

A biotecnologia como instrumento de sequestro de carbono: bactérias, microalgas e árvores geneticamente modificadas

A preocupação das populações de vários países e da comunidade científica global tem sido crescente nos últimos anos com relação às mudanças climáticas. O Aquecimento Global atinge níveis alarmantes e gera apreensão na comunidade internacional que teme danos irreversíveis ao planeta. A intensificação do Efeito Estufa em virtude da emissão excessiva de gases como o dióxido de carbono tem agravado esse cenário. Frente a esse problema, muitos pesquisadores têm dedicado seus esforços para criar tecnologias que visam neutralizar ou compensar os danos gerados pelos gases poluentes. Entre as alternativas disponíveis, o biosequestro de carbono ganhou espaço nos últimos anos, seu objetivo é utilizar organismos vivos para aprisionar o carbono atmosférico de forma a minimizar os impactos do aumento da temperatura do planeta. Esse artigo apresenta uma revisão da utilização de Escherichia coli, Microalgas e Árvores Geneticamente Modificadas, como biosequestradores potenciais de carbono atmosférico.

Palavras-chave: Engenharia genética; Escherichia coli; Dióxido de carbono; Impactos ambientais; Aquecimento global.

Biotechnology as a tool for carbon sequestration: bacteria, microalgae and genetically modified trees

The concern of the populations of several countries and the global scientific community has been growing in recent years in relation to climate change. Global warming has reached alarming levels and generates apprehension in the international community that fears irreversible damage to the planet. The intensification of the Greenhouse Effect due to the excessive emission of gases such as carbon dioxide has worsened this scenario. Facing this problem, many researchers have dedicated their efforts to create technologies that aim to neutralize or compensate the damage generated by pollutant gases. Among the alternatives available, carbon biosequestration has gained space in recent years, its goal is to use living organisms to trap atmospheric carbon in order to minimize the impacts of the increase in the planet's temperature. This paper presents a review of the use of Escherichia coli, Microalgae and Genetically Modified Trees, as potential biosequestrators of atmospheric carbon.

Keywords: Genetic engineering; Escherichia coli; Carbon dioxide; Environmental impacts; Global warming.

Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **03/11/2021**

Approved: **22/11/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Guilherme Augusto Carvalho de Jesus 

Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6084421045754491>
<https://orcid.org/0000-0002-0168-3160>
guicaiesus@gmail.com

Mariana Fernandes Rocha 

Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6484543163166010>
<https://orcid.org/0000-0003-0547-8962>
marianarocha1819@hotmail.com

Esperança Edna Alexandre Chibite 

Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4588966105284473>
<https://orcid.org/0000-0002-8512-3362>
edchibite@gmail.com

Michele Harumi Motoyama 

<http://lattes.cnpq.br/2801311487092514>
<https://orcid.org/0000-0002-3479-1571>
micheleharumi@hotmail.com

Hélio Conte 

Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7805899028515988>
<https://orcid.org/0000-0002-2090-0554>
hconte@uem.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0021

Referencing this:

JESUS, G. A. C.; ROCHA, M. F.; CHIBITE, E. E. A.; MOTOYAMA, M. H.; CONTE, H.. A biotecnologia como instrumento de sequestro de carbono: bactérias, microalgas e árvores geneticamente modificadas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.11, p.246-255, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0021>

INTRODUÇÃO

Tem sido crescente a preocupação mundial em relação às mudanças do clima no planeta, decorrentes, principalmente, das emissões de dióxido de carbono (CO₂), resultante do processo de decomposição da matéria orgânica e de todo e qualquer processo de combustão, e outros gases de efeito estufa (GEE), como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) (GAYATHRI et al., 2021).

O aumento da emissão de dióxido de carbono (CO₂) que conduz às alterações climáticas globais é um dos maiores desafios ambientais que o mundo enfrenta atualmente (BHARTI et al., 2021).

Os gases de efeito de estufa caracterizam-se por deixarem passar com facilidade a radiação solar, de curtos comprimentos de onda, e absorverem intensamente a radiação emitida pela Terra, de maiores comprimentos de onda, o que resulta no aquecimento da atmosfera. O aumento nas concentrações de gases de efeito de estufa na atmosfera, principalmente dióxido de carbono, tem levado a várias consequências indesejáveis, como a poluição atmosférica e o clima e tem afetado a economia, a saúde global e a qualidade de vida (MIKHAYLOV et al., 2020; SCHWEITZER et al., 2021). Como resultado, os ciclos biogeoquímicos têm sido significativamente perturbados (CANTON, 2021).

