no interior da lagoa e evitar acúmulo de microalgas na superfície a fim de minimizar possíveis interferências nas leituras de OD e obter dados mais confiáveis para a determinação das taxas.



**Figura 1** – Leiaute do aparato experimental: reator UASB, caixa receptora, tanque intermediário e lagoa polimento.

No início de cada ciclo, foi feita a caracterização físico-química do afluente à lagoa, incluindo os parâmetros: DBO<sub>5,20</sub>, demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio amoniacal, fósforo total, sólidos suspensos volúveis (SSV) e sólidos suspensos totais (SST), alcalinidade total e clorofila *a*, conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017).

### Determinação das taxas de produção, consumo e transferência atmosférica

As taxas envolvidas na variação de OD na lagoa de polimento foram determinadas pelo método da variação diária de oxigênio (*diel oxygen technique*), proposto por (ODUM, 1956), o qual considera que as variações de OD na massa líquida são decorrentes da diferença entre a produção fotossintética e o consumo pela respiração e do equilíbrio físico pelas trocas atmosféricas de oxigênio na interface ar-água (Equação 1).

$$\frac{dO_2}{dt} = TPO - TCO \pm TTO \quad (1)$$

Em que:

$\frac{dO_2}{dt}$ : variação na concentração de OD ao longo do tempo;

TPO: produção de OD;

TCO: taxa de consumo de OD;

TTO: taxa de transferência de oxigênio ar-água (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>).

### Taxa de transferência de oxigênio

A taxa de transferência de OD (TTO) foi estimada pela Equação 2, baseada na lei de Fick para difusão (METCALF; EDDY, 2016). Tem-se que a taxa de transferência de OD é proporcional ao seu déficit (diferença entre a concentração de OD e sua concentração de saturação):

$$TTO = k_L(OD_s - OD_L) \quad (2)$$

Em que:

TTO: taxa de transferência de oxigênio pela interface ar-água (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>);

OD<sub>L</sub>: concentração de oxigênio na fase líquida (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>);

OD<sub>s</sub>: concentração de saturação de oxigênio (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>);

k<sub>L</sub>: coeficiente de transferência de massa de oxigênio na interface ar-água (h<sup>-1</sup>).

O coeficiente de transferência (k<sub>L</sub>) foi estimado com base em Morais, Santos e Van Haandel (2021) em LPBS experimentais, em Campina Grande (Equação 3).

$$k_L = \frac{0,382 \cdot 1,001^{(T-20)}}{H \cdot (t)} \quad (3)$$

Em que:

k<sub>L</sub>: coeficiente de transferência de massa de oxigênio na interface ar-água (h<sup>-1</sup>),

T: temperatura (°C);

H: altura da coluna de água da LPBS (m);

t: tempo (horas).

### Taxa de consumo de oxigênio

A determinação da taxa de consumo de oxigênio (TCO) foi feita pelo método do oxigênio (*light and dark bottles method*) (TEIXEIRA, 1973; APHA; AWWA; WEF, 2017) e ocorreu da seguinte forma: diariamente era retirada uma amostra do efluente (300 mL, em duplicata), media-se a concentração de OD na amostra

e, em seguida, esta era inserida em um frasco escuro e hermeticamente fechado (ausência de radiação e de trocas gasosas). O frasco era imerso na lagoa (10 cm de superfície), fixado com o auxílio de um suporte, pelo tempo de incubação de 24 h. Após esse período, media-se a concentração final de OD no frasco. Assim, a taxa diária de consumo de oxigênio pôde ser calculada pela Equação 4, sendo considerada constante durante o período de incubação (STAEHR *et al.*, 2010). Esse procedimento foi repetido diariamente até o fim da batelada.

$$TCO = \frac{OD_i - OD_f}{t} \quad (4)$$

Em que:

TCO: taxa de consumo de OD (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>);

OD<sub>i</sub>: concentração de OD antes da incubação (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>);

OD<sub>f</sub>: concentração de OD após a incubação (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>);

t: período de incubação (horas).

### Taxa de produção de oxigênio

A taxa de produção diária de oxigênio (TPO) pôde ser estimada pela Equação 5. TCO e TTO foram anteriormente determinadas, e a variação de oxigênio em função do tempo (dO<sub>2</sub>/dt) foi obtida por medições *in loco* na lagoa, com o multiparâmetro Hanna (modelo HI-98196).

$$TPO = \frac{dO_2}{dt} - TCO \pm TTO \quad (5)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Condições climáticas do experimento

Os experimentos foram realizados no período de verão no município de Campina Grande, sendo observadas intensidades de radiação solar e temperaturas elevadas, com valores médios de 835,5 W.m<sup>-2</sup> (às 12 h) e 25,2°C (Figura 2A), e baixa ocorrência de chuvas, com precipitações nulas ou menores que 5 mm na maior parte dos dias (Figura 2B). As condições analisadas não sofreram variações consideráveis entre os ciclos monitorados.

### Condições ambientais na lagoa

O afluente apresentou características típicas de esgoto pré-tratado anaerobicamente, com pH próximo à neutralidade (7,6 ± 0,2), baixos teores de material orgânico (DQO<sub>bruta</sub> = 169 ± 16 mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> e DBO<sub>5,20</sub> = 68 ± 8 mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>) e concentrações de sólidos suspensos de 85 mg.SST.L<sup>-1</sup> e 58 ± 20 mg.SSV.L<sup>-1</sup>. As concentrações dos nutrientes estiveram em torno de 55,6 ± 8 mgN-NH<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup> e 6,9 ± 1,3 mgP.L<sup>-1</sup>, resultando na relação N:P de 8:1, na faixa propícia para o crescimento da biomassa microalgal (N:P = 5:1 a 30:1) (CHOI; LEE, 2015).

Os valores de temperatura, OD e pH médios na massa líquida ao longo dos ciclos de tratamento estão apresentados na Figura 3.

A temperatura do líquido variou entre 25 e 32°C, sofrendo flutuações diárias que acompanharam as variações de radiação solar e temperatura do ar (Figura 2). Apesar das oscilações, os valores mantiveram-se na faixa ótima para o desenvolvimento de microalgas, que se estende de 20 a 35°C (ACIÉN *et al.*, 2017).

Em relação aos perfis do OD e pH, foi possível verificar oscilações cíclicas ao longo das 24 h, com picos crescentes ao longo do tempo de tratamento. Esse comportamento é indicativo do estabelecimento de uma comunidade biológica

bastante ativa, evidenciada pelo incremento nas concentrações de clorofila *a* na lagoa (Figura 4).

Ainda pela Figura 3, nos primeiros dias do tratamento, observa-se que o OD foi praticamente nulo ( $< 1 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ ), indicando a ausência de ou baixa atividade fotossintética nesse período, uma vez que a alimentação da lagoa foi realizada com efluente de reator UASB, sem inóculo ou volume residual. Nos dias subsequentes, condições aeróbias estabeleceram-se, prevalecendo até o fim dos 10 dias. Os valores de OD registrados permaneceram próximos ou acima da saturação durante as horas de radiação, com concentrações médias (picos) que chegaram a  $25 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  no período da tarde.

O comportamento cíclico do oxigênio dissolvido e as concentrações transientes de supersaturação na massa líquida, com picos de OD que se aproximam de  $40 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ , são comumente relatados em sistemas de lagoas (EL OUARGHI *et al.*, 2000; MENDOZA *et al.*, 2013; ARBIB *et al.*, 2017; PASSOS *et al.*, 2019). Essa condição é resultado da intensa produção de oxigênio fotossintético pelas microalgas, principalmente nas horas centrais do dia (ARBIB *et al.*, 2017), que resultam em taxas de produção superiores aos processos de consumo e de transferência de OD para a atmosfera (EL OUARGHI *et al.*, 2000).

O pH (Figura 3), também governado pela atividade das microalgas (ABDEL-RAOUF; AL-HOMAIDAN; IBRAHEEM, 2012), aumentou no decorrer do tratamento, atingindo o máximo de 9,56 (às 16 h, ciclo 1), ao final dos 10 dias. Valores ainda maiores de pH (entre 10 e 11) podem ser atingidos em LPBS, a depender do tempo de ciclo, da configuração da lagoa e da sazonalidade, porém são dificilmente encontrados em lagoas convencionais, que geralmente são neutros ou levemente alcalinos (KAYOMBO *et al.*, 2000; DIAS *et al.*, 2014; PASSOS *et al.*, 2019). Valores elevados desse parâmetro, apesar de poder ser prejudicial a certos tipos de microalga, contribuindo para reduzir a produtividade na lagoa (SÁNCHEZ *et al.*, 2008), tornam-se benéficos à remoção de constituintes do efluente, incluindo os patógenos (BOLTON *et al.*, 2010) e os nutrientes, como o nitrogênio (pH a partir de 8,5 e 9), por dessorção da amônia, e o fósforo (pH a partir de 9,5 a 9,7), por precipitação de fosfatos (VAN HAANDEL; SANTOS, 2021b).

### Transferência de oxigênio com a atmosfera

Os valores do coeficiente de transferência ( $k_L$ ), calculados em função da temperatura e da profundidade (constante,  $H = 0,4 \text{ m}$ ), não sofreram variações consideráveis, ficando em torno de  $0,04 \text{ h}^{-1}$ . Dessa forma, as taxas de transferência

oscilaram, especialmente, em consonância com as flutuações OD na lagoa, como pode ser observado na Figura 5. Vale destacar que as trocas de oxigênio na interface ar-água, mesmo sob condições de supersaturação (até  $35 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ ), obedecem à Lei de Fick da difusão (MORAIS; SANTOS; VAN HAANDEL, 2021).

Nos três primeiros dias de batelada, as TTO foram positivas (transferência de OD da atmosfera para a LPBS) por causa das baixas concentrações de OD na massa líquida ( $0 \text{ e } 1 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ ), mantendo-se próximas ao valor de  $0,28 \pm 0,02 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Nos demais dias de tratamento, as trocas atmosféricas oscilaram de acordo com as concentrações de OD na lagoa, sendo o processo de dessorção predominante, apresentando taxa

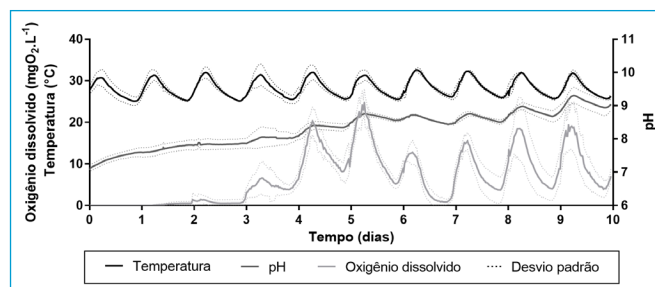


Figura 3 - Perfil médio de oxigênio dissolvido, pH e temperatura na lagoa de polimento.

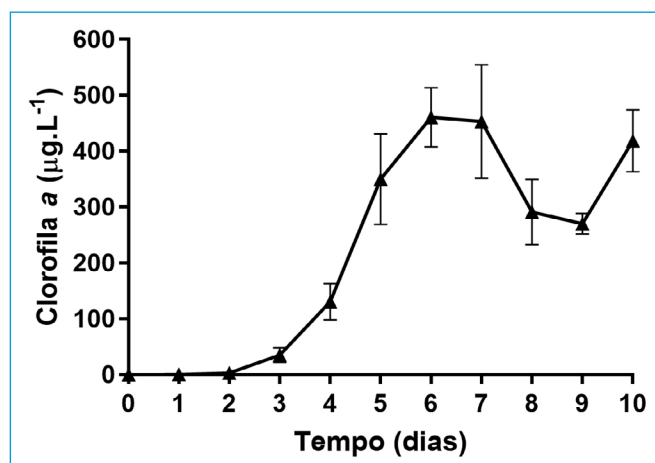
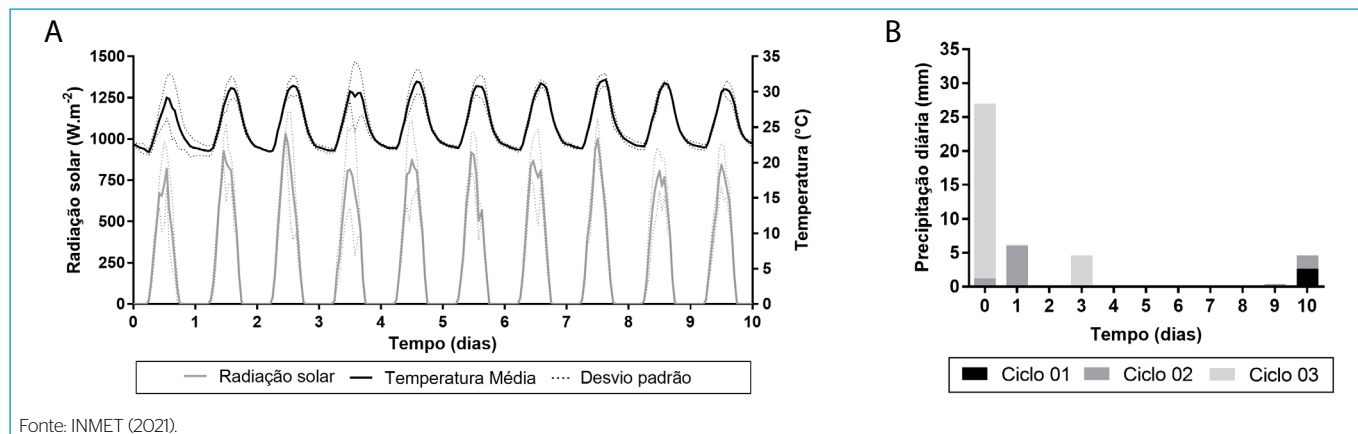


Figura 4 - Perfil médio da clorofila a às 9 h na lagoa.



Fonte: INMET (2021).

Figura 2 - (A) Dados de radiação solar e temperatura médios e (B) precipitação diária ao longo dos dias de experimento para os três ciclos de tratamento.

média nesse período de  $-0,24 \pm 0,17 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  e chegando a atingir  $-0,66 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Os valores das TTO obtidos neste estudo foram superiores quando comparados aos de Cavalcanti (2009), cuja taxa máxima de absorção horária alcançada na lagoa de polimento experimental operada em batelada sequencial ( $H = 0,4 \text{ m}$  e  $As = 0,0875 \text{ m}^2$ ) foi de  $0,026 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  (considerando  $25^\circ\text{C}$ ,  $OD_5 = 7,75 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $OD_1 = 0 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $k_L$  de  $0,0034 \text{ h}^{-1}$ ), tida como insignificante diante das taxas biológicas de consumo e fotossíntese calculadas pela autora. Por outro lado, quando se comparam os resultados desta pesquisa com trabalhos da literatura para outros tipos de lagoa, em sua maioria referentes a lagoas de alta taxa, viu-se que os valores das taxas de absorção e desorção ( $-5,13$  a  $5,74 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) e do  $k_L$  ( $0,4$  a  $0,76 \text{ h}^{-1}$ ) encontrados nos demais estudos são maiores (EL OUARGHI *et al.*, 2000; ARBIB *et al.*, 2017). Essa diferença entre as TTO pode estar relacionada à operação inerente ao sistema de lagoas de alta taxa, cujo fluxo é contínuo e com presença de pás giratórias, o que aumenta a turbulência no líquido, proporcionando maiores trocas atmosféricas (MENDOZA *et al.*, 2013). Além disso, métodos diferentes de quantificação do coeficiente  $k_L$ , condições climáticas, concentração de OD, localidade e características da lagoa também interferem diretamente na determinação das taxas (CHATURVEDI *et al.*, 2014; ARBIB *et al.*, 2017).

## Consumo e produção de oxigênio

A Figura 6 apresenta os resultados das taxas de consumo e produção de oxigênio médias ao longo do tempo na lagoa. Nos dias iniciais, as taxas de consumo foram assumidas como iguais às taxas de absorção, uma vez que as concentrações de OD eram próximas a 0, o que impossibilitava a leitura do consumo pelo método do oxigênio. Nos dias subsequentes, utilizou-se o referido

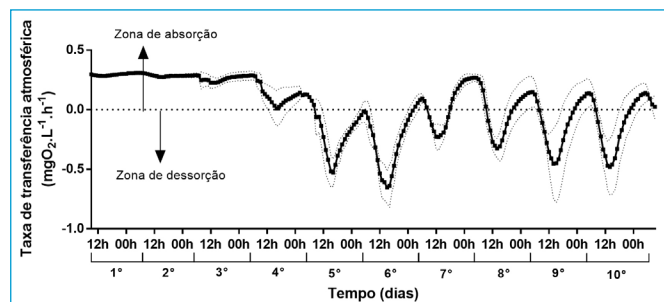
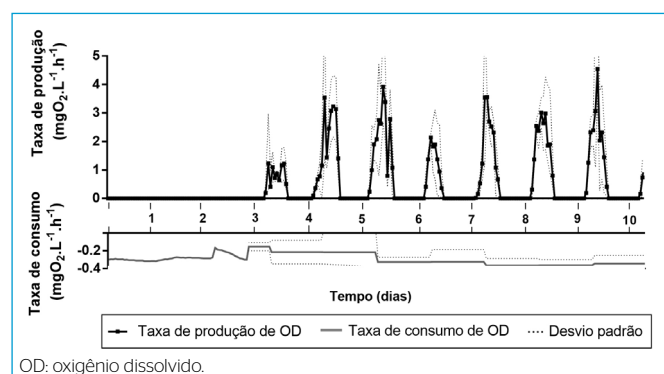


Figura 5 - Taxas de transferência atmosférica de  $\text{O}_2$  na lagoa de polimento.



OD: oxigênio dissolvido.

Figura 6 - Taxas de consumo e produção de oxigênio na lagoa de polimento.

método para estimar as taxas de consumo diárias, sendo estas consideradas constantes nas 24 h de incubação dos frascos.

Pela Figura 6, é possível observar que o consumo atingiu a taxa mínima no quarto dia de batelada ( $-0,19 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ), elevando-se no decorrer dos dias em conformidade com o desenvolvimento das microalgas, alcançando a TCO máxima de  $-0,36 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . Esse aumento na taxa de consumo pode indicar que ao longo do tempo o consumo de OD por causa da respiração das microalgas se torna superior à demanda pela oxidação do material orgânico. De fato, estudos em lagoas de polimento, sejam em fluxo contínuo, sejam intermitentes, mostram que essas unidades propiciam redução inicial do material orgânico, entretanto, ao longo do ciclo de tratamento ou da série de lagoas, ocorre acréscimo dos valores da  $\text{DBO}_5$  e  $\text{DQO}$ , justificado pela intensa produção de algas durante do tratamento (DIAS *et al.*, 2014; POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.*, 2014; AGUIAR; SANTOS; VAN HAANDEL, 2021). Resultados de Barreiro-Vescovo, González-Fernández e Ballesteros (2020), ao estudar a atividade consorciada alga-bactéria em esgoto doméstico, ressaltam o papel considerável da respiração endógena das microalgas no consumo do OD em períodos sem iluminação.

Com base nas taxas de troca atmosférica e de consumo determinadas anteriormente, bem como nas concentrações de OD medidas com o auxílio da sonda, foi possível estimar as taxas de produção de oxigênio na lagoa (Figura 6). Verifica-se que a produção de OD apresentou oscilações ao longo das 24 h, atingindo valor médio de  $2,24 \pm 0,64 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  e o valor máximo de  $6,1 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  registrado próximo ao meio-dia (ciclo 1). Os resultados das TPO estão em consonância com estudos da literatura em LPBS, com valores médios horários reportados de  $2,1 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  (CAVALCANTI, 2009). A taxa máxima de produção obtida também está na faixa de valores máximos relatados por Arbib *et al.* (2017) em lagoas de alta taxa, que foram de  $4,82 \pm 0,1$  e  $9,55 \pm 1,6 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  no inverno e no verão, respectivamente.

Ao analisar os dados de produção de OD distribuídos ao longo de 24 h (Figura 7), vê-se que os processos de fotossíntese geralmente têm início às 6 h e perduram até o fim da tarde, sendo as maiores taxas estimadas nas horas centrais do dia. À noite, as taxas foram nulas. Vale destacar ainda que as flutuações diárias de produção de OD estiveram em consonância com os níveis de radiação solar atuantes na lagoa durante os ciclos de tratamento, conforme reportado em trabalhos da literatura (ARBIB *et al.*, 2017; BARREIRO-VESCOVO; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ; BALLESTEROS, 2020).

A produção diária variou entre  $4,3$  e  $27,2 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  ao longo dos dias dos ciclos de tratamento (com média de  $17,51 \pm 6,31 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ). O resultado médio está em consonância com demais valores encontrados em LPBS ( $18,7$  a  $19,3 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) (CAVALCANTI; VAN HAANDEL; LETTINGA, 2002; CAVALCANTI, 2009). Com base na produção média diária, estimou-se TPO de  $29,2 \text{ gO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  por volume de lagoa.

Esses dados mostram que a lagoa em estudo é uma unidade de pós-tratamento capaz de tratar efluente com carga orgânica ainda mais elevada ( $\text{DQO}$  afluente média =  $169 \pm 16 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $68 \pm 8 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ). Essa constatação é corroborada por Aguiar, Santos e Van Haandel (2021), que, ao avaliar o limite de viabilidade de material orgânico em LPBS em pequena escala ( $As = 0,20 \text{ m}^2$ ;  $\text{TDH} = 4$  dias) e diferentes profundidades ( $0,2, 0,4, 0,6$  e  $1 \text{ m}$ ), mostrou que, apesar de a concentração inicial de material orgânico ( $\text{DBO}_{5,20} = 50$  a  $350 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ) ter influência sobre a evolução do OD na lagoa, ainda assim foi observado o estabelecimento de um ambiente aeróbio nas lagoas investigadas, mesmo nas concentrações afluentes de  $\text{DBO}_{5,20}$  mais altas.

### Balanco de oxigênio dissolvido

Ao avaliar o peso de cada processo no balanço de OD do sistema (Figura 8), nota-se que a fotossíntese teve papel fundamental no fornecimento de OD na LPBS, necessário para o processo de oxidação da matéria orgânica, bem como de respiração das microalgas. Constatou-se também que, apesar de a transferência atmosférica assumir papel de aporte e escape de OD, esse processo majoritariamente representa uma rota de fuga de OD.

Ao final do tratamento, verifica-se que as microalgas foram essenciais na produção de oxigênio; 42,7% do total produzido foi utilizado para o consumo na lagoa, e o restante (14,7%), perdido para a atmosfera ou (42,6%) permaneceu no efluente. Esses resultados apontam que a oxigenação via fotossíntese algal é suficiente para manter um ambiente aeróbio na lagoa ao longo das 24 h (mesmo à noite), apesar das perdas existentes. A importância do abastecimento de oxigênio pelas microalgas também foi ressaltada por El Ouarghi *et al.* (2000) em lagoas de alta taxa, indicando que o aporte de OD não só foi suficiente como também excedeu a demanda total da lagoa em mais de 15%, entretanto sistemas com elevada biomassa algal, como as LATs, podem exibir alto consumo

de OD à noite, resultando em períodos anóxicos indesejados, conforme apontado pelos referidos autores.

Essa condição aeróbia é desejada em sistemas de tratamento por microalgas por causa da importância na remoção de constituintes. Os elevados teores de oxigênio produzidos pela biomassa algal ( $TPO_{média} = 17,51 \pm 6,31 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) são essenciais para oxidação do material orgânico afluente à lagoa, promovendo a remoção do residual orgânico, com o consequente atendimento da qualidade desejada para lançamento em corpos d'água (AGUIAR; SANTOS; VAN HAANDEL, 2021). Além disso, a intensa atividade fotossintética das microalgas na lagoa favoreceu a elevação do pH do meio (para valores em torno de 9,5) ao longo dos 10 dias de tratamento, mostrando a factibilidade desse tipo de lagoa (LPBS) em remover também os nutrientes do meio, como o nitrogênio, por dessorção da amônia, e o fósforo, por precipitação de fosfatos, quando os valores de pH estão elevados (VAN HAANDEL; SANTOS, 2021b).

As lagoas de polimento com alimentação intermitente mostram-se, portanto, unidades interessantes, por promover a oxigenação no tratamento de efluentes e a elevação do pH do líquido por meio dos processos biológicos

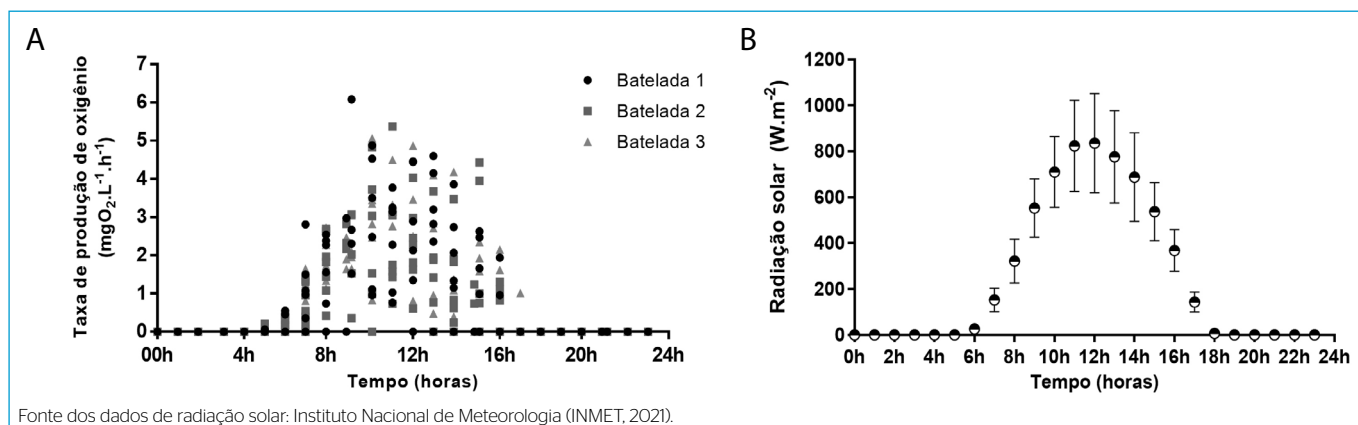


Figura 7 - Distribuição das taxas horárias de (A) produção de oxigênio e (B) radiação solar média ao longo de 24 h.

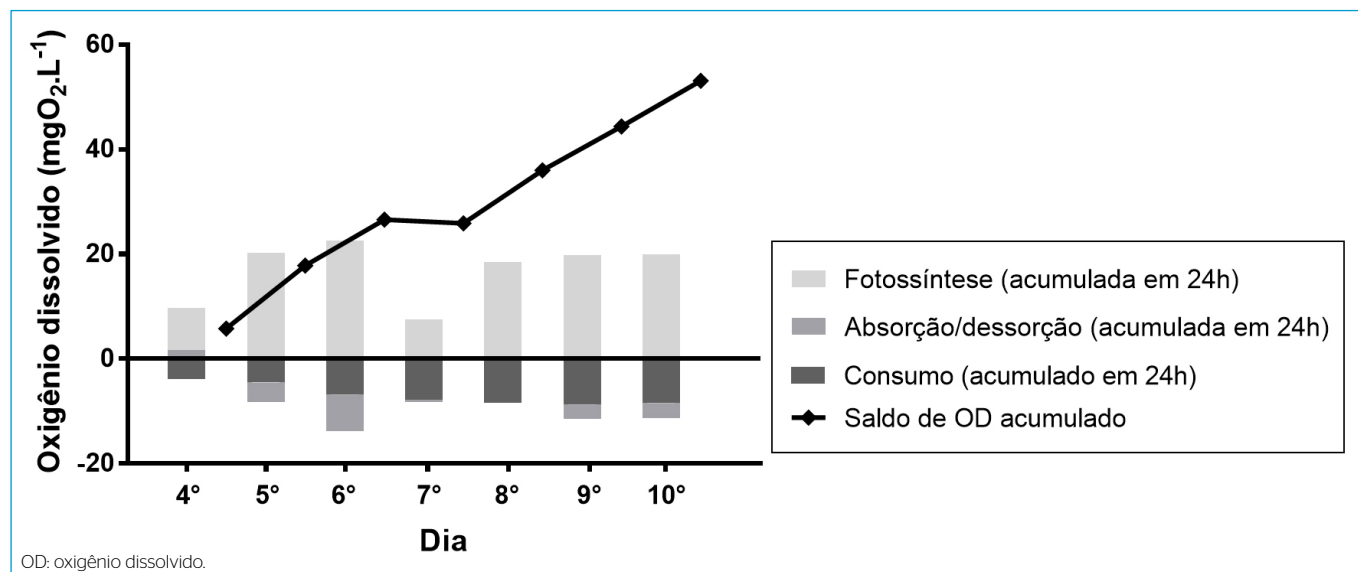


Figura 8 - Balanço médio diário de oxigênio dissolvido nas lagoas de polimento em bateladas sequenciais.

e naturais realizados pelas microalgas. Dessa forma, a LPBS constitui uma alternativa eficiente, diante das convencionais lagoas de estabilização (VAN HAANDEL; SANTOS, 2021a), e de baixo requisito de área de tratamento, mesmo quando comparadas às lagoas de polimento em fluxo contínuo (ALBUQUERQUE; SANTOS; VAN HAANDEL, 2021). Além disso, as condições ambientais estabelecidas, especialmente de concentrações de oxigênio, assemelham-se às das lagoas de alta taxa (ARBIB *et al.*, 2017), com a vantagem de não apresentar períodos anóxicos à noite (EL OUARGHI *et al.*, 2000). Assim, como os demais processos com presença de microalgas, as LPBS são uma alternativa de baixo custo e sustentável, com possibilidade de produção de OD por meio da energia solar.

## CONCLUSÕES

O estudo do balanço de OD nesta pesquisa forneceu informações necessárias para o melhor entendimento da atividade biológica (fotossíntese e respiração) e das trocas atmosféricas que ocorrem em LPBS. Ficou nitido que a fotossíntese é o processo propulsor, sendo o maior responsável para a garantia de um ambiente predominantemente aeróbio na lagoa, com taxas de produção média de  $2,24 \pm 0,64 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . Do total de OD produzido no tratamento, apenas

42,7% foi utilizado pela demanda biológica, com taxas que variaram de -0,19 a  $-0,36 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . As trocas atmosféricas, por sua vez, representaram majoritariamente uma rota de fuga de OD (14,7% do total produzido foi perdido para a atmosfera), com taxa de dessorção média de  $-0,24 \pm 0,17 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . O OD restante (42,6%) permaneceu no meio.

Assim, pode-se concluir que as LPBS constituem uma alternativa simplificada, sustentável e eficiente para o pós-tratamento do efluente de reatores UASB, sendo possível estabelecer um ambiente com presença de OD, em concentração suficiente para exceder a demanda proveniente do processo de oxidação bacteriana e respiração das microalgas, bem como de elevado pH, com possibilidade de remoção de nutrientes do meio.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Nascimento, A.R.M.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Batista, M.M.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Santos, S.L.: Conceituação, Administração do Projeto, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita — Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMAIDAN, A.A.; IBRAHEEM, I.B.M. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 19, n. 3, p. 257-275, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- ACIÉN, F.G.; MOLINA, E.; REIS, A.; TORZILLO, G.; ZITTELLI, G.C.; SEPÚLVEDA, C.; MASOJÍDEK, J. Photobioreactors for the production of microalgae. *Microalgae-Based biofuels and bioproducts: from feedstock cultivation to end-products*, p. 1-44, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00001-7>
- AGUIAR, R.L.M.; SANTOS, S.L.; VAN HAANDEL, A. Lagoas de polimento operando em bateladas como pós-tratamento de reatores UASB: remoção de material orgânico. *Revista DAE*, v. 69, n. 229, p. 70-79, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.020>
- ALBUQUERQUE, M.S.; SANTOS, S.L.; VAN HAANDEL, A. Influência do regime hidrodinâmico sobre o desempenho de lagoas de polimento. *Revista DAE*, v. 69, n. 229, p. 25-38, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.017>
- ALVES, E.M.; CAVALCANTI, P.F.F.; VAN HAANDEL, A. Desorption rate of volatile compounds in polishing ponds. *Water Science and Technology*, v. 63, n. 6, p. 1177-1182, 2011. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.104>
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, DC.: APHA; AWWA; WEF, 2017.
- ARBIB, Z.; CRESPO, I.G.; CORONA, E.L.; ROGALLA, F. Understanding the biological activity of high rate algae ponds through the calculation of oxygen balances. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 101, n. 12, p. 5189-5198, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8235-3>
- BARREIRO-VESCOVO, S.; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C.; BALLESTEROS, M. Activity determination of an algal-bacterial consortium developed during wastewater treatment based on oxygen evolution. *Journal of Water Process Engineering*, v. 36, 101278, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101278>
- BATISTA, M.M.; LAMBAIS, G.R.; SANTOS, S.L.; VAN HAANDEL, A. Decaimento bacteriano em lagoas de polimento tratando efluentes de reator UASB. *Revista DAE*, v. 69, n. 229, p. 80-90, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.021>
- BOLTON, N.F.; CROMAR, N.J.; HALLSWORTH, P.; FALLOWFIELD, H.J. A review of the factors affecting sunlight inactivation of micro-organisms in waste stabilisation ponds: Preliminary results for enterococci. *Water Science and Technology*, v. 61, n. 4, p. 885-890, 2010. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.958>
- CAVALCANTI, P.F.F. *Aplicação de reatores UASB e lagoas de polimento no tratamento de esgoto doméstico*. João Pessoa: Gráfica Santa Marta, 2009. 172 p.
- CAVALCANTI, P.F.F.; VAN HAANDEL, A.; KATO, M.T.; VON SPERLING, M.; LUDUVICE, M.L.; MONTEGGIA, L.O. Pós-tratamento de efluentes anaeróbios por lagoas de polimento. In: CHERNICHARO, C.A. de L. (org.). *Pós-tratamento de efluente de reatores anaeróbios*. Belo Horizonte: Projeto PROSAB, 2001.
- CAVALCANTI, P.F.F.; VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. Effect of carbon dioxide and ammonium removal on pH changes in polishing ponds. *Water Science and Technology*, v. 45, n. 10, p. 377-382, 2002. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0372>
- CHATURVEDI, M.K.M.; LANGOTE, S.D.; KUMAR, D.; ASOLEKAR, S.R. Significance and estimation of oxygen mass transfer coefficient in

simulated waste stabilization pond. *Ecological Engineering*, v. 73, p. 331-334, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.039>

CHOI, H.J.; LEE, S.M. Effect of the N/P ratio on biomass productivity and nutrient removal from municipal wastewater. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 38, p. 761-766, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00449-014-1317-z>

DIAS, D.F.C.; POSSMOSER-NASCIMENTO, T.E.; RODRIGUES, V.A.J.; VON SPERLING, M. Overall performance evaluation of shallow maturation ponds in series treating UASB reactor effluent: Ten years of intensive monitoring of a system in Brazil. *Ecological Engineering*, v. 71, p. 206-214, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.044>

EL OUARGHI, H.; BOUMANSOUR, B.E.; DUFAYT, O.; EL HAMOURI, B.; VASEL, J.L. Hydrodynamics and oxygen balance in a high-rate algal pond. *Water Science and Technology*, v. 42, n. 10-11, p. 349-356, 2000. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0678>

FRUTUOSO, F.K.A.; SANTOS, S.L.; VAN HAANDEL, A. Lagoas de transbordo aplicadas para o melhoramento de efluentes anaeróbios destinados a lagoas de polimento. *Revista DAE*, v. 69, n. 229, p. 115-131, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.024>

GARCÍA, J.; GREEN, B.F.; LUNDQUIST, T.; MUJERIEGO, R.; HERNÁNDEZ-MARINÉ, M.; OSWALD, W.J. Long term diurnal variations in contaminant removal in high rate ponds treating urban wastewater. *Bioresource Technology*, v. 97, n. 14, p. 1709-1715, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.07.019>

GROBBELAAR, J.U.; SOEDER, C.J.; GROENEWEG, J.; STENGEL, E.; HARTIG, P. Rates of biogenic oxygen production in mass cultures of microalgae, absorption of atmospheric oxygen and oxygen availability for wastewater treatment. *Water Research*, v. 22, n. 11, p. 1459-1464, 1988. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(88\)90105-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(88)90105-4)

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Dados meteorológicos*. Brasil: INMET, 2021.

KAYOMBO, S.; MBWETTE, T.S.A.; MAYO, A.W.; KATIMA, J.H.Y.; JORGENSEN, S.E. Modelling diurnal variation of dissolved oxygen in waste stabilization ponds. *Ecological Modelling*, v. 127, n. 1, p. 21-31, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00196-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00196-9)

MENDOZA, J.L.; GRANADOS, M.R.; GODOS, I.; ACIÉN, F.G.; MOLINA, E.; HEAVEN, S.; BANKS, C.J. Oxygen transfer and evolution in microalgal culture in open raceways. *Bioresource Technology*, v. 137, p. 188-195, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.127>

METCALF, L.; EDDY, H. P. *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MORAIS, C.E.P.; SANTOS, S.L.; VAN HAANDEL, A. Determinação de constantes de transferência de compostos voláteis em lagoas de tratamento de esgoto. *Revista DAE*, v. 69, n. 229, p. 39-51, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.018>

ODUM, H.T. Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography*, v. 1, n. 2, p. 102-117, 1956. <https://doi.org/10.4319/lo.1956.1.2.0102>

PASSOS, R.G.; DIAS, D.F.C.; RODRIGUES, V.A.J.; VON SPERLING, M. Stratification and equalization cycles in shallow maturation ponds with different operational configurations and at different periods of the year. *Water Practice and Technology*, v. 14, n. 3, p. 682-694, 2019. <https://doi.org/10.2166/wpt.2019.054>

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. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.224>

SÁNCHEZ, J.F.; FERNÁNDEZ, J.M.; ACIÉN, F.G.; RUEDA, A.; PÉREZ-PARRA, J.; MOLINA, E. Influence of culture conditions on the productivity and lutein content of the new strain *Scenedesmus almeriensis*. *Process Biochemistry*, v. 43, n. 4, p. 398-405, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.01.004>

SANTOS, IV.; SANTOS, S.L.; VAN HAANDEL, A. Remoção de fósforo em lagoas de polimento operadas em regime de bateladas sequenciais. *Revista DAE*, v. 69, n. 229, p. 91-103, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.022>

STAEHR, P.A.; BADE, D.; VAN DE BOGERT, M.C.; KOCH, G.R.; WILLIAMSON, C.; HANSON, P.; COLE, J.J.; KRATZ, T. Lake metabolism and the diel oxygen technique: state of the science. *Limnology and Oceanography: Methods*, v. 8, n. 11, p. 628-644, 2010. <https://doi.org/10.4319/lom.2010.8.0628>

TEIXEIRA, C. Introdução aos métodos para medir a produção primária do fitoplâncton. *Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo*, v. 22, p. 59-92, 1973. <https://doi.org/10.1590/S0373-55241973000100004>

VAN HAANDEL, A.; SANTOS, S.L. Transformação de lagoas de estabilização: reengenharia de um sistema obsoleto de tratamento de águas residuárias. *Revista DAE*, v. 69, n. 229, p. 6-24, 2021a. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.016>

VAN HAANDEL, A.; SANTOS, S.L. Variação do pH e remoção de nitrogênio em lagoas de polimento. *Revista DAE*, v. 69, n. 229, p. 52-69, 2021b. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.019>

