

A BIOTECNOLOGIA COMO INSTRUMENTO DE SEQUESTRO DE CARBONO: BACTÉRIAS, MICROALGAS E ÁRVORES GENETICAMENTE MODIFICADAS

Guilherme Augusto CARVALHO DE JESUS^{1*}; Mariana Fernandes ROCHA¹;
Esperança Edna Alexandre CHIBITE^{1,2}; Michele Harumi MOTOYAMA¹; Hélio
CONTE¹

¹Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.

²Universidade Licungo de Moçambique, Quelimane, Moçambique.

*Autor correspondente: guicajesus@gmail.com

RESUMO: 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 biossequestro 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 biossequestradores potenciais de carbono atmosférico.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia genética. *Escherichia coli*. Dióxido de carbono. Impactos ambientais. Aquecimento global.

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) (Oliveira, 2018).

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. As emissões destes gases têm aumentado substancialmente devido a atividades humanas. Como resultado, os ciclos biogeoquímicos têm sido significativamente perturbados (IEA, 2016).

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 (Soares; Oliveira, 2002).

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 (Matthews et al., 2014).

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 (Renner, 2004).

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).

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, resulta de 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 (IPPC, 2013).

Assim, são grandes responsáveis pelo sequestro de carbono indireto os seres fotossintetizantes, autótrofos como plantas, plânctons, algas marinhas e bactérias, já que utilizam a energia solar e o CO₂ para sintetizarem alimentos.

Trabalhos nessa área incluem o sequestro de CO₂ através da produção de biomassa seca, efetuada principalmente pelas microalgas aquáticas (Miao; Wu, 2004; Miao et al., 2004) e plantas terrestres, dentre estas, principalmente as componentes das florestas (Reijnders; Huijbregts, 2003; Pervaiz; Sain, 2003; Zhang; Xu, 2003).

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 e português, artigos completos, disponíveis gratuitamente e publicados entre 2002-2021. Ao todo, foram selecionados 35 artigos, obtidos por meio das Plataformas Capes, Scielo, Science Direct, e NCBI, os quais estão inclusos nesta revisão. Foram excluídos manuais, revistas e cartas ao editor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Escherischia coli

Biosequestro 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 bio-sequestro 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 (HCO₃). Verificou-se que essa enzima foi altamente expressa na bactéria recombinante, acelerando a formação de CaCO₃ 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.

Os processos de sequestro de carbono visam aprisionar o carbono por certo tempo com o objetivo de minimizar os impactos do aumento da temperatura global do planeta já que esse é um dos gases do efeito estufa (Barreto; Freitas; Paiva, 2009). Com essa finalidade, 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 CO₂ em temperaturas mais altas. Resultados promissores para aplicação pretendida de captura de CO₂.

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; Ali; Wong, 2014). Essa bactéria prefere crescer em açúcares como a glicose e libera CO₂ 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 CO₂ 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; Keller; Vorholt, 2019).

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. 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 e Meng (2017) a captura e armazenamento de carbono usando processo biológico é uma das abordagens promissoras.

O biossequestro de carbono por microrganismos como microalgas, é apontando como uma abordagem sustentável, amigável ao orçamento e vital ao meio ambiente para fazer face a questão do aumento das emissões de dióxido de carbono no planeta (Kassim; Meng, 2017; Yadav; Sen, 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). Para Jajesniak, et al (2014), a eficiência fotossintética das microalgas fica em torno de (~ 11–20%), que é mais do que as plantas terrestres (~ 1–2%). 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 (Zhou et al., 2017).

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 e produtos químicos (Kassim; Meng, 2017), alimentos, produtos para animais e rações para aquicultura (Banerjee et al., 2020)

Em um estudo conduzido por Kassim e Meng, (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 0,64g/L-1 e 96,89mg/L-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 0,72g/L-1 e 111,26mg/L-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 microrganismos 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.

Árvores Geneticamente Modificadas

As árvores desempenham um papel importante como sumidouro de dióxido de carbono, e, além disso, seu manejo diminui as emissões de gases do efeito estufa (Negi, et al., 2003; Domke, et al., 2020). O processo ocorre durante a fotossíntese, onde o CO₂ atmosférico é utilizado pelas folhas para a produção de energia na forma de glicose. (Negi, et al., 2003). Altas concentrações de CO₂ podem atuar como um fertilizante na floresta, estimulando o crescimento e acelerando desenvolvimento da mesma (SILVA, 2014).

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 fitosequestração (JANSON, et al., 2010). Por meio da engenharia genética, as plantas podem ser alteradas para que consigam enviar mais carbono às raízes, suportar o estresse do cultivo e produzir melhor bioenergia (JOSEPH; JINI; AJISHA, 2011).

As plantas geneticamente modificadas são plantas cujo material genético foi alterado (JOSEPH; JINI; AJISHA, 2011) e podem contribuir para melhorar a fitosequestração 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)

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, Jini e Ajisha (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; Mohren; Dadhwal, 2010). Buckeridge e Aidar (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 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 eficiente (My Climate Journey, 2020). 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; JINI; AJISHA, 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.

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.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos e familiares por todo o apoio, que muito contribuiu para a realização deste trabalho. Agradecemos à Universidade Estadual de Maringá por ter oferecido todo suporte e ferramentas necessárias, em especial, ao professor Hélio Conte que esteve sempre disponível e solícito durante o processo de confecção dessa revisão.

BIOTECHNOLOGY AS A TOOL FOR CARBON SEQUESTRATION: BACTERIA, MICROALGAE AND GENETICALLY MODIFIED TREES

ABSTRACT: 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.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, F. A. et al. A systematic review on bio-sequestration of carbon dioxide in bio-concrete systems: a future direction. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**. Fev. 2020, doi 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. Disponível em: <Space4Youth_Mahlak_Abdullah (unoosa.org)> Acesso 18 nov. 2021.

BANERJEE et al. Microalgae-based carbon sequestration to mitigate climate change and application of nanomaterials in algal biorefinery. 2020. **Octa J. Biosci.** Vol. 8 (2):129-136, ISSN 2321-3663

BARRETO, L. V; FREITAS, A. C. S; PAIVA, L. C. **Carbon sequestration**. Centro Científico Conhecer, Goiânia-GO, Enciclopédia Biosfera, n. 7, 2009, ISSN 1809.058351

BUCKERIDGE, Marcos S.; AIDAR, Marcos PM. Carbon sequestration in the rain forest: alternatives using environmentally friendly biotechnology. **Biota neotropica**, v. 2, n. 1, p. 1-5, 2002.

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

DOMKE, Grant M. et al. 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, n. 40, p. 24649-24651, 2020.

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

GLEIZER, S. et al. Conversion of *Escherichia coli* to Generate All Biomass Carbon from CO₂. **Cell**, v. 179, p. 1255-1263, nov. 2019, doi 10.1016/j.cell.2019.11.009

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). **Recent trends in the OECD: energy and CO₂ emissions**. 11p, 2016. Disponível em: Acesso em: 21 nov. 2021.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMA CHANGE). **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. Hayama. Institute for Global Environmental Strategies, 2013.

JANSSON, C. et al. Phytosequestration: Carbon Biosequestration by Plants and the Prospects of Genetic Engineering. **BioScience**, v. 60, ed. 9, out. 2010, p. 685-696, doi 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 10.4172/2155-9821.1000155.

JO, B. H. et al. Engineered *Escherichia coli* with Periplasmic Carbonic Anhydrase as a Biocatalyst for CO₂ sequestration. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 79, n. 21, nov. 2013, p. 6697-6705, doi 10.1128/AEM02400-13.

JOSEPH, B. JUNI, D. AJISHA, S. Fight Global Warming with Genetically Altered Trees. **Asian Journal of Biotechnology**, v. 3, ed. 4, 2011, p. 337-344; doi 10.3923/ajbkr.2011.337.344

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

KAUL, Meenakshi; 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.

MATTHEWS, H. D.; GRAHAM, T.L.; KEVERIAN, S.; LAMONTAGNE, C.; SETO, D. & SMITH, T. National contributions to observed global warming. **Environmental Research Letter**, v. 9, p. 1-9. 2014.

MIAO, X. & WU, Q. High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*. **Journal of Biotechnology**, v. 110, p. 85- 93, 2004.

MIAO, X., WU, Q. & YANG, C. Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 71(2), 855-863, 2004.

MONDAL et al (2017) Production of biodiesel from microalgae through biological carbon capture: a review; **springer**. 2017. 7:99; doi 10.1007/s13205-017-0727-4

MY CLIMATE JOURNEY. Startup Series: Living Carbon, 23 de julho de 2020. Disponível em: <<https://www.myclimatejourney.co/ctss-episodes/living-carbon>>. Acesso em: 05 dez. 2021.

NEGI, J. D. S.; MANHAS, R. K.; CHAUHAN, P. S. Carbon allocation in different components of some tree species of India: a new approach for carbon estimation. **Current Science**, v. 85, n. 11, p. 1528-1531, 2003.

OLIVEIRA, Daniele Costa de. **Potencial de sequestro de carbono no solo e dinâmica da matéria orgânica em pastagens degradadas no Brasil**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PERVAIZ, M.& M. SAIN. “Carbon Storage Potential in Natural Fiber Composites.” **Resources, Conservation and Recycling**, 39 (4): 325–340, 2003.

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, n. 1, p. 67-76, 2019.

REIJNDERS, L., HUIJBREGTS, M.A.J. Choices in calculating life cycle emissions of carbon containing gases associated with forest derived biofuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, p. 527-532, 2003.

RENNER, R. M. **Sequestro de Carbono e viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

SHANBHAG, B. K. et al. Self-Assembled Enzyme Nanoparticles for Carbon Dioxide Capture. **Nano Lett**, n. 16, 2016, p. 3379–3384, doi 10.1021/acs.nanolett.6b01121

SILVA, Cléssio Gomes da. **Influência da alocação de carbono e nitrogênio na produção de biomassa em híbridos de Populus**. 2014.

SOARES, C. P. B. & OLIVEIRA, M. L. R. Equations to estimate the amount of carbon in the aerial part of eucalyptus trees in Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 534-539, 2002.

SOLOMON, Susan. IPCC (2007): Climate change the physical science basis. **Agu fall meeting abstracts**. 2007. p. U43D-01.

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. 2017. **Journal of CO2 Utilization**. 17:188-206. [//doi.org/10.1016/j.jcou.2016.12.006](https://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.12.006)

ZHANG, X. Q. & XU, D. Potential carbon sequestration in China's forests. **Environmental Science and Policy**, v. 6, p. 421-432, 2003.

ZHOUA et al. Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. 2017. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 76. 1163–1175. doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.065