

## A utilização das tecnologias de emissões negativas e seu potencial nas ciências biomédicas

Ananda Alvim Fernandes<sup>1</sup>, Arylaine Roberta Axiotis Galdino<sup>2</sup>, Maria Rita Ferreira dos Santos<sup>3</sup>, Anna Lígia de Castro Figueiredo<sup>4</sup>, Mário Mardone da Silva<sup>5</sup>, Caio César da Silva Guedes<sup>6</sup>, Vanessa Silva de Almeida<sup>7</sup>, Luiz da Silva Maia Neto<sup>\*8</sup>

<sup>1</sup>Bacharel em Biomedicina, Centro Universitário Brasileiro, Brasil.

<sup>2</sup>Bacharel em Biomedicina, Centro Universitário Brasileiro, Brasil.

<sup>3</sup>Bacharel em Biomedicina, Centro Universitário Brasileiro, Brasil.

<sup>4</sup>Doutora em Medicina Tropical, Centro Universitário Brasileiro, Brasil.

<sup>5</sup>Mestre em Engenharia de Produção, Centro Universitário Brasileiro, Brasil.

<sup>6</sup>Doutor em Ciências Biológicas, Centro Universitário Brasileiro, Brasil.

<sup>7</sup>Mestre em Morfotecnologia, Centro Universitário Brasileiro, Brasil.

<sup>8</sup>Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Centro Universitário Brasileiro, Brasil. (\*Autor correspondente: luiz.silva@grupounibra.com)

*Histórico do Artigo:* Artigo avaliado e aprovado por comitê específico e indicado para publicação pelo Núcleo de Pesquisa e Extensão do Centro Universitário Brasileiro.

### RESUMO

Após a revolução industrial as emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE) vêm aumentando exponencialmente. A ação antropogênica é a principal causa deste aumento, devido ao desmatamento, queimadas, queima de combustíveis fósseis, entre outras. A elevação da concentração destes gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) na atmosfera promove o aquecimento global gerando episódios climatológicos extremos e instáveis; além de resultar em uma má qualidade do ar que interfere diretamente na saúde humana. O objetivo deste trabalho consiste na análise de tecnologias de emissões negativas (NETs) e seu potencial na mitigação do aquecimento global, utilizando como alicerce um fluxograma com base na busca de artigos em plataformas como Science Direct e Pubmed. De acordo com os artigos selecionados, foi observada a eficácia de métodos como reflorestamento que teve a remoção de aproximadamente 5 kg CO<sub>2</sub> por árvore anualmente; enquanto o intemperismo aprimorado utilizando a olivina teve a capacidade de remoção de 2,7 t olivina por t CO<sub>2</sub> e o basalto de em média 0,5-2 Gt CO<sub>2</sub><sup>-1</sup>; o método de captura direta do ar teve sua capacidade de remoção de aproximadamente 52% e 90% a depender da temperatura e da umidade; as aplicações BECCS possuem seis instalações ativas capturando aproximadamente 1,7 Mt CO<sub>2</sub> por ano. A NET que se mostrou mais eficiente foi a BECCS, entretanto suas limitações devem ser levadas em consideração. Desta forma, essas tecnologias fornecem uma solução viável, mas não autossuficientes para a mudança do atual cenário climático.

**Palavras-Chaves:** Aquecimento global, Combustíveis fósseis, Energia.

## The use of negative emission technologies and their potential in biomedical sciences

### ABSTRACT

The industrial revolution like greenhouse gases is increasing exponentially. Anthropogenic action is the main cause of this increase, deforestation, fires, due to the burning of fossil fossils, among others. The promotion of the concentration of these gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O in the promotion of the atmosphere or global emission) causes climatic and unstable damages; in addition to resulting in a higher quality that directly interferes with human health. The work of this work consists of denial technologies (NETs) and their mitigation potential in global search, using as a license a flowchart based on articles on platforms such as Science Direct and Pubmed. According to the determination of the selected methods, agreement was observed with the removal methods such as reforestation of 5 kg CO<sub>2</sub> for approximately; while improved weathering using olivine had the ability to remove 2.7 t olivine per t CO<sub>2</sub> and basalt an average of 0.5-2 Gt CO<sub>2</sub><sup>-1</sup>; the method of direct capture of its removal capacity and approximately 90% depends on temperature and humidity; BECCS applications have six active installations capturing approximately 1.7 Mt CO<sub>2</sub> per year. The NET that proved to be the most efficient was BECCS, although its characteristics must be taken into account. In this way, these technologies offer a viable but not self-sufficient solution to the changing climate scenario.