Assim sendo, tem-se um consenso mundial de que estratégias devem ser estudadas e empregadas para redução da concentração do CO₂ atmosférico, na tentativa de reduzir o risco de eventuais catástrofes mundiais, uma dessas estratégias é o estímulo do sequestro de carbono (ASANOPOULOS, 2020).

O termo "sequestro de carbono" surgiu como consequência da real necessidade de redução de emissão de gás carbônico na atmosfera. O conceito de sequestro de carbono foi formulado pela conferência de Kyoto em 1997, com o objetivo de conter e reverter o acúmulo de CO₂ na atmosfera e com a intenção de minimizar os impactos ambientais, referentes às mudanças climáticas quanto ao aquecimento global e a elevação dos gases de efeito estufa (JIN et al., 2020).

Sequestrar carbono tem como significado adotar medidas que visem a absorção do excesso de CO₂ da atmosfera, fixando-o, preferencialmente na forma orgânica. A fixação de carbono pode ser realizada por todos os seres fotossintetizantes (BRANDL et al., 2021).

O sequestro de carbono é um mecanismo muito importante para a diminuição das concentrações de gases do efeito estufa estocadas nos oceanos, florestas solos, melhorando tanto a ciclagem do carbono, como também fertilizando os solos. O sequestro de carbono é tão importante que com a remoção do CO₂ atmosférico somado com o processo de fotossíntese contribui para a manutenção dos seres vivos, pois a fotossíntese libera oxigênio para a atmosfera (RACELIS et al., 2019).

A mitigação do CO₂ pode ser obtida por três maneiras: primeiro através da melhoria da eficiência energética, segundo através da captura e fixação de CO₂, e terceiro utilizando combustíveis limpos alternativos. Por se tratar de seres fotossintetizantes, os mais importantes sumidouros globais de carbono são plantas verdes, algas, e algumas bactérias fotossintéticas e quimiotrofas. Alguns micróbios fixam CO₂ com a ajuda de enzimas especiais como a anidrase carbonica, a Rubisco, e outras carboxilases (BRANCALION et al., 2020).

Existem dois tipos de sequestro de carbono o direto e indireto, o sequestro de carbono direto é também conhecido como sequestro de carbono artificial ou geológico do carbono, resultante da separação e captura do CO₂ gerados em processos industriais e em processos relacionados a geração ou consumo de energia. No sequestro de carbono indireto, o CO₂ atmosférico é removido por processo natural, em que o CO₂ é absorvido pela fotossíntese e incorporado a biomassa do vegetal durante seu crescimento (WILBERFORCE et al., 2019).

Trabalhos nessa área incluem o sequestro de CO₂ através da produção de biomassa seca, efetuada principalmente pelas microalgas aquáticas (MADADI et al., 2021; CHOI et al., 2020) plantas terrestres, dentre estas, principalmente as componentes das florestas (DOMKE et al., 2020) e microrganismos (WANG et al., 2021a, 2021b, 2021c).

Por essa razão, buscou-se fazer um levantamento sobre a capacidade de sequestro de carbono indireto por microalgas, tanto de água doce quanto de ambiente marinho, bactérias e árvores geneticamente modificadas, que podem constituir alternativas para minimizar os efeitos do aquecimento global do planeta.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo foi desenvolvido e fundamentado por meio de estudos bibliográficos, artigos científicos, e livros relacionados ao assunto, buscando e analisando informações na literatura que aprovam a extensão e percepção sobre o tema abordado.

Os critérios para a inclusão dos artigos foram: artigos originais, em idioma inglês, artigos completos, disponíveis gratuitamente e publicados entre 2010-2021. Ao todo, foram selecionados 46 artigos, obtidos por meio das Plataformas Capes, Scielo, Science Direct, Google Scholar e NCBI, os quais estão inclusos nesta revisão.

DISCUSSÃO TEÓRICA

Escherichia coli

A engenharia de sequestro de carbono é um campo que tem atraído muita atenção na comunidade científica, já que pode reforçar a fixação de CO₂ ou reduzir sua emissão (HU et al., 2021). Dentre os gases do efeito estufa, o dióxido de carbono tem impacto significativo no aquecimento global e, nessa circunstância, sua captura é de extrema relevância. As tecnologias para sequestro de carbono fazem parte das estratégias para lidar com o aumento da temperatura do planeta (KHOSROABADI et al., 2021).

O biossequestro é um processo que envolve reações naturais de CO₂ e outros gases com a disponibilidade de microrganismos. Enzimas como anidrase carbônica e urease são utilizadas para acelerar biossequestro de dióxido de carbono e convertê-lo em componentes de calcita, como carbonato de cálcio (CaCO₃) (ABDULLAH et al., 2020). Para verificar esse processo em bactérias, Jo et al. (2013) introduziram a enzima Anidrase Carbônica, proveniente de *Neisseria gonorrhoeae* no periplasma de *E. Coli*. A Anidrase Carbônica é responsável por catalisar a hidratação de CO₂, cujo produto se dissocia em prótons (H) e

bicarbonato (HCO_3). Verificou-se que essa enzima foi altamente expressa na bactéria recombinante, acelerando a formação de CaCO_3 em condições de pH relativamente baixo e que a estabilidade térmica da enzima no periplasma foi significativamente melhorada, demonstrando eficácia no sequestro de gás carbônico na forma de carbonato de cálcio.

A Anidrase Carbônica também catalisa os processos realizados por espécies microfitobentônicas para elevar a concentração de CO_2 . Mandal et al. (2021) relatam que essas espécies conseguem manter a taxa fotossintética mesmo sob baixa disponibilidade de carbono, obtendo-o a partir do bicarbonato.

A redução das emissões de carbono por meio do uso de formas mais limpas de energia ainda é necessária, mas não é suficiente para atenuar a mudança climática (PERIDAS et al., 2021). Dessa forma, outras tecnologias necessitam ser pensadas a fim de colaborar com a mitigação dos efeitos do aquecimento global. Shanbhag et al. (2016) criaram de forma recombinante a partir de *E. coli* nanopartículas de enzimas que sintetizam a Anidrase Carbônica Bovina (BCA) que foi fundida com um peptídeo de automontagem P114 conectado por um GS-linker. As nanopartículas demonstraram a mesma funcionalidade das enzimas livres e apresentaram alta estabilidade em temperaturas elevadas, uma característica importante e desejável para a captura de CO_2 em temperaturas mais altas. Resultados promissores para aplicação pretendida de captura de CO_2 .

Quando se fala em captura e utilização de carbono, a bactéria *E. coli* é a pioneira para o desenvolvimento de novas tecnologias. Isso se dá devido sua facilidade de cultivo, sua alta taxa de crescimento e pelo amplo acervo de ferramentas genéticas disponíveis (JAJESNIAK et al., 2014). Essa bactéria prefere crescer em açúcares como a glicose e libera CO_2 como resíduo, no entanto, pesquisadores do *Weizmann Institute of Science in Rehovot*, de Israel, criaram, por meio de engenharia genética, uma variedade dessa bactéria que cresce consumindo CO_2 em vez de açúcares. Essas mudanças se deram por meio de alterações em onze genes (CALLAWAY, 2019) e necessitou de um ano para ocorrer e produzir autotrofia a partir da heterotrofia, o que é muito rápido, destacando a enorme plasticidade do metabolismo central de carbono de *E. coli* e levanta a questão de qual o número mínimo de mutações para realizar esse processo (ERB et al., 2019). Hu et al. (2021) salientam que as “estratégias para reforçar a fixação heterotrófica de CO_2 focam no aumento direto da carboxilação nativa e na criação de autótrofos artificiais”.

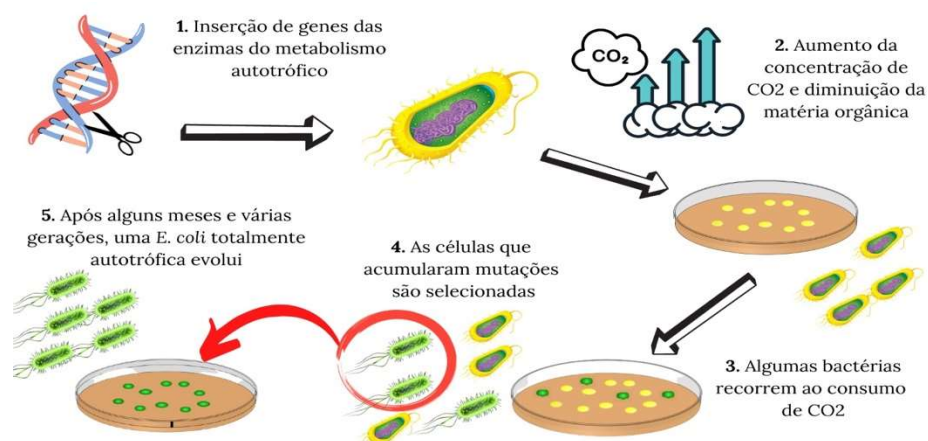


Figura 1: Resumo do processo de produção de autotrofia em *E. coli*. **Fonte:** Adaptado de Medrades (2020).

