

---

## Microalgas como agentes de biorremediação ambiental

Dhyogo Mileo Taher, Beatriz Jacob-Furlan, Valeria Cristina Pereira Antezana, Laura Sebben Galarce, Rafael Xisto Vieira Filho, José Viriato Coelho Vargas, André Bellin Mariano

<https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1.c6>

### Resumo

Com grande capacidade de biorremediação ambiental, as microalgas são excelentes aliadas para um futuro verde mais sustentável. Microorganismos unicelulares de alta capacidade de reprodução, as microalgas alimentam-se de fontes de nitratos, sulfatos, fosfatos e carbonatos. Da mesma forma, apresentam habilidade de serem agentes fixadoras de gases poluentes, tais como NO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub> e até SO<sub>x</sub>. O objetivo desse capítulo é contextualizar a tecnologia de cultivo de microalgas à capacidade de biorremediação que esses microrganismos podem apresentar expostas a diferentes tipos de resíduos.

**Palavras-chave:** biorremediação, efluentes animais, microalgas, meio ambiente, sustentabilidade.

### 1. Introdução

No final do século XX as microalgas passaram a ser muito estudadas, devido a difusão do termo sustentabilidade, visto que os recursos naturais são esgotáveis e finitos, e para isso, era necessário procurar meios renováveis e amigáveis ao ambiente para produção de bioprodutos, bioenergia e até mesmo biorremediação ambiental (CONTANZA, 1994). Sendo assim, a comunidade científica se dedicou fielmente em desenvolver pesquisas a respeito das microalgas, desde a produção de biocombustíveis, extração de biomassa e biopolímeros e produção de hidrogênio (TAHER, 2013).

Microrganismos de fácil reprodução, as microalgas são unicelulares e ganham considerável destaque no universo científico (FURLAN et. al., 2020). Elas possuem propriedades biológicas heterotróficas e autotróficas, sendo

cultivadas em ambientes abertos ou reatores fechados, com regime alimentar à base de compostos orgânicos. Elas são as responsáveis pela maior parte da produção de oxigênio mundial, presentes em oceanos e lagos e lagoas naturais ao redor do mundo (LEHMUSKERO, 2018).

Contudo, apresentam uma certa delicadeza em seus cultivos, e quando muito expostas podem ser contaminadas (ANTEZANA, *et al.*, 2020). Partindo desse pressuposto, e sabendo que as microalgas possuem um potencial explorado em biorremediação ambiental, um novo leque de possibilidades científicas se abre com relação ao tratamento de efluentes.

O objetivo desse capítulo é apresentar as microalgas como potenciais agentes biorremediadores de variados resíduos gerados, como gases e efluentes, e o estado da arte dessa tecnologia.

## **2. Microalgas como agentes biorremediadores de gases**

As microalgas possuem a característica de fixar o CO<sub>2</sub> e mitigar as emissões de gases responsáveis pelo aquecimento global (Zhao *et al.*, 2015) e sua utilização para esse fim é considerada renovável, sustentável e ambientalmente adequada (RINGSMUTH, LANDSBERG e HANKAMER, 2016).

A capacidade de fixação do CO<sub>2</sub> pelas microalgas fez com que fossem propostos modelos de tratamento de remoção desse gás da fumaça de exaustão de usinas termelétricas, bem como a diminuição de gases estufa (HELWANI *et al.*, 2012). As microalgas apresentam um bom potencial de crescimento em concentrações de CO<sub>2</sub> na faixa de 10% a 20%, seja proveniente de fontes puras (ONO e CUELLO, 2003, JIANG *et al.*, 2013) ou de gases de exaustão industrial (HAMASAKI *et al.*, 1996; BROWN, 1996; DOUCHA, STRAKA e LIVANSKY, 2005; DOUSKOVA *et al.*, 2009; BORKENSETTEIN *et al.*, 2011; KUMAR *et al.*, 2011). A injeção direta da fumaça de exaustão de indústrias reduz os custos de pré-tratamento, porém, expõe as microalgas a condições extremas como altas concentrações de CO<sub>2</sub>, presença em grandes quantidades de compostos químicos inibitórios e altas temperaturas (PIRES *et al.*, 2012).

Em recentes trabalhos a contribuição das microalgas na remoção do CO<sub>2</sub> dos gases de exaustão foi bastante questionada, uma vez que o armazenamento deste gás não é permanente e a eficiência energética do processo é baixa (FERNÁNDEZ *et al.* 2012; GRIERSON, STREZOV e BENGTTSSON, 2013).

Contudo, a biomassa de microalgas pode ser utilizada como matéria-prima de inúmeros produtos e bioprodutos, como biocombustíveis, fertilizantes, pigmentos, entre outros, agregando valor ao processo e também substituindo uma quantidade equivalente de combustíveis fósseis (FERNÁNDEZ *et al.*, 2012).

A concentração de CO<sub>2</sub> em gases de exaustão é normalmente 400 vezes maior que a atmosférica (LAM e LEE, 2011; MCGINN *et al.*, 2011). A taxa de fixação desse gás pelas microalgas é limitada devido aos componentes tóxicos e ácidos presentes nos gases de exaustão (LEE *et al.*, 2002). Porém, aprimorando-se a produção de biomassa de microalgas pela adição de fatores de crescimento aos cultivos pode fazer com que a resistência aos compostos químicos nocivos e as taxas de fotossíntese sejam aumentadas (TASTAN *et al.*, 2013).

Sabe-se que os compostos sulfurados e nitrogenados presentes na fumaça de exaustão atuam como inibidores do crescimento de microalgas. Esses compostos mais o CO<sub>2</sub> reduzem o pH do meio de cultivo. Uma solução apontada por Maeda *et al.* (1995) é a adição de CaCO<sub>3</sub> aos cultivos para estabilizar o pH e não haver perdas por acidificação.