**Keywords:** Global warming, Fossil fuels, Energy.

Fernandes, AA et al. utilização das tecnologias de emissões negativas e seu potencial nas ciências biomédicas. *Revista Universitária Brasileira*. 2023; 1(1): 36–59.



## 1. Introdução

O efeito estufa é um fenômeno natural responsável por manter a temperatura terrestre em condições habitáveis. Este evento é regulado pelas concentrações de gases presentes na atmosfera, tais como: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), enxofre (SO<sub>2</sub>). Sendo assim, o aumento nos níveis desses gases contribui para o aquecimento global<sup>1</sup>.

Diferentes fenômenos são capazes de emitir gases poluentes, grande parte apresenta caráter antrópico, incluindo: o uso de fertilizantes (i), desmatamento (ii) e matriz e demanda energética (iii). Essas emissões e sua falta de controle abrangem consequências notáveis em diversos aspectos ambientais como derretimento das calotas, geleiras; aumento do nível dos oceanos; inundações; secas severas; ilhas de calor; também pode desencadear impactos negativos na produção de alimento e no abastecimento de água potável<sup>2</sup>.

Além dos problemas ambientais, a poluição atmosférica promove consequências significativas para a homeostasia humana, visto que à exposição a altas concentrações desses gases resultam complicações respiratórias, oculares, cardíacas, cerebrais, ósseas, dermatológicas e entre outras<sup>3</sup>.

Dentre os gases associados com o aquecimento global destaque-se o CO<sub>2</sub>, visto que esse fluido vem sendo abundantemente emitido nas últimas décadas. Ainda com o aumento da globalização a emissão tornou-se progressiva e acelerada. Dessa forma, as altas concentrações atmosféricas desse gás têm desencadeado repercussões ambientais gravíssimas que interferem diretamente na saúde humana<sup>4</sup>. Por tanto, novas tecnologias capazes de regular os níveis desse gás precisam ser desenvolvidas.

Dentro desse contexto, as tecnologias de emissões negativas (NETs) têm se destacado nos últimos anos mediante a mitigação de gases de efeito estufa (GEE) através de soluções naturais e tecnológicas que reduzem a carga de CO<sub>2</sub> atmosférico. Contudo, estas tecnologias são métodos elementares aplicados para cumprir a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) estabelecidas por cada país pelos atuais acordos climáticos. A busca por pesquisas nessa área pode auxiliar para a realização e aperfeiçoamento destas técnicas. Sendo assim, as NETs apresentam-se como um forte candidato para a redução da poluição atmosférica<sup>5</sup>.

Desta forma, este estudo tem por objetivo descrever o potencial das tecnologias de emissões negativas como uma solução para a redução do aquecimento global e suas consequências, promovendo a melhoria da qualidade do ar.

## 2. Material e Método

Esse trabalho é uma análise descritiva e qualitativa com ênfase no impacto da emissão do CO<sub>2</sub> no degelo do permafrost, mostrando suas casualidades e efeitos. Para o desenvolvimento do trabalho a metodologia adotada teve como base pesquisas bibliográficas nas temáticas de: *greenhouse effect, global warming, air quality, permafrost, energy sources and fuels, carbon negative technology, applications of captured CO<sub>2</sub>*. Além do mais, foram empregados como critérios de inclusão artigos publicados nos últimos cinco anos na independentemente do idioma, utilizando como base de dados o ScienceDirect e Pubmed buscando pelas palavras-chave: efeito estufa e aquecimento global, qualidade do ar e saúde humana, permafrost e saúde humana.