Gleizer et al. (2019) apontam que a cepa produzida utiliza o ciclo de Calvin-Benson-Bassham (CBB) para fixação do carbono e obtém energia por meio do formiato, molécula que pode ser produzida eletroquimicamente. Durante o processo, as células que acumularam mutações foram selecionadas e, após cultivo contínuo, uma *E. coli* completamente autotrófica evoluía, cujo carbono de sua biomassa era derivado apenas do CO₂ e do formiato. Abdullah (2021) menciona que em suas pesquisas a cepa modificada de *E. coli*, além de apresentar mudanças morfológicas, também recorreu ao consumo de CO₂ disponível e converteu-o nos nutrientes necessários, os quais geralmente são adquiridos através de outros recursos.

A remoção de carbono atmosférico é imprescindível para atingir as metas climáticas, quanto maior for o retardo para atingir esse objetivo, maior necessidade será acumulada para a remoção do carbono futuramente (PERIDAS et al., 2021). Dessa forma, esses organismos podem funcionar como substâncias biologicamente ativas em um biorreator de depuração de CO₂, diminuindo a concentração desse gás na atmosfera e contribuindo na redução do aquecimento global.

Microalgas

Nos últimos tempos, a emissão de CO₂ no planeta tem aumentado significativamente os gases de efeito estufa com consequências diretas na subida da temperatura global o que tem impactado muito na vida da população e para o meio ambiente em si. No entanto, este fato tem estimulado, por parte dos pesquisadores, o desenvolvimento de tecnologias eficazes para sua mitigação e nesta vertente, para Kassim et al. (2017) a captura e armazenamento de carbono usando processo biológico é uma das abordagens promissoras.

O biosequestro de carbono por microrganismos como microalgas é apontando como uma abordagem sustentável, amigável ao orçamento e vital ao meio ambiente para fazer face à questão do aumento das emissões de dióxido de carbono no planeta (KASSIM et al., 2017; YADAV et al., 2017; BANERJEE et al., 2020).

Microalgas são um grupo de microrganismos unicelulares de crescimento rápido e com capacidade de fixar CO₂ enquanto capturam energia solar com eficiência 10-50 vezes maior do que as plantas terrestres como consequência da lentidão da taxa de crescimento destas plantas (MONDAL et al., 2017). E com capacidade de fixação de CO₂ de até 1.83 kg de CO₂ em 1 kg de microalgas (JIN et al., 2020), o que as torna mais econômicas (KHAMOUSHI et al., 2020).

As microalgas consideradas autofototróficas, são os principais microrganismos fotossintéticos, no entanto, algumas espécies de microalgas possuem metabolismo heterotrófico e podem crescer em ambientes escuros e algumas cepas de algas são capazes de crescer mixotroficamente (ZHOUA et al., 2017). Para Dolganiuk et al. (2020), as microalgas podem crescer nas mais variadas condições pois não precisam de terras cultiváveis que possam entrar outros organismos, podem crescer em um sistema fechado flutuando no mar, não necessitam de controle de temperatura e demandam baixo custo de cultivo devido a disponibilidade de nutrientes dissolvidos no mar e sua mistura pelas ondas (ZAHED et al., 2021).

Adicionalmente, o uso de microalgas vem ganhando interesse significativo devido à sua capacidade

de utilizar CO₂ como fonte de carbono, através da fotossíntese, e a biomassa produzida pode ser usada como matéria-prima para outros produtos de valor agregado como biocombustíveis, produtos químicos (KASSIM et al., 2017), alimentos, produtos para animais e rações para aquicultura (BANERJEE et al., 2020). E, o biocombustível produzido por microalgas é conhecido como um recurso energético com um carbono neutro, e seu consumo pode reduzir até 50% das emissões de CO₂ em comparação com petrodiesel tradicional (MADADI et al., 2021).

Em um estudo conduzido por Kassim et al. (2017), envolvendo as algas *Chlorella sp.* e *Tetraselmis suecica* foi analisada a biofixação de CO₂ por estas espécies usando diferentes concentrações elevadas deste gás. O estudo indicou que ambas as microalgas apresentaram tolerância diferenciada para concentração de CO₂. A produção máxima de biomassa e biofixação para *Chlorella sp.* de 0,64gL⁻¹ e 96,89mgL⁻¹d⁻¹ foi obtido quando o cultivo foi realizado com 5 e 15% de CO₂, respectivamente. Em contrapartida, a produção máxima de biomassa e biofixação de CO₂ para *T. suecica* de 0,72gL⁻¹ e 111,26mgL⁻¹d⁻¹ foram obtidas a partir do cultivo utilizando 15 e 5% de CO₂. Em linhas gerais, este estudo sugere que *Chlorella sp.* e *T. suecica* são microorganismos eficientes que podem ser usados para biofixação de CO₂ e como matéria-prima para produção de produtos químicos. Este é um dos vários estudos recentes que vem defendendo o poder de fixação de CO₂ por microalgas tendo em vista a mitigação dos efeitos do aquecimento global.

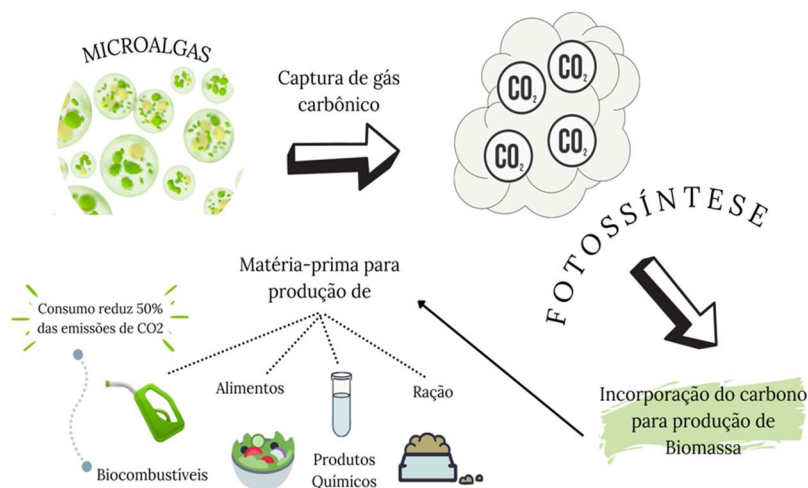


Figura 2: Biomassa de microalgas utilizada como matéria-prima. **Fonte:** Adaptado de: Kassim et al. (2017); Banerjee et al. (2020); Madadi et al. (2021).

Outro estudo empregou com sucesso a alga verde *C. vulgaris* na fitorremediação de efluentes petroquímicos e em simultâneo a produtividade lipídica (MADADI et al., 2021), o que demonstra as potencialidades destas algas para o bem-estar ambiental.

Árvores Geneticamente Modificadas

De fundamental importância para o planeta, as árvores contribuem para que os países atinjam 15 dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (TURNER et al., 2019). Elas atuam como sumidouro de dióxido de carbono e seu manejo diminui as emissões de gases do efeito estufa (DOMKE et al., 2020). Cerca de 2,6 bilhões de toneladas de dióxido de carbono liberado pela queima de combustíveis fósseis

é absorvido pelas florestas todos os anos¹.

Além de remover a poluição do ar, reduzir as temperaturas urbanas e gerenciar as águas pluviais (TURNER et al., 2019), as florestas atuam como força estabilizadora do clima e se apresentam como uma das soluções para mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

Entre os principais objetivos para melhorar o biossequestro terrestre se inclui aprimorar a incorporação de CO₂ atmosférico em biomassas vegetais. Esse processo é chamado de fitossequestro (JANSON et al., 2010). Por meio da engenharia genética, as plantas podem ser alteradas para que sejam capazes de enviar mais carbono às raízes, suportar o estresse do cultivo e produzir melhor bioenergia (JOSEPH et al., 2011).

As plantas geneticamente modificadas são plantas cujo material genético foi alterado (JOSEPH et al., 2011) e podem contribuir para melhorar o fitossequestro pela maximização da fotossíntese, aumentando a eficiência na recepção de luz e até mesmo aumentando a conversão de energia solar em biomassa (JANSON et al., 2010).

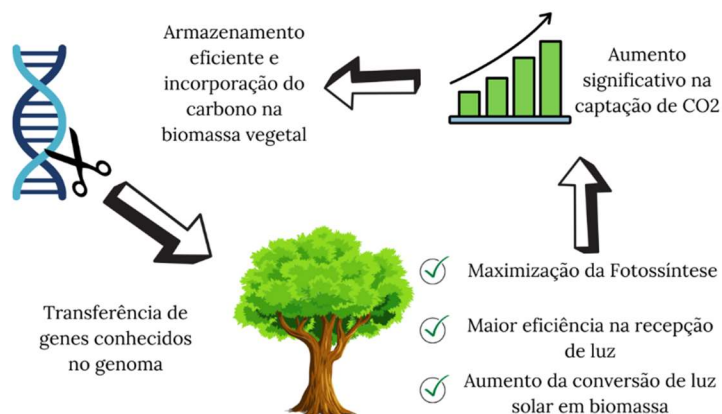


Figura 3: Captação de CO₂ por Árvores Geneticamente Modificadas. **Fonte:** Adaptado de: Janson et al. (2010); Joseph et al. (2011)

Para cooperar com a redução das emissões de gases de efeito estufa e para compensar parcialmente o desmatamento, o protocolo de Kyoto considerou explicitamente as atividades de reflorestamento e florestamento para contabilização do sequestro de carbono (IPCC, 2007). Esse fato é extremamente relevante do ponto de vista biotecnológico já que Joseph et al. (2011) apontam que florestas de árvores geneticamente modificadas podem sequestrar vários bilhões de toneladas de CO₂ atmosférico, aumentando substancialmente a quantidade de carbono que a vegetação extrairia naturalmente do ar.

O reconhecimento da importância das florestas na mitigação das mudanças climáticas levou os países a estudarem seus orçamentos de carbono florestal e ter uma iniciativa de aumentar e manter o sequestro de carbono dos ambientes florestais (KAUL et al., 2010). Buckeridge et al. (2002) apontam que o potencial de sequestro de carbono é muito maior nas florestas, onde a quantidade de biomassa é comparativamente muito maior. Já outro estudo realizado por Negi et al. (2003) sobre sequestro de carbono indica que o

¹ <https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/forests-and-climate-change>

processo pode depender de vários fatores, como condições climáticas, localização e atividades de manejo.

Em São Francisco, na Califórnia, uma Startup chamada *Living Carbon*, com objetivo de criar soluções para lidar com a mudança climática, faz uso de técnicas da biotecnologia para desenvolver árvores com maior capacidade de capturar o carbono da atmosfera e armazená-lo de forma eficiente². A tecnologia de modificação genética permite a utilização de características úteis de uma espécie em outra, rapidamente, por meio da transferência de genes conhecidos no genoma (JOSEPH et al., 2011). Janson et al. (2010) também mencionam que alternativas como aumentar a especificidade da enzima rubisco para o CO₂, que leva à diminuição da fotorrespiração ou melhorar a tolerância vegetal ao estresse biótico e abiótico também são possibilidades que podem contribuir de maneira significativa com a engenharia genética rumo a esse objetivo.

Além de serem grandes protagonistas no sequestro de carbono atmosférico, é sempre importante destacar o papel imprescindível que as árvores desempenham no controle do clima, na manutenção da umidade, na diminuição da poluição e sua atuação substancial na conservação da biodiversidade. Aumentar e manter as florestas é, portanto, uma solução essencial para as alterações climáticas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mediante a problemática do Aquecimento Global e seus efeitos catastróficos para o planeta, torna-se emergente a busca por soluções que visam minimizar os impactos dessa problemática. A biotecnologia, por meio das técnicas da engenharia genética é uma ferramenta que se mostra promissora para capturar o dióxido de carbono atmosférico, mitigando assim, os impactos ao meio ambiente.

Estudos recentes mostram que bactérias, microalgas e árvores geneticamente modificadas têm apresentado resultados satisfatórios nessa captura. No entanto, esse é um campo que ainda necessita ter suas potencialidades exaustivamente exploradas, para que futuramente possam ser usadas em larga escala.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, F. A.; IRWAN, J. N.; OTHMAN, N.; AL-GHEETHI, A. A.; SHAMSUDIN, S.. A systematic review on bio-sequestration of carbon dioxide in bio-concrete systems: a future direction. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, p.1-20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1713899>

ABDULLAH, M.. Synthetic biology for climate change: Applying modified carbon dioxide consuming *E. coli* tested in space to carbon scrubbing technology in space and on Earth. **Space4Youth Essay Competition**, 2021.

ASANOPOULOS, C. H.. **Characterising blue carbon: An assessment of soil carbon in temperate coastal wetlands**. Tese (Doutorado em Agricultura, Comida e Vinho) - University of Adelaide, Adelaide, 2020.

BANERJEE, I.; DUTTA, S.; POHRMEN, C. B.; VERMA, R.; SINGH, D.. Microalgae-based carbon sequestration to

mitigate climate change and application of nanomaterials in algal biorefinery. **Octa Journal of Biosciences**, v.8, n.2, p.129-136, 2020.

BHARTI, R. K.; SRIVASTAVA, S.; THAKUR, I. S.. Sequestration of carbon dioxide by microorganism and production of value added product. **Environmental Microbiology and Biotechnology**. Springer, p.235-249, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-7493-1_11

BRANCALION, P. H. S.; HOLL, K. D.. Guidance for successful tree planting initiatives. **Journal of Applied Ecology**, v.57, p.2349-2361, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13725>

BRANDL, P.; BUI, M.; HALLETT, J.P.; MAC DOWELL, N.. Beyond 90% capture: Possible, but at what cost?. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v.105, p.103-239, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103239>.

² <https://podcasts.apple.com/bb/podcast/startup-series-living-carbon/id1462776122?i=1000507697025>

BUCKERIDGE, M. S.; AIDAR, M. P. M.. Carbon sequestration in the rain forest: alternatives using environmentally friendly biotechnology. **Biota neotropica**, v.2, n.1, p.1-5, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1676-06032002000100002>

CALLAWAY, E.. Carbon dioxide-eating bacteria offer hope for green production. **Nature**, v.576, p.19, 2019.

CANTON, H.. International Energy Agency (IEA). In: **The Europa Directory of International Organizations 2021**. Nova York: Routledge, 2021. p. 684-686.

CHOI, Y. Y.; PATEL, A. K.; HONG, M. E.; CHANG, W. S.; SIM, S. J.. Microalgae Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS): an emerging sustainable bioprocess for reduced CO₂ emission and biofuel production. **Bioresource. Technology. Reports**. v.7, p.100-270, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100270>

DOLGANYUK, V.; BELOVA, D.; BABICH, O.; PROSEKOV, IVANOVA, A. S; KATSEROV, D.. Microalgae: a promising source of valuable bioproducts. **Biomolecules**, v.10, n.8, p.1153, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom10081153>

DOMKE, G. M.; OSWALT, S. N.; WALTERS, B. F.; MORIN, R. S.. Tree planting has the potential to increase carbon sequestration capacity of forests in the United States. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.117, p.24649-24651, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2010840117>

ERB, T. J; KELLER, P; VORHOLT, J. A.. Escherichia coli in Auto(trophic) Mode. **Cell**, v.179, p.1244-1245, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cell.2019.10.040>

GAYATHRI, R.; MAHBOOB, S.; GOVINDARAJAN, M.; GHANIM, K. A.; AHMED, Z.; MULHM, N.; VIJAYALAKSHMI, S.. A review on biological carbon sequestration: A sustainable solution for a cleaner air environment, less pollution and lower health risks. **Journal of King Saud University-Science**, Riade, v.2, p.33, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101282>

GLEIZER, S.; NISSAN, R.; ON, Y. M.; SHAMSHOUM, M.; EVEN, A.; MILO, R.. Conversion of Escherichia coli to Generate All Biomass Carbon from CO₂. **Cell**, v.179, p.1255-1263, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cell.2019.11.009>

HU, G.; LI, Z.; MA, D.; YE, C.; ZHANG, L.; GAO, C.; LIU, L.; CHEN, X.. Light-driven CO₂ sequestration in *Escherichia coli* to achieve theoretical yield of chemicals. **Nature Catalysis**, v.4, p.395-406, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41929-021-00606-0>

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

JANSON, C.; WULLSCHLEGER, S. D.; KALLURI, U. C.; TUSKAN, G. A.. Phytosequestration: Carbon Biosequestration by Plants and the Prospects of Genetic Engineering. **BioScience**, v.60, n.9, 2010, p.685-696. DOI: <http://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.6>

JAJESNIAK, P; ALI, H. E. M. O; WONG, T. S.. Carbon Dioxide Capture and Utilization using Biological Systems: Opportunities and Challenges. **Journal of Bioprocessing & Biotechniques**, v.4, n.3, 2014. DOI: <http://doi.org/10.4172/2155-9821.1000155>.

JIN, L. U.; YUANYUAN, Y. I.; JINTAO, X. U.. Forest carbon sequestration and China's potential: the rise of a nature-based solution for climate change mitigation. **China Economic Journal**, v.13, p.200-222, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/17538963.2020.1754606>

JIN, X.; GONG, S.; CHEN, Z.; XIA, J.; XIANG, W.. Potential Microalgal Strains for Converting Flue Gas CO₂ into Biomass. **Journal of Applied Phycology**, v. 33, p.47-55, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10811-020-02147-8>

JO, B. H.; KIM, I. G.; SEO, J. H.; KANG, D. G.; CHA, H. J.. Engineered Escherichia coli with Periplasmic Carbonic Anhydrase as a Biocatalyst for CO₂ sequestration. **Applied and Environmental Microbiology**, v.79, n.21, p.6697-6705, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1128/AEM02400-13>.

JOSEPH, B.; JUNI, D.; AJISHA, S.. Fight Global Warming with Genetically Altered Trees. **Asian Journal of Biotechnology**, v.3, n.4, 2011. DOI: <http://doi.org/10.3923/ajbkr.2011.337.344>

KASSIM M. A.; MENG, T.. Carbon dioxide (CO₂) biofixation by microalgae and its potential for biorefinery and biofuel production. **Science of the total environment**, v.584-585, p.1121-1129. 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.172>.

KAUL, M.; MOHREN, G. M. J.; DADHWAL, V. K.. Carbon storage and sequestration potential of selected tree species in India. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v.15, n.5, p.489-510, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9230-5>

KHAMOUSHI, A.; TAFAKORI, V.; ZAHED, M. A.; GAYGLOU, S. E.; ANGAJI, S. A.. Augmenting the expression of accD and rbcl genes using optimized iron concentration to achieve higher biomass and biodiesel in *Chlorella vulgaris*. **Biotechnol. Lett**, v.42, p.2631-2641, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10529-020-02973-3>

KHOSROABADI, F.; ASLANI, A.; BEKHRAD, K.; ZOLFAGHARI, Z.. Analysis of Carbon Dioxide capturing technologies and their technology developments. **Cleaner Engineering and Technology**, v.5, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100279>

MADADI, R.; ZAHED, M. A.; POURBABAEI, A. A.; TABATABAEI, M.; NAGHAVI, M. R.. Simultaneous phytoremediation of petrochemical wastewater and lipid production by *Chlorella vulgaris*. **SN Applied. Sciences**. v.4, p.1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04511-w>

MANDAL, A.; DUTTA, A.; DAS, R.; MUKHERJEE, J.. Role the intertidal microbial communities in carbono dioxide sequestration and pollutant removal: A review. **Marine Pollution Bulletin**, v.170, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112626>

MEDRADES, J.. A evolução biológica a favor da biotecnologia. **Profissão Biotec**, v.5, 2020.

MIKHAYLOV, A.; MOISEEV, N.; ALESHIN, K.; BURKHARDT, T.. Global climate change and greenhouse effect. **Entrepreneurship Sustainability Issues**, v.7, p.2897, 2020. DOI: [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))

MONDAL, M.; GOSWAMI, S.; GHOSH, A.; OINAM, G.; TIWARI, O. N.; DAS, P.; GAYEN, K.; MANDAL, M. K.; HALDER, G. N.. Production of biodiesel from microalgae through biological carbon capture: a review. **Springer**, v.7, n.99, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13205-017-0727-4>

PERIDAS, G. SCHMIDT, B. M.. The role of carbon capture and storage in the race to carbon neutrality. **The Electricity Journal**, v.34, n.7, p.1-5, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106996>

RACELIS, E. L.; RACELIS, D. A.; LUNA, A. C.. Carbon sequestration by large leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) plantation in Mount Makiling forest reserve, Philippines: a decade after. **Journal of Environmental Science and Management**, v.22, p.67-76, 2019.

SCHWEITZER, H.; AALTO, N. J.; BUSCH, W.; CHAN, D. T. C.; CHIESA, M.; ELVEVOLL, E. O.; BERNSTEIN, H. C.. Innovating carbon-capture biotechnologies through ecosystem-inspired solutions. **One Earth**, v.4, p.49-59, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.12.006>

SHANBHAG, B. K.; LIU, B.; FU, J.; HARITOS, V. S.; HE, L.. Self-Assembled Enzyme Nanoparticles for Carbon Dioxide Capture. **Nano Letters**, v.16, n.5, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b01121>

TURNER-SKOFF, B. J.; CAVENDER, N.. The benefits of trees for livable and sustainable communities. **Plants People Planet**, v.1, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1002/ppp3.39>

WANG, L.; LIU, Z.; JIANG, H.; MAO, X.. Biotechnology advances in β -carotene production by microorganisms.

Trends Food Science Technology, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.077>

WANG, R.; CHANG, S.; CUI, X.; LI, J.; MA, L.; KUMAR, A.; CAI, W.. Retrofitting coalfired power plants with biomass co-firing and carbon capture and storage for net zero carbon emission: a plant-by-plant assessment framework. **GCB Bioenergy**. v.13, p.143-160, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12756>

WANG, W.; BAI, J.; LU, Q.; ZHANG, G.; WANG, D.; JIA, J.; YU, L.. Pyrolysis temperature and feedstock alter the functional groups and carbon sequestration potential of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* derived biochars. **GCB Bioenergy**, 2021c. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12795>

WILBERFORCE, T.; BAROUTAJI, A.; SOUDAN, B.; ALAMI, A. H.; OLABI, A. G.. Outlook of carbon capture technology and challenges. **Science of the total environment**, v.657, p.56-72, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>

YADAV, G.; SEN, R.. Microalgal green refinery concept for biosequestration of carbon-dioxide vis-à-vis wastewater remediation and bioenergy production: Recent technological advances in climate research. **Journal of CO2 Utilization**, v.17, p.188-206, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.12.006>

ZAHED, M. A.; MOVEHED, E.; KHODAYARI, A.; ZANGENEH, S.; BADAMAKI, M.. Biotechnology for carbon capture and fixation: Critical review and future directions. **Journal of Environmental Science and Management**, v.293, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112830>

ZHOU, W.; WANG, J.; CHEN, P.; JI, C.; KANG, Q. L. B.; LI, K.; LIU, J.; RUAN, R.. Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.76, p.1163-1175, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.065>

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.