O gás de combustão compreende tipicamente 9,5 - 16,5% (v/v) de CO<sub>2</sub>, 2 - 6,5% (v/v) de O<sub>2</sub>, CO, 100 - 300 ppm de NO<sub>x</sub>, 280 - 320 ppm de SO<sub>x</sub>, metais pesados e partículas (Lee *et al.*, 2000; Lam, lee e mohamed *et al.*, 2012). O SO<sub>2</sub> é derivado dos SO<sub>x</sub>, hidrolisados em água e gerando íons H<sup>+</sup>, o que faz com que o pH do meio diminua. O SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e o HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> derivados da hidrólise do SO<sub>2</sub> são compostos inibitórios do crescimento das microalgas. Lam, Lee e Mohamed *et al.* (2012) e Zhao e Su (2014), respectivamente, relatam que concentrações superiores a 60 e 100 ppm inibem completamente os cultivos de quase todas as espécies de microalgas.

Além da concentração, o efeito de inibição causado por SO<sub>x</sub> varia também de acordo com a fonte da fumaça de exaustão. Os gases de exaustão gerados por diferentes indústrias exercem graus diferentes de toxicidade (LAM *et al.*, 2012). De forma mais ampla, os efeitos de inibição dependem das características das espécies de microalgas, das condições de crescimento, das concentrações e da origem dos poluentes (CHEAH *et al.*, 2015). Por isso, sistemas de dessulfurização dos gases são interessantes para não diminuir a taxa de crescimento das algas.

Os compostos nitrogenados ( $\text{NO}_x$ ) presentes nos gases de exaustão são formados por 5% a 10% (v/v) de  $\text{NO}_2$  e 90% a 95% de  $\text{NO}$  (ZHAO e SU, 2014). As microalgas podem absorver o nitrogênio na forma de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{NH}_4^+$  (VAN DEN HENDE, VERVAEREN e BOON, 2012). Diferentemente do  $\text{SO}_2$ , o  $\text{NO}$  não apresenta impacto direto no crescimento das microalgas, sendo que altas concentrações (acima de 300 ppm) são toleradas e não inibem os cultivos (KUMAR *et al.*, 2010). De acordo com Cheah *et al.* (2015) o  $\text{NO}$  dissolvido nos gases de exaustão podem servir como fonte alternativa de nitrogênio, uma vez que é facilmente absorvido pelas microalgas. Porém, ainda de acordo com os autores, o efeito positivo desse composto químico é limitado e concentrações muito altas podem interferir de forma negativa nos cultivos, mas não inibindo o crescimento de forma total.

As espécies de microalga *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp. são as mais proeminentes e que apresentam maior resistência quando submetidas a concentrações de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ , demonstrando pouca ou nenhuma inibição em seus crescimentos (CHEAH *et al.*, 2015). Cultivos mistos dessas espécies utilizados para o tratamento de resíduo suíno biodigerido apresentaram ganho de produção de biomassa de 30% quando submetidos a gases de exaustão de combustão (DE GODOS, *et al.*, 2010).

A combinação da fixação de  $\text{CO}_2$  de gases de combustão e remoção de nutrientes de águas residuais pode fornecer uma alternativa muito promissora às atuais estratégias de captura de  $\text{CO}_2$  – esse é também outro importante benefício ambiental desses microrganismos (PIRES *et al.*, 2012). As microalgas podem utilizar águas residuais, como esgotos municipais, industriais e rejeitos orgânicos agrícolas como meio de cultivo para seu crescimento, bem como fonte de nitrogênio, fósforo e outros nutrientes (SAWAYAMA *et al.*, 1995; CONVERTI *et al.*, 2006; WANG *et al.*, 2009).

Portanto, as microalgas são capazes de biofixar  $\text{CO}_2$  e remover  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$  de forma concomitante (HO *et al.*, 2011; VAN DEN HENDE, VERVAEREN e BOON, 2012; KAO *et al.*, 2014). Esse processo pode ser considerado como um tipo de fitorremediação em instalações industriais, uma vez que é uma maneira econômica de pré-tratamento de gases de combustão antes do descarte direto à atmosfera (CHEAH *et al.*, 2015).

## 2.1. Trabalhos utilizando microalgas como agentes biorremediadores de gases de exaustão

Oloffson *et al.*, (2015) cultivaram microalgas das espécies *Tetraselmis* sp. e *Skeletonema marinoi* em gases de exaustão da indústria de cimento. A fumaça continha um teor de 12% a 15% de CO<sub>2</sub>. As quantidades de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> eram de < 800 mg/Nm<sup>3</sup> e < 50 mg/Nm<sup>3</sup> respectivamente. Os fotobiorreatores utilizados nos experimentos eram de acrílico e poliestireno com volume de 5,8 L e 4,2 L respectivamente, com regime de luz de 16 horas e 8 horas de escuro. Diariamente um pulso do gás era inserido no tempo de 40 s a 120 s à vazão de 5 L.min<sup>-1</sup> no reator maior e 3 pulsos de 60 s a uma vazão de 1 L.min<sup>-1</sup> no reator menor. O período de cultivo foi de 10 dias. Em seus melhores resultados, a espécie *Tetraselmis* sp. cultivada com gases de exaustão apresentou ganho em biomassa de 25,3% quando comparado aos cultivos controle, onde havia apenas fornecimento de ar atmosférico. Não houve diferença significativa no conteúdo lipídico da biomassa das algas nos dois experimentos.

Além disso, os autores fizeram um comparativo entre cultivos de *Skeletonema marinoi* em fumaça de exaustão da indústria de cimento e cultivos com fornecimento de CO<sub>2</sub> (13,5%) industrial. Ao final dos 10 dias de experimento, as algas cultivadas nos gases de exaustão apresentaram produção de biomassa de 0,81 g.L<sup>-1</sup>, mais que os 0,77 g.L<sup>-1</sup> produzidos nos cultivos com apenas CO<sub>2</sub>. Novamente, não houve diferença significativa do teor de lipídeos nos diferentes cultivos. Os experimentos demonstraram a não toxicidade do gás frente às microalgas.

Lara-Gil, Senés-Guerrero e Pacheco (2016) utilizaram a espécie *Desmodesmus abundans*, selecionada e tolerante a CO<sub>2</sub>, para o tratamento de gases de exaustão também da indústria de cimento. Foi utilizado um fotobiorreator de 3 litros e o regime de iluminação foi constante. O gás continha 25% de CO<sub>2</sub>, 800 ppm de NO e 200 ppm de SO<sub>2</sub> e a vazão utilizada nos experimentos foi de 100 mL.min<sup>-1</sup>. Dois esquemas de aeração foram testados: aeração contínua com os gases de exaustão e 24 horas de aeração com a fumaça seguidos de 24 horas de aeração apenas com ar atmosférico. Controles com a adição de CO<sub>2</sub> industrial também foram realizados. No sistema de aeração contínua com os gases de exaustão, 60 horas após o início dos testes as microalgas foram totalmente inibidas.

Os cultivos com os ciclos de 24 horas de aeração com os gases de exaustão apresentaram uma produção máxima de biomassa da ordem de 1,497 g.L<sup>-1</sup>, superiores ao controle com CO<sub>2</sub> (1,197 g.L<sup>-1</sup>). A taxa de fixação do CO<sub>2</sub> também foi maior nos cultivos com a fumaça (0,416 ± 0,022 gCO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>) quando comparado ao controle (0,335 ± 0,015 g CO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>). Os autores também fizeram um comparativo do conteúdo proteico da biomassa de microalgas nas duas condições. Nos cultivos com fumaça, o teor de proteínas foi de 28,48 ± 3,27% m/m, também superior ao controle (24,33 ± 3,13% m/m).

Kao *et al.* (2014) utilizaram a microalga *Chlorella* sp. MTF-15 como agente biorremediador da fumaça de exaustão de uma usina de produção de aço. Foram testados 3 tipos de gases, provenientes de 3 tipos de fornos das diferentes etapas de produção do aço. Os 3 gases possuíam de 24% a 26% de CO<sub>2</sub>, 8 a 80 ppm de NO<sub>x</sub> e 15 a 90 ppm de SO<sub>2</sub>. Os experimentos foram realizados em duas etapas: escala laboratorial e escala piloto. Em laboratório os fotobiorreatores possuíam volume de 1 L, a injeção de gás era de 0,2 vvm e foram testadas diluições de 1, 1/2, 1/4 e 1/8 da fumaça em ar durante 7 dias. Foram realizados controles com CO<sub>2</sub> puro na diluição de 3%, 6%, 12,5% e 25% e apenas ar atmosférico. Os experimentos em escala piloto consistiram em fotobiorreatores de 50 L, com injeção dos gases durante 12 horas pelo período de 3 meses. Foram repetidos os melhores resultados obtidos em laboratório. Nos experimentos laboratoriais, o melhor resultado atingido foi de 2,855 g.L<sup>-1</sup> de concentração final de biomassa, resultado aproximadamente 3 vezes maior do que os cultivos que continham apenas ar atmosférico.

O teor lipídico dos cultivos realizados nos diferentes gases e diferentes diluições variou de 21,5% a 41,6%. O cultivo controle, apenas com ar, apresentou teor de 34%. Os melhores percentuais de remoção dos gases foram de 50% para o CO<sub>2</sub>, 95% para o NO<sub>x</sub> e 93% para o SO<sub>2</sub>. Quando repetidos os melhores resultados nos experimentos em escala piloto, a concentração final de biomassa atingida foi de 1,555 g.L<sup>-1</sup>, evidenciando a dificuldade que se tem quando do escalonamento dos processos.

Li *et al.* (2011) testaram a microalga mutante *Scenedesmus obliquus* WUST4 (tolerante aos gases) em cultivos aerados com gás de exaustão de forno de coque de uma indústria na China. Após a seleção, os autores utilizaram reatores de 5 L com injeção de CO<sub>2</sub> a 20% e 0,2 vvm para a comprovação da

eficácia de fixação do gás. O regime de iluminação foi contínuo. Nesse experimento, ao final de 10 dias, o melhor resultado de produção de biomassa foi de 0,971 g.L<sup>-1</sup> e 63,4% de remoção do CO<sub>2</sub>.

Posteriormente, os autores utilizaram fotobiorreatores de metilmetacrilato do tipo airlift com volume de 100 L para avaliar a biorremediação dos gases. O gás, antes de ser submetido às algas, passou por processos de pré-tratamento como resfriamento e remoção de cinzas. Os cultivos foram aerados no intervalo de 0,05 vvm a 0,5 vvm. A concentração de CO<sub>2</sub> foi ajustada entre as diluições de 6% a 18% para investigação do valor ótimo. A composição da fumaça consistiu em 18% de CO<sub>2</sub>, 200 ppm ou menos de SO<sub>x</sub> e 150 ppm de NO<sub>x</sub>. Segundo os autores, a composição desse gás é similar à de gases gerados na queima de carvão em usinas termoeletricas, os resultados mostraram que as microalgas precisam se adaptar ao meio em que estão inseridas. Nos dois primeiros dias de cultivo, apenas 5% do CO<sub>2</sub> foi tratado, ao passo que ao final do 17º dia 64% do gás foi removido do meio de cultivo. Além disso, os autores identificaram a diluição de 12% do CO<sub>2</sub> do gás em ar e vazão de 0,1 vvm como os melhores parâmetros para sua fixação. A taxa de remoção do gás nessas configurações foi em torno de 65%. Esse trabalho evidencia a capacidade de biofixação do CO<sub>2</sub> pelas microalgas, seja ele puro ou em gases de exaustão.

Zhao *et al.* (2015) investigaram a possibilidade de cultivo de 3 diferentes espécies de microalgas (*Chlorella* sp., *Isochrysis* sp. e *Amphidinium carterae*) em uma simulação de gás de exaustão feito em laboratório. O experimento foi realizado em fases. Na primeira fase, as três espécies foram cultivadas por 7 dias em fotobiorreatores do tipo coluna com aeração composta apenas por CO<sub>2</sub> (15%) e N<sub>2</sub> (85%), sem a presença de gases tóxicos e vazão de 0,2 vvm. Com isso, foi possível identificar a espécie mais eficiente para a remoção de CO<sub>2</sub>. Ao final dos 7 dias, a espécie *Chlorella* sp. atingiu a concentração de biomassa de 1,493 g.L<sup>-1</sup>, *Isochrysis* sp. alcançou 1,080 g.L<sup>-1</sup> e o pior desempenho foi da espécie *Amphidinium carterae*, com uma concentração de apenas 0,016 g.L<sup>-1</sup>, mostrando a não adaptação dessa espécie às condições impostas. Com isso, a espécie *Chlorella* sp. foi escolhida para a realização das próximas fases do experimento.

Na próxima etapa, as microalgas (*Chlorella* sp.) foram submetidas a 3 diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> - N<sub>2</sub> na aeração (10% - 90%, 15% - 85%, 20%

- 80%, respectivamente) para a investigação da melhor configuração de fixação do CO<sub>2</sub> e conseqüente maior produção de biomassa. Foi constatado que a menor concentração de CO<sub>2</sub> (10%) apontou o melhor resultado, com concentração final aos 7 dias de experimento de 2,025 g.L<sup>-1</sup>, contra 1,493 g.L<sup>-1</sup> na diluição de 15% e 1,170 g.L<sup>-1</sup> na diluição de 20%. Nota-se uma crescente inibição à medida que se aumenta a proporção de CO<sub>2</sub> no gás. Na terceira fase notou-se forte influência negativa do dióxido de enxofre. Na menor concentração, 100 ppm, houve uma diminuição da produção final de biomassa de 1,493 g.L<sup>-1</sup> para 0,593 g.L<sup>-1</sup>. Na concentração de 250 ppm houve inibição quase total dos cultivos. Por fim, estudou-se o efeito do mercúrio nos cultivos. Pequenas quantidades desse metal pesado já são responsáveis por uma inibição considerável na produção de biomassa. 10 µg já são suficientes para diminuir a quantidade de biomassa praticamente à metade (1,493 g.L<sup>-1</sup> para 0,788 g.L<sup>-1</sup>). Já entre 10 µg e 30 µg não há uma diferença grande no efeito inibitório, com produção final de 0,615 g.L<sup>-1</sup> para a maior quantidade de Hg. A Tabela 1 apresenta alguns trabalhos encontrados na literatura enfatizando a biorremediação ambiental.

**Tabela 1.** Trabalhos encontrados na literatura envolvendo microalgas e gases.

| ESPÉCIE   | EMIÇÃO                        | FBR  | MEIO DE CULTIVO                     | ILUMINAÇÃO          | REFERÊNCIA                                |
|---|-------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------|---|
| <i>Scenedesmus</i> sp.                              | Queima de carvão              | Lagoa (25 L)   | Artificial + fatores de crescimento | Artificial 24 horas | Tastan e Tekinay (2016)                   |
| <i>Desmodesmus abundans</i>                         | Indústria de cimento          | Fotobiorreator customizado – 1 L                                     | BG11 modificado                     | Artificial 24 horas | Lara-Gil, Senés-Guerrero e Pacheco (2016) |
| <i>Tetraselmis</i> sp. e <i>Skeletonema marinoi</i> | Indústria de cimento          | Airlift – 5,8 L e 4,2 L  | Artificial Guillard f/2             | Artificial 16 horas | Oloffson <i>et al.</i> , (2015)           |
| ESPÉCIE   | EMIÇÃO                        | FBR  | MEIO DE CULTIVO                     | ILUMINAÇÃO          | REFERÊNCIA                                |
| <i>Chlorella</i> sp.                                | Gás de exaustão artificial    | Coluna 1 L   | F/2                                 | Artificial 24 horas | Zhao <i>et al.</i> (2015)                 |
| <i>Nannochloropsis oculata</i>                      | Usina termoeleétrica a carvão | Lagoa tipo pista de corrida 1191 m <sup>2</sup> e 310 m <sup>3</sup> | Artificial                          | Natural             | Cheng <i>et al.</i> (2015)                |
| <i>Chlorella</i> sp. MTF-15                         | Indústria do aço              | Coluna 1 L e 50 L  | F/2 Modificado                      | Natural             | Kao <i>et al.</i> (2014)                  |

|   |                                    |                                     |                         |                     |                                    |
|---|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------------|
| <i>Desmodesmus abundans</i> e <i>Scenedesmus</i> sp.  | Gás de exaustão artificial         | Erlenmeyer 27,5 mL                  | BD11                    | Artificial 24 horas | Lara-Gil, Álvarez e Pacheco (2014) |
| <i>Nannochloropsis limnetica</i>  | Gás de combustão de casca de arroz | Coluna                              | ND                      | ND                  | Ronda <i>et al.</i> (2014)         |
| <i>Nannochloropsis oceanic KA2</i>  | Gás de exaustão                    | Lagoa tipo pista de corrida 8000 L  | ND                      | Natural             | Zhu <i>et al.</i> (2014)           |
| <i>Scenedesmus dimorphus</i>  | Gás de exaustão                    | Coluna 0,1 L                        | ND                      | Artificial 24 horas | Jiang <i>et al.</i> (2013)         |
| <i>Chlorella</i> sp., <i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803, e <i>Tetraselmis suecica</i> )   | Combustão de gás natural           | Frascos 200 mL                      | Artificial, BG11 e ASP2 | Artificial 24 horas | He, Subramanian e Tang (2012)      |
| <i>Scenedesmus obliquus</i> WUST4   | Forno de coque                     | Airlift 100 L                       | SE                      | Artificial 24 horas | Li <i>et al.</i> (2011)            |
| <i>Chlorella</i> sp. MTF-7  | Forno de coque                     | Coluna 50 L                         | F/2 modificado          | Natural             | Chiu <i>et al.</i> (2011)          |
| <i>Chlorella emersonii</i>  | Gás de exaustão                    | Airlift 5,5 L                       | ND                      | Artificial 24 horas | Borkenstein <i>et al.</i> (2011)   |
| <i>Chlorella</i> sp.  | Usina de cogeração                 | Coluna 300 L                        | Artificial              | Natural             | Kastanek <i>et al.</i> (2010)      |
| <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Chlorella</i> sp., <i>Nitzschia</i> sp., <i>Chlamydomonas</i> sp., <i>Oocystis</i> sp. e <i>Protoderma</i> sp. | Combustão de gás natural           | Lagoa                               | ND                      | ND                  | De Godos <i>et al.</i> (2010)      |
| <i>Scenedesmus</i> sp.  | Gás de exaustão                    | Lagoa tipo pista de corrida 20000 L | ND                      | Natural             | De Godos <i>et al.</i> (2010)      |
| <i>Chlorella vulgaris</i>   | Gás de exaustão                    | Coluna 0,3 L                        | ND                      | Artificial 24 horas | Douskova <i>et al.</i> (2009)      |
| <i>Chlorella</i> sp.  | Combustão de gás natural           | Biofilme 55 m <sup>2</sup>          | Artificial              | Natural             | Doucha, Straka e Lívanský (2005)   |
| <i>Nannochloropsis salina</i>   | Gás de exaustão                    | Lagoa tipo pista de corrida 600 L   | ND                      | Natural             | Matsumoto <i>et al.</i> (1997)     |
| <i>Monoraphidium minutum</i>  | Gás de exaustão                    | ND 0,3 L                            | ND                      | Artificial 24 horas | Zeiler <i>et al.</i> (1995)        |

A Tabela 2 apresenta informações acerca da quantidade de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, além da vazão de gases de exaustão utilizada nos trabalhos pesquisados na literatura.

**Tabela 2.** Tolerância à toxicidade de diferentes espécies de microalgas a diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>.

| ESPÉCIE  | EMIÇÃO                                  | CO <sub>2</sub><br>(%) | NO <sub>x</sub><br>(ppm) | SO <sub>x</sub><br>(ppm) | INIBIÇÃO      | REFERÊNCIA                       |
|--|---|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|----------------------------------|
| <i>Chlorella</i> sp.   | Usina de cogeração                      | 8 – 10,2               | 38                       | 3,8                      | Não inibida   | Kastanek <i>et al.</i> (2010)    |
| <i>Chlorella</i> sp.   | Combustão de gás natural                | 6 – 8                  | 37                       | -                        | Não inibida   | Doucha, Straka e Lívanský (2005) |
| <i>Nannochloropsis limnetica</i>   | Gás de combustão de casca de arroz      | 10                     | -                        | 25                       | Inibida       | Ronda <i>et al.</i> (2014)       |
| <i>Chlorella</i> sp. MTF-15  | Indústria do aço                        | 25                     | 70 – 80                  | 80 – 90                  | Leve inibição | Kao <i>et al.</i> (2014)         |
| <i>Chlorella</i> sp. MTF-7   | Forno de coque                          | 23                     | 78                       | 87                       | Não inibida   | Chiu <i>et al.</i> (2011)        |
| <i>Scenedesmus obliquus</i> WUST4  | Forno de coque                          | 18                     | 150                      | 200                      | Não inibida   | Li <i>et al.</i> (2011)          |
| <i>Scenedesmus</i> sp.,<br><i>Chlorella</i> sp.,<br><i>Nitzschia</i> sp.,<br><i>Chlamydomonas</i> sp.,<br><i>Oocystis</i> sp. e<br><i>Protoderma</i> sp. | Combustão de gás natural                | 7,5                    | 77                       | -                        | Não inibida   | De Godos <i>et al.</i> (2010)    |
| <i>Chlorella vulgaris</i>  | Simulação de gás de combustão de carvão | 12                     | 100                      | 60                       | Não inibida   | Radmann <i>et al.</i> , 2011     |
| <i>Synechococcus nidulans</i>  | Simulação de gás de combustão de carvão | 12                     | 100                      | 60                       | Inibida       | Radmann <i>et al.</i> (2011)     |
| <i>Dunaliella tertiolecta</i>  | Simulação de gás de exaustão            | 15                     | 300                      | -                        | Não inibida   | Nagase <i>et al.</i> (2001)      |

### 3. Biorremediação de matéria orgânica

Os problemas ambientais nas últimas décadas são observados com mais frequência, principalmente após o crescimento populacional e da crescente demanda do setor industrial. As respostas que o meio ambiente nos apresenta a partir de cada atividade antropogênica é conhecida como impactos ambientais, onde poluentes são inseridos no meio ambiente, acarretando a modificação dos ecossistemas. Para manter o sistema em equilíbrio e o seu desenvolvimento

linear, os microrganismos presentes nesses ambientes realizam a degradação dos poluentes, onde são utilizados como fonte de nutrientes. O processo de biorremediação utiliza processos que reduzem os poluentes presentes no ambiente, a partir do processo metabólico microbiano (PEREIRA, 2012).

As demandas de consumo são consequência do crescimento populacional mundial. Para a produção de determinados produtos é obtido como resultado um grande volume de resíduos. Esses resíduos quando não tratados ou sem a realização de um pré-tratamento antes da deposição final ao ambiente, pode acarretar contaminação na água e no solo.

Em corpos hídricos, o lançamento elevado de matéria orgânica acarreta graves efeitos, como a eutrofização e o consumo do oxigênio, além das modificações físicas do curso do rio, ocasionando sérios distúrbios ambientais. Um dos principais fatores de poluição do solo é a crescente deposição de resíduos. A inserção de contaminantes no solo, provocam impactos negativos na cadeia alimentar, além de atingir águas superficiais e subterrâneas, comprometendo a biodiversidade, vetorização de doenças, além do desenvolvimento de problemas sociais.

Em corpos hídricos e nos solos, o número de microrganismos é elevado, assim, com o desenvolvimento dessas áreas, os microrganismos vão se adaptando às fontes de energia disponibilizadas para o seu desenvolvimento natural. A relação da biodiversidade é desenvolvida com a relação de comunidades microbianas, que auxiliam nos processos de remediação, onde ocorre a degradação dos compostos poluentes.

Uma das alternativas para a minimização dos impactos ambientais, proveniente de fontes antropogênicas é a utilização de comunidades microbianas, as quais são envolvidas na degradação de compostos orgânicos. As estruturas químicas desses poluentes apresentam influência da metabolização dos microrganismos, onde a maioria dos poluentes são biodegradados, além de serem fontes de nutrientes e energia.

### **3.1. Biorremediação de efluente suíno**

Um dos grandes desafios da suinocultura é o destino dos dejetos, tanto por sua DBO ser extremamente elevada – cerca de 200 vezes maior que a do esgoto doméstico (TECPAR, 2002), como também pela grande quantidade de

animais. A Tabela 3 apresenta o crescimento na última década do número de suínos no Brasil. É importante ressaltar que além do crescimento da produção, existe um aumento na densidade de porcos por propriedade, o que torna a quantidade de dejetos mais significativa, visto que existe um limite para quanto o solo consegue receber de nutrientes sem se degradar.

**Tabela 3.** Efetivo de suínos no brasil (2009 - 2019).

| <b>ANO</b> | <b>EFETIVO DE REBANHO</b> |
|------------|---------------------------|
| 2009       | 38.045.454                |
| 2010       | 38.956.758                |
| 2011       | 39.307.336                |
| 2012       | 38.795.902                |
| 2013       | 36.743.593                |
| 2014       | 37.930.307                |
| 2015       | 39.795.222                |
| 2016       | 40.053.184                |
| 2017       | 41.383.029                |
| 2018       | 41.231.856                |
| 2019       | 40.556.892                |

FONTE: Adaptado de IBGE (2020).

O procedimento mais comum para o tratamento desse efluente é pelo seu aproveitamento como fertilizante, aonde o dejetos fica em esterqueiras por cerca de 30 dias em sistemas anaeróbios ativos e depois é aplicado no solo (FÁVERO, 2003). Contudo, essa aplicação possui custos elevados e demanda um conhecimento muito específico das quantidades de nitrogênio, potássio e fósforo necessários pela planta que utilizará esse fertilizante como também demanda o conhecimento dessas quantidades no dejetos. Não obstante, dependendo da dieta do animal, poderá ser verificada uma quantidade excessiva de minerais como cobre e zinco nas plantas que utilizaram esse adubo (JONGBLOED, 2008).

Devido à alta quantidade de nutrientes que esse dejetos possui, se este não for devidamente tratado e/ou se o estudo do solo for insuficiente, pode

causar a eutrofização de mananciais e lençóis freáticos (GIRARD *et al*, 2009), volatilização da amônia e degradação dos solos férteis por excesso de nutrientes (APSIMON, KRUSE e BELL, 1987). A Tabela 4 apresenta a composição do dejetos, observando demonstrando que além dos nutrientes em abundância, há um número expressivo de coliformes fecais, os quais têm grande potencial como causadores de doenças.

**Tabela 4.** Composição do dejetos suíno

| PARÂMETRO  | ABRANGÊNCIA                           |
|--|---------------------------------------|
| pH   | 6.3 – 6.5                             |
| Sólidos em Suspensão (mg/L)  | 20 500 – 46 500                       |
| Matéria orgânica no formato DBO <sub>5</sub><br>(mg O <sub>2</sub> /L) | 13 400 – 40 000                       |
| Nitrogênio Kjeldahl total (mg N/L)                                     | 3000 – 5200                           |
| Nitrogênio amoniacal (mg N/L)  | 1820 – 3330                           |
| Fósforo (mg/L)   | 660 – 920                             |
| Potássio (mg/L)  | 1820 – 2690                           |
| Coliformes fecais (NMP/100 ml)   | $1.4 \times 10^7$ – $7.8 \times 10^7$ |

Notas: DBO<sub>5</sub> = demanda bioquímica de oxigênio em cinco dias; NMP = número mais provável. FONTE: Adaptado de Girard *et al.* (2009).

Dado esse contexto, a utilização de microalgas como uma alternativa para o tratamento desse efluente, pode ser de elevado impacto social e econômico, pois a biomassa gerada pode ser utilizada para a produção de biodiesel, sem exigir grande área para a sua criação (TAHER, 2013). A produção de biomassa pelas microalgas nesse método ainda agrega valor ao dejetos, tornando atrativo ao produtor realizar essa biorremediação.

A Tabela 5 apresenta a eficiência da remoção de nutrientes por microalgas segundo os experimentos de Taher (2013), Wang *et al.* (2010) e Woertz *et al.* (2009). Nos experimentos, diferentes efluentes e microalgas foram utilizadas, porém, a remoção de nutrientes em todas é superior a 70%, atestando a eficácia do método para diversos efluentes.

**Tabela 6.** Comparativo de remoção de nutrientes de diversos efluentes.

| AUTOR                       | NUTRIENTE                       | % DE REMOÇÃO | MEIO DE CULTIVO                                | MICROALGA                           |
|-----------------------------|---------------------------------|--------------|--|-------------------------------------|
| Woertz <i>et al.</i> (2009) | Nitrogênio amoniacal<br>Fosfato | 99<br>99     | Resíduo municipal sem pré tratamento           | Mix contendo <i>Scenedesmus</i> sp. |
| Woertz <i>et al.</i> (2009) | Nitrogênio amoniacal<br>Fosfato | 96<br>99     | Efluente da indústria de laticínio biodigerido | Mix contendo <i>Scenedesmus</i> sp. |
| Wang <i>et al.</i> (2010)   | Nitrogênio amoniacal<br>Fosfato | 100<br>70,1  | Efluente da indústria de laticínio biodigerido | <i>Chlorella</i> sp.                |
| Taher (2013)                | Nitrogênio amoniacal<br>Fosfato | 99,6<br>99,3 | Efluente suíno biodigerido                     | <i>Scenedesmus</i> sp.              |

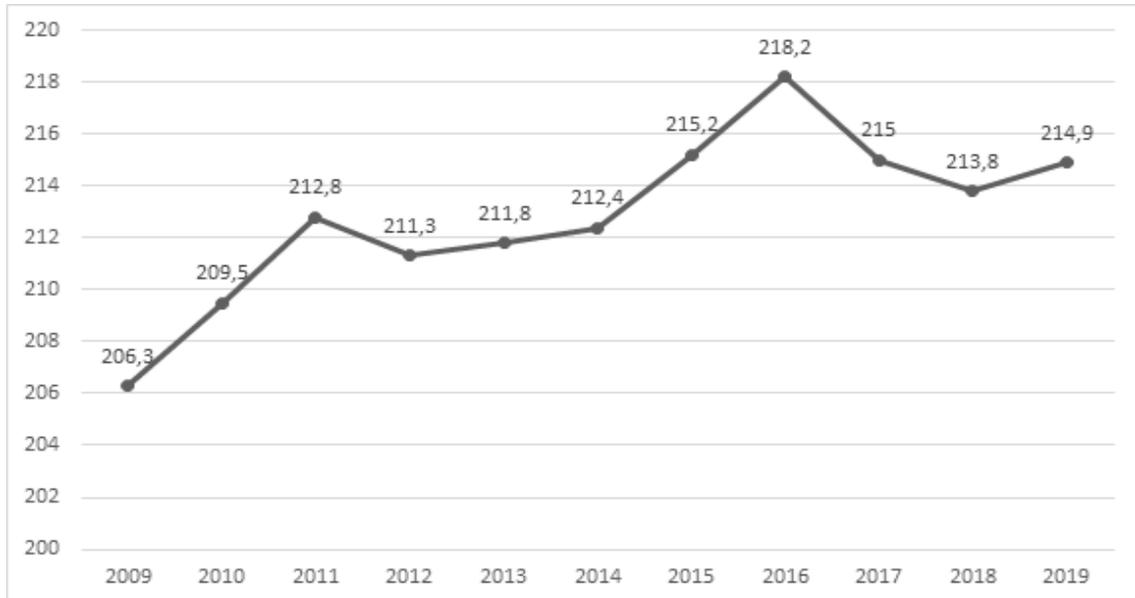
FONTE: Adaptado de Taher (2013).

### 3.2. Biorremediação de efluente bovino

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de carne bovina (EMBRAPA), de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2019 haviam 214,9 milhões de cabeças de bovinos no Brasil. A Figura 1 mostra a evolução de 2009 até 2019 da quantidade de cabeças de gado em território brasileiro.

Essa indústria pecuária é responsável pela produção de grandes volumes de efluentes com alta carga orgânica, devido à presença de sangue, esterco, gordura, conteúdo estomacal não-digerido ou conteúdo intestinal nesse material. Além disso, é relevante destacar as altas concentrações de nitrogênio e fósforo, e elevadas taxas de demanda química de oxigênio (DQO) dessa categoria de resíduo. Por conta dessas características, deve os mesmos sejam tratados de maneira adequada visto que a alta presença de nitrogênio e fósforo pode resultar em eutrofização de corpos d'água, contaminação dos lençóis freáticos e poluição do ar por volatilização de amônia (LU *et al.*, 2018; MARONEZE *et al.*, 2014). Em geral, esse tipo de resíduo é tratado por digestão anaeróbia. Apesar desse tratamento atingir níveis de DQO adequados, ele não é eficiente na remoção de nitrogênio e fósforo. Uma alternativa para a resolução desse impasse é a

biorremediação através das microalgas, capazes de utilizar os efluentes de gado como substrato para seu cultivo (LU, *et al.*, 2019; MULBRY, *et al.*, 2008).



**Figura 1.** Efetivo do rebanho de bovinos no Brasil (em milhões).

FONTE: Adaptado IBGE (2020).

Os efluentes bovinos possuem algumas particularidades por conta de sua composição bioquímica. Geralmente, os resíduos líquidos provenientes do gado possuem traços de antibióticos e hormônios. Além disso, esse tipo de resíduo apresenta metais pesados em sua composição, o que em concentrações altas pode inibir o crescimento de microalgas e aumentar o risco de contaminação. A presença de traços de antibióticos, frequentemente encontrados em fezes e urina do gado, pode ser tóxica dependendo da espécie de microalga envolvida no processo de biorremediação e do antibiótico presente nos efluentes bovinos. As microalgas que são altamente resistentes a esse tipo de contaminante são dos seguintes gêneros: *Microcystis*, *Spirulina*, *Euglena*, *Nitzschia*, *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Scenedesmus* e *Neochloris* (LU *et al.*, 2019).

As espécies de microalgas utilizadas no processo de biorremediação influenciam na eficiência da remoção de nutrientes e na tolerância a substâncias tóxicas nos efluentes (LU *et al.*, 2019). Nos últimos anos, vários estudos foram realizados sobre o crescimento de microalgas e sua capacidade de remoção de

poluentes orgânicos e nutrientes de efluentes de gado em fotobiorreatores (MENDONÇA *et al.*, 2018).

#### 4. Conclusões

As microalgas apresentam potenciais nas mais variadas áreas da ciência, indústria e de produtos. Como visto no capítulo, esses microrganismos podem ser utilizados na biorremediação de variados resíduos. Foram avaliadas diferentes espécies de microalgas expostas a diferentes efluentes, o grau de tolerância apresentado frente aos resíduos e a eficiência de biorremediação. Fica clara a possibilidade da utilização desses seres vivos com essa finalidade. Essa é mais uma alternativa aos diferentes métodos de biorremediação, viável, ecologicamente correta e renovável.

#### 5. Referências

ANTEZANA, V. C. P., FURLAN, B. J., ZATTA, P. H. S., MARTINS, L. S., MARIANO, A. B. ESTUDO COMPARATIVO DO CRESCIMENTO DE MICROALGAS TETRADESMUS OBLIQUUS EM DIFERENTES MEIOS DE CULTIVO. In: Anais do I Congresso Virtual de Estudantes e Profissionais de Engenharia Ambiental e Sanitária. Anais. Goiânia (GO) Ambiente Virtual, 2020. DOI: 10.29327/ConVEPEAS.269630 Acesso em: 11/04/2021.

APSIMON, H.M.; KRUSE, M.; BELL, J.N.B. Ammonia emissions and their role in acid deposition. **Atmospheric Environment**, v. 21, p. 1939–1946, 1987.

ASSEMANY, Paula Peixoto., *et al.* Energy potential of algal biomass cultivated in a photobioreactor using effluent from a meat processing plant. **Algal Research**, 17, 53–60, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.04.018>.

CONTANZA, R. Economia Ecológica: uma agenda de pesquisa. 1994.

EMBRAPA. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/qualidade-da-carne/carne-bovina>> . Acesso em 28 ago. 2021

FÁVERO, J.A. Produção Suínos. Sistemas de Produção, 2. Versão Eletrônica. Jan., 2003. ISSN 1678-8850. Embrapa Suínos e Aves. Disponível em: <<http://www.cnpssa.embrapa.br/SP/suinos/manejodejetos.html>>. Acesso em 28 ago. 2021

FURLAN, Beatriz Jacob; ZATTA, Pedro Henrique Siqueira; ANTENAZA, Valeria Cristina Pereira; MARTINS, Lauber de Souza; MARIANO, André Bellin., 2021. **Estudo do crescimento de microalgas em meio de cultivo CHU e dejetos suínos**. Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia, Volume 6. 1ed. Belo Horizonte, Minas Gerais.: Editora Poisson, v. 6, p. 204-211. <http://dx.doi.org/10.36229/978-65-5866-094-1.CAP.24>

GIRARD, Matthieu *et al.* A review of the environmental pollution originating from the piggery industry and of the available mitigation technologies: towards the simultaneous biofiltration of swine slurry and methane this article is one of a selection of papers published in this special issue on biological air treatment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [S.L.], v. 36, n. 12, p. 1946-1957, dez. 2009. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/I09-141>.

HENA, S., *et al.* Dairy farm wastewater treatment and biodiesel production by *Arthrospira platensis* cultivation Dairy farm wastewater treatment and lipid accumulation by *Arthrospira platensis*. **Water Research**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.057>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/indicadores>>. Acesso em 27 ago. 2021

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>>. Acesso em 29 ago. 2021.

JONGBLOED, Age W. Environmental pollution control in pigs by using nutrition tools. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [S.L.], v. 37, n., p. 215-229, jul. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300026>.

KIM, Ji-Yeon; KIM, Hyun-Woo. Photoautotrophic Microalgae Screening for Tertiary Treatment of Livestock Wastewater and Bioresource Recovery. **Water Research**, 2017. <https://doi.org/10.3390/w9030192>.

LEHMUSKERO, A., Skogen Chauton, M., Boström, T. Light and photosynthetic microalgae: a review of cellular- and molecular-scale optical processes, *Prog. Oceanogr.* 168 (2018) 43– 56. [10.1016/j.pocean.2018.09.002](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.09.002)

LU, Weidong *et al.* Critical processes and variables in microalgae biomass production coupled with bioremediation of nutrients and CO<sub>2</sub> from livestock farms: A review, **Science of the Total Environment**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135247>.

LV, J., *et al.* Nutrients removal from undiluted cattle farm wastewater by the two-stage process of microalgae-based wastewater treatment. **Bioresource Technology**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.085>.

MARONEZE, M. M., *et al.* Treatment of cattle-slaughterhouse wastewater and the reuse of sludge for biodiesel production by microalgal heterotrophic bioreactors. **Scientia Agricola**, 71(6), 521–524, 2014. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0092>.

MENDONÇA, Henrique Vieira de *et al.* Microalgae-mediated bioremediation and valorization of cattle wastewater previously digested in a hybrid anaerobic reactor using a photobioreactor: Comparison between batch and continuous operation. **Science of The Total Environment**, 633, 1–11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.157>.

MULBRY, Walter *et al.* Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: Algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers. **Bioresource Technology**, 99(17), 8137–8142, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.073>.

TAHER, D. M. Biodiesel de microalgas cultivadas em dejetos suínos biodigeridos. 2013, p. 107. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

TECPAR – Instituto de Tecnologia do Paraná. **Manual de Biosistemas Integrados na Suinocultura**. Centro de Integração de Tecnologia do Paraná – CITPAR. Telus – Rede Paranaense de Projetos em Desenvolvimento Sustentável. Curitiba, Paraná – 2002. p 140.

WANG, L.; LI, Y.; CHEN, P.; MIN, M. CHEN, Y.; ZHU, J.; RUAN, R. R. Anaerobically digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 2623–2628, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.062>.

WOERTZ, I.; FEFFER, A.; LUNDQUIST, T.; NELSON, Y. Algae Grown on Dairy and Municipal Wastewater for Simultaneous Nutrient Removal and Lipid Production for Biofuel Feedstock. **Journal of Environmental Engineering**, v. 135, n. 11, p. 1115-1122, 2009.

YU, Jeong-Ung; KIM, Hyun-Woo. Enhanced Microalgal Growth and Effluent Quality in Tertiary Treatment of Livestock Wastewater Using a Sequencing Batch Reactor. **Water, Air, & Soil Pollution**, [S.L.], v. 228, n. 9, set. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-017-3547-6>.

## **Autores**

Dhyogo Mileo Taher\*, Beatriz Jacob-Furlan, Valeria Cristina Pereira Antezana, Laura Sebben Galarce, Rafael Xisto Vieira Filho, José Viriato Coelho Vargas, André Bellin Mariano.

Universidade Federal do Paraná, Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS), S/N Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, 81531-990, Curitiba, Brasil.

\* Autor para correspondência: [dhyogomt@gmail.com](mailto:dhyogomt@gmail.com)