## 3. Desenvolvimento

### 3.1 Efeito estufa e aquecimento global

O aumento significativo dos gases presentes na composição atmosférica vem interferindo no equilíbrio do efeito estufa, induzindo o aquecimento global<sup>6</sup>. A luz do sol ao entrar em contato com a superfície terrestre a transforma em infravermelho a qual será absorvida pelo excesso de gases de efeito estufa presentes na

atmosfera. Diante do cenário do século 21, as mudanças climáticas acarretadas pela exacerbação de emissão de GEE pela queima de combustíveis fósseis para atender a demanda energética, agropecuária, desflorestamento e atividades industriais ocasionam alterações extremas nas condições meteorológicas, contribuindo para o alto risco de degelo em regiões de permafrost pelo aumento de 3 e 5°C, elevação do nível do mar e episódios climatológicos extremos que repercutem na saúde humana e no meio ambiente<sup>7</sup>.

A atmosfera terrestre transforma a luz solar visível (ultravioleta) em luz infravermelha (IR) que ao entrar em contato com os GEE deixam a terra mais lentamente, absorvendo mais calor, pois estas moléculas vibram produzindo distribuições assimétricas de carga elétrica, causando o aquecimento da atmosfera. Em contraste, gases não-estufa não absorvem luz infravermelha, visto que têm distribuições de carga simétrica durante a vibração. O aumento da temperatura atmosférica tende a reabsorver mais luz infravermelha antes que a energia retorne ao espaço.

Há uma relação diretamente proporcional entre o crescimento da população e a elevada demanda energética acarretando elevados níveis de exposição ao calor devido ao aquecimento global, observadas pelas previsões feitas por meio dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP). Estima-se que até o final do século 21 a população seja composta por 10,9 bilhões de indivíduos e 68% dessas pessoas residam em áreas urbanas, propiciando assim a ampliação de ilhas de calor. Dentre alguns modelos climáticos analisados por Klein, Andereg, (2021) a emissão dos gases de efeito estufa terá o acréscimo de 48-74%, o qual irá interferir na temperatura média mensal até 2090 que será de aproximadamente 30° C à 40°C, visando um aumento de 2,4°C<sup>6</sup>.

Um dos fatores que contribuem para o aquecimento global é a extração e queima de combustíveis fósseis, o qual as empresas petrolíferas emitem um terço de todas as emissões de GEE. Os gases que absorvem mais radiação e interferem no equilíbrio térmico atmosférico são: o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>), entre outros. Apesar de sua magnitude ser variada a interação desses poluentes na atmosfera terrestre induz consequências significativas para a saúde humana<sup>9</sup>.

A queima de combustíveis fósseis resulta na oxidação do carbono como a maior fonte de emissão de CO<sub>2</sub>, este fenômeno está diretamente relacionado a vários processos em usinas de energia, refinarias de petróleo e conveniências industriais. A principal estratégia utilizada por essas empresas baseia-se na agnôgnese comprovando a convergência cronológica ambiental e empresarial na construção da ignorância culturalmente induzida, a qual auxilia a compreender os feedbacks históricos diante do aquecimento global<sup>9</sup>.

O Banco de Dados de Emissões para Pesquisa Atmosférica Global (EDGAR) foi criado com o objetivo calcular meticulosamente as emissões de GEE (com ênfase no CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) e outros gases fluorados em todos os países, realizando o orçamento global de carbono. Após o Acordo de Paris diversos países estipularam metas para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C. Além disso, Estados Membros da União Européia (UE27) e o Reino Unido determinaram o engajamento de tornar suas economias neutras em carbono até 2050<sup>10</sup>.

O Brasil emitiu 1.265 Mt (megatonelada) CO<sub>2eq</sub> no ano de 2015 devido ao aumento do consumo mundial de combustíveis fósseis, observada principalmente em economias industriais em desenvolvimento. A principal fonte de emissão de CO<sub>2</sub> é a combustão correspondendo a 84-87% de CO<sub>2</sub> global, contudo, outras fontes como a indústria de cimento (5% de emissão de CO<sub>2</sub>), produção e transformação de combustíveis (5%), a indústria química (3%) e a produção de aço (1%) também contribuem para este processo<sup>10</sup>.

### 3.2 Qualidade do ar

A qualidade do ar é um problema de saúde pública global, onde a ação antrópica influenciada pelo crescimento econômico e alta demanda energética produz uma quantidade exorbitante de resíduos que ao entrarem em contato com o nosso organismo resultam em implicações fisiológicas que atingem diferentes sistemas, acarretando em doenças respiratórias, coronarianas, infecciosas e alterações psicológicas, contribuindo para aproximadamente um quarto das mortes por acidente vascular cerebral (AVC) ou isquemia<sup>11</sup>.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) certificou que 91% da população habita áreas onde a qualidade do ar é irrisória e 43% das mortes totais pela doença obstrutiva crônica do pulmão (DPOC) estão relacionadas com a contaminação do ar<sup>12</sup>.

Os poluentes ao entrarem em contato com o sistema ocular interagem com a córnea, material lacrimal e componente conjuntivos. Outros impactos motivados pela má qualidade do ar são a inflamação do couro cabeludo, formação sebácea e queda de cabelo que ocorre devido à interação destes agentes com os pelos e com a pele induzindo infecções e alterações do pH. O tecido nervoso também será afetado por agentes pró-oxidativos emitidos pelas queimas de combustíveis fósseis, interferindo na memória, redução do QI, da capacidade cognitiva e no envelhecimento do cérebro<sup>13</sup>.

A hipercapnia (elevação da pressão arterial de CO<sub>2</sub>) é causada pela inalação de altas concentrações de CO<sub>2</sub> que pode levar a óbito. Estudos relatam que respirar ar com CO<sub>2</sub> elevado pode ter um impacto negativo no raciocínio e nas habilidades mentais de uma pessoa<sup>14</sup>.

As crianças formam um grupo extremamente sensível a emissão desses GEE e as mudanças climáticas, que induzem uma amplitude térmica e temperatura média diária altamente variada, tornando-as mais vulneráveis à morbidade respiratória dada seu maior índice de ventilação, desenvolvimento do sistema imunológico e respiratório e vias aéreas periféricas pequenas. A baixa capacidade dessas crianças de preservar o equilíbrio térmico interno frente ao estresse térmico contribui para a maior incidência de rinite alérgica e asma<sup>7</sup>.

A interação entre a poluição do ar, mudanças climáticas e aeroalérgenos como o pólen tem sido associada à degeneração da mucosa das vias aéreas por depuração mucociliar induzindo assim a maior produção de imunoglobulinas (IgE). A absorção desses contaminantes na superfície dos grãos de pólen modifica sua morfologia e composição modulando assim a liberação de alérgenos e a absorção de proteínas polínicas pelas partículas suspensas no ar, favorecendo o aumento de casos de alergias e asma<sup>7</sup>.

### 3.3 Permafrost

O Permafrost (pergissolo) é o subsolo, rocha ou sedimento localizado em regiões de alta latitude que permanece abaixo de 0°C por pelo menos por dois anos consecutivos. O pergissolo possui uma camada transitória superior que pode ser reduzida entre 37% a 81% de acordo com as taxas de aquecimento, enquanto a camada mais profunda é congelada por milhares ou centenas de anos. O degelo desta estrutura acarreta consequências climáticas em escala global, interferindo nos fluxos biogeoquímicos, afetando o ciclo do carbono e a fixação do CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, entre outros gases. Gerando o feedback positivo em que o permafrost torna-se uma fonte emissão de GEE, de doenças infecciosas zoonóticas ou mesmo da liberação de vírus de DNA patogênico armazenado neste subsolo devido ao aprofundamento da camada ativa<sup>15</sup>.

O solo congelado em todo o mundo contém cerca de 1.500 bilhões de toneladas de carbono – o dobro do que está contido na atmosfera e metade do carbono total do solo do mundo. Durante o verão, o derretimento do gelo faz com que a quantidade de carbono emitida na atmosfera aumente e a água do mar absorva mais calor solar<sup>16</sup>.

Em 2016 na península de Yamal, no Ártico russo o degelo deste subsolo expôs renas infectadas pelo patógeno bacteriano *Bacillus anthracis* (uma bactéria aeróbia que produz esporos metabolicamente inativos em ambientes anaeróbios, gerando toxinas que levam a ruptura dos revestimentos dos vasos sanguíneos resultando no vazamento de fluidos), liberou esporos de antraz resultando na morte de um menino de 12 anos, hospitalização de cerca de 100 pessoas, diagnósticos laboratorialmente positivos de antraz em 36 pacientes e na morte de 2.300 renas. De acordo com as previsões de vários modelos climáticos, não haverá gelo no verão no Ártico na década de 2030 mediante a atual taxa de emissão de carbono, sendo uma tendência irreversível<sup>17</sup>.

A vacina é o método preventivo mais econômico, porém, a maioria dos vírus de RNA e zoonoses emergentes não possui vacinas com eficácia satisfatória. Um estudo recente encontrou 33 populações virais

representando 4 gêneros conhecidos e 28 novos gêneros virais de gelo de cerca de 15.000 anos nas geleiras do planalto tibetano. A temperatura influencia na atividade viral e geralmente é inversamente proporcional ao tempo de sobrevivência viral<sup>18</sup>.

### 3.4 Uso de combustíveis fósseis e energias renováveis

Não há obrigatoriedade explícita entre os membros comprometidos com o Acordo de Paris vinculados à restrição da produção de combustíveis fósseis. Porém, para o cumprimento da meta estabelecida a qual impede o aumento da temperatura global de 2°C em relação à era pré-industrial, faz-se necessário a redução de aproximadamente um quarto do investimento da extração e conversão de combustíveis fósseis ao longo de duas décadas<sup>19</sup>.

O uso de energia por unidade de produção é denominado intensidade energética, um dos indicadores do desenvolvimento sustentável que não afeta o progresso econômico. Para lograr um país de baixo carbono e desagregar o avanço econômico do uso de energia é crucial melhorar a intensidade energética, proporcionando a conservação dos recursos naturais, segurança energética e baixo custo de produção. Diferentes subsídios podem ter efeitos opostos. Alguns aumentam a eficiência energética, incentivando a economia de energia; outras interferem de forma negativa incentivando maior consumo devido ao baixo custo capital. Diversos países em desenvolvimento não estão cumprindo seus critérios de intensidade energética, atendendo a maior taxa de consumo de energia, apesar da baixa eficiência energética e elevados subsídios inoperantes<sup>20</sup>.

A demanda global de eletricidade dobra a cada 14,5 anos. O carvão corresponde a cerca de 39% da produção global de energia elétrica e 23% ao gás natural. A diminuição da demanda por energia de combustível fóssil e emissões relacionadas tem sido prioridade na política climática, negligenciando manifestações a ofertas que limitariam a exploração, extração ou transporte de combustíveis fósseis. Os governos dispõem mais de 50% da manufatura global de combustíveis fósseis através de participações preponderantes em empresas produtoras nacionalizadas. As diretrizes existentes propendem a serem complacentes e eletivas, em vez de obrigatórias. Uma dinâmica adequada integra a atenuação de subsídios à produção<sup>14</sup>.

Os créditos concedidos a projetos que reduzem suas emissões de GEE são denominados Comercialização de Reduções Certificadas de Emissões (CERs), são comercializados no mercado de ações como anuência para emitir níveis superiores de GEE. No Brasil estes créditos de carbono são concedidos graças a B3 - Bolsa Brasil Balcão que registra as emissões de biocombustíveis negocia e solicita a aposentadoria dos créditos de descarbonização (CBIO)<sup>21</sup>.

Embora o processo de obtenção de energia baseados em combustíveis fósseis seja considerado uma alternativa acessível e de baixo custo, os danos ambientais ocasionados por estas metodologias são abundantes. Além disso, o provável esgotamento dos combustíveis fósseis, e as limitações dos recursos os quais contribuem para a elevação dos preços requerem atenção global para opções sustentáveis como os biocombustíveis. Existem quatro gerações de biocombustíveis: a primeira é derivada de culturas de açúcares, amido e óleos vegetais; a segunda é proveniente de diversos tipos de biomassa; a terceira aplica intervenções de biologia molecular na produção de biomassa para aumentar sua eficiência; e a quarta busca por armazenamento de gás carbônico nas estruturas vegetais<sup>21</sup>.

O uso de combustíveis fósseis esgota o teor de O<sub>2</sub> da atmosfera, entretanto o hidrogênio obtido através do processo de eletrólise (hidrogênio verde) impossibilita esse esgotamento. A água consumida na eletrólise é reproduzida quando o hidrogênio é oxidado não afetando os recursos globais de O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. A implantação da tecnologia de hidrogênio verde requer a instalação de fontes de energia renovável, eletrolisadores, armazenamento subterrâneo de hidrogênio, infraestruturas de gasoduto e transportadores de hidrogênio. Vazamentos de hidrogênio na atmosfera são esperados, o qual influenciará nas concentrações atmosféricas de metano, ozônio e vapor d'água. Questões técnicas, de custo e institucionais dificultam a propagação de energia do hidrogênio<sup>22</sup>.

As usinas nucleares são consideradas uma opção viável de energia devido ao baixo custo do combustível nuclear, entretanto há empecilhos que limitam a ampliação desta energia como: o elevado custo de capital dos reatores; o descarte de resíduos nucleares; e o risco de segurança. Michaelides; Michaelides (2020) propôs um sistema energético híbrido industrial com interações térmicas, químicas, elétricas, mecânicas, de hidrogênio e de informação formado por reatores nucleares, turbinas eólicas, energia solar fotovoltaica e térmica; visto que a energia eólica é inconstante e a irradiância solar é sazonal. Um dos obstáculos a ser enfrentado com a adesão da energia nuclear é o aumento do custo da energia elétrica, pois durante o processo de armazenamento e regeneração elétrica existe uma redução de 50% na eficiência na sua retenção<sup>23</sup>.

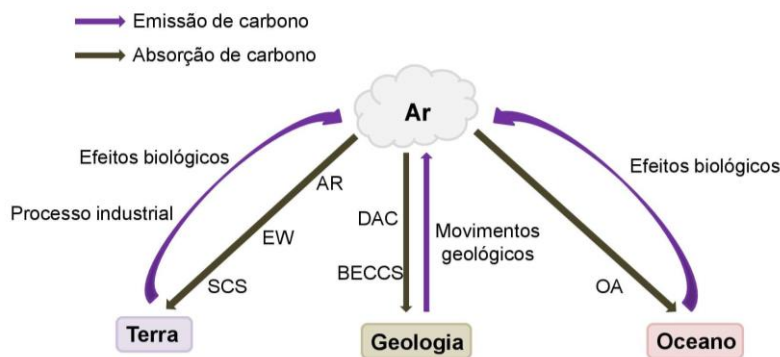
As instalações fotovoltaicas (PV) geram energia somente durante o dia (período de baixa demanda energética). Quando há uma produção superior de carga elétrica total por PV, há uma queda na demanda de energia de fontes não solares de produção contínua. A energia eólica durante a alta corrente de vento também reduz o consumo de energia para unidades não eólicas, impossibilitando sua captação, sendo assim dissipada. As soluções seriam: ofertar precificação horária de energia; apoiar fontes que podem ser ligadas e desligadas rapidamente; planejar sistemas de depósito utilitários. Sistemas de retenção de energia são hidráulicos bombeados e de produtos químicos. Sistemas de bateria são operados em menor escala para conservação diurna, mas são inapropriados para conservação estacional e em altos níveis. O hidrogênio também foi proposto para a reserva de energia em residências<sup>24</sup>.

### 3.5 Tecnologia de emissão negativa (NETs)

As tecnologias que visam evitar mudanças climáticas têm como modelo a implantação do carbono neutro, onde a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por determinado processo será igualmente absorvida por diferentes vias; ou será aplicado o modelo de carbono negativo com o propósito de remover concentrações maiores de CO<sub>2</sub> das quais foram emitidas<sup>25</sup>.

Tecnologias de Emissões Negativas (NETs) (Figura 1), são tecnologias verdes que dependem de diferentes vias físicas, químicas ou biológicas para remoção líquida de GEEs da atmosfera e armazenamento em sumidouros oceânicos e terrestres. A implantação em larga escala de NETs é influenciada por: pegada da terra, pegada hídrica, custo, demanda de energia, potencial de remoção de CO<sub>2</sub> (CDR), aspectos socioeconômicos, heterogeneidade de recursos regionais, interdependências tecnológicas<sup>26</sup>.

**Figura 1.** Esquema da Tecnologia de Emissões Negativa  
**Figure 1.** Negative Emissions Technology Scheme



Fonte: Autores  
 Source: Authors

Há diversas alternativas de NETs desde as que ampliam os sumidouros de carbono, até o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>. Algumas opções são: reflorestamento (AR); intemperismo aprimorado (EW); captura direta de ar (DAC); captura e armazenamento de carbono (CCS); bioenergia com captura e armazenamento de carbono. Entretanto a implantação de NETs pode levar ao aumento do consumo de energia e dos custos operacionais (BECCS)<sup>25</sup>.

### 3.5.1 Reflorestamento

O carbono armazenado no solo das florestas tropicais, na biomassa viva e em decomposição compõe aproximadamente 40% do estoque de C global. A regeneração através da atividade fotossintética de terras agrícolas abandonadas e/ou desmatadas pode restabelecer seus estoques de C. Devido à degradação da terra, o índice de carbono orgânico do solo (SOC) essencial para manter a qualidade do solo e reduzir emissões de CO<sub>2</sub> é baixo na maioria dos agros ecossistemas. Alguns fatores influem na dinâmica de sequestro de C, entre eles: o manejo, classificação do solo, clima, recursos hídricos, seleção das espécies arbóreas<sup>27</sup>.

O uso da terra e tempo de abandono são fatores-chave para previsão dos estoques iniciais de SOC. As pastagens acumulam mais SOC em comparação com terras aráveis, à medida que o plantio causa a perturbação do solo, induzindo a mineralização da matéria orgânica<sup>28</sup>.

O potencial de absorção de C pelo reflorestamento é proporcional à das florestas adultas. Alguns dos obstáculos para o reflorestamento/florestamento são: a disponibilidade de grandes áreas para o plantio, demanda hídrica e imprecisão quanto à captura de C por terras recém-florestadas<sup>29</sup>.

A bacia amazônica possui a maior floresta tropical com alta reserva de C. O solo amazônico tem 74,7% da sua cobertura formada por Latossolos e Argissolos, caracterizados por baixa retenção de cátions e fertilidade, porém, o melhoramento genético de alguns gêneros pode apresentar bom desempenho nesses solos<sup>30</sup>.

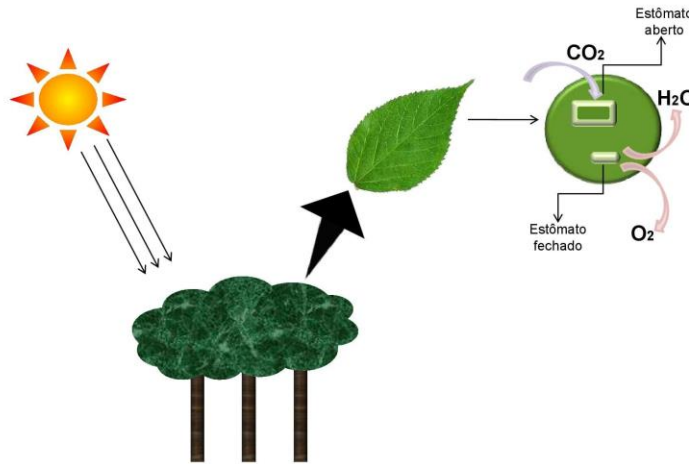
A procura do mercado global por celulose, energia, madeira, alimentos e armazenamento de C, se dá através de plantações de espécies não nativas. Apesar de algumas espécies nativas apresentarem alto valor econômico, sobrevivência e adaptabilidade nas condições locais, elas correspondem a menos de 5% do total de plantações no Brasil devido à falta informações e tecnologias para seu cultivo<sup>30</sup>.

As estratégias de restauração executadas na Amazônia são: regeneração natural, plantio total de espécies ou os dois métodos combinados a depender do nível de degradação, potencial de regeneração, cobertura vegetal. Áreas minimamente degradadas têm como opção a restauração natural, contudo, terras que sofreram uso intensivo necessitam de restauração ativa. Algumas medidas de restauração ecológica têm como barreira o elevado custo e a expansão das fronteiras agropecuárias que ocupam 33% da superfície global<sup>30</sup>.

A fotossíntese (Figura 2) é um processo ramificado, que converte a energia da luz em energia química mediante a cadeia fotossintética de transferência de elétrons (ETC), incluída na rede de membranas tilacóides intra-cloroplastas preenchidos por ligantes de pigmentos como a clorofila. A fotossíntese depende do processo de difusão gasosa. O CO<sub>2</sub> atmosférico penetra no espaço aéreo intracelular da folha através do estômato, processo conhecido como condutância e resistência estomática (controla a difusão de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O), enquanto a resistência/via mesófilo propaga o CO<sub>2</sub> pelo mesófilo (parede celular, membrana plasmática, citosol, membrana dupla do cloroplasto e estroma, onde ocorre a via assimilatória do CO<sub>2</sub>)<sup>31</sup>.

**Figura 2.** Início do processo de fotossíntese. A luz solar é absorvida pelas folhas através da condutância e resistência estomática, controlando assim a difusão de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ .

**Figure 2.** Beginning of the photosynthesis process. Sunlight is absorbed by the leaves through stomatal conductance and resistance, thus controlling the diffusion of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ .



**Fonte:** Autores  
**Source:** Authors

Na reação de fotossíntese oxigenada há produção de glicose e oxigênio, entretanto, essas moléculas orgânicas não são de alta energia ou elétrons de alta energia, pois tem como funções: (i) produzir hidrogênio a partir da  $\text{H}_2\text{O}$  para ligação ao  $\text{CO}_2$  e assim promover a síntese de biomoléculas; (ii) converter energia solar em energia química armazenada em ATP (fotofosforilação). A etapa (i) absorve energia do fóton pelo Fotossistema II para produzir  $\text{O}_2$ . A etapa (ii) inclui "transporte cíclico de elétrons" (SCHMIDT-ROHR, 2021).

As plantas precisam de dois fotossistemas, pois: (i) fotossistema II (PSII) extrai o hidrogênio da  $\text{H}_2\text{O}$ , gerando plastoquinona ( $\text{PQH}_2$ ) e  $\text{O}_2$ ; fornecendo pouca energia à planta; (ii) fotossistema I (PSI) produz energia química armazenada e ATP, assim como transportador de hidrogênio,  $\text{NADPH}^{32}$ .

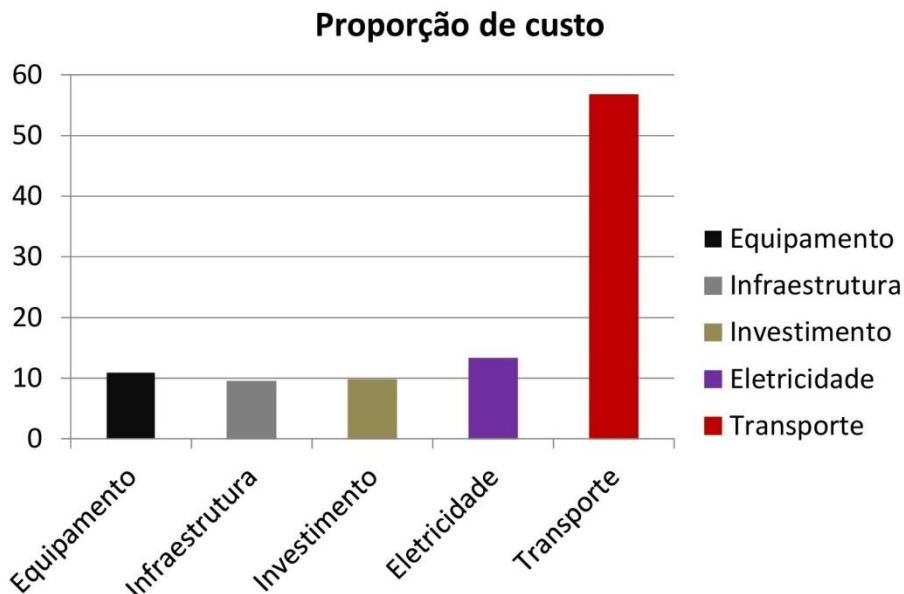
### 3.5.2 Interperismo aprimorado (EW)

O interperismo aprimorado é baseado na aceleração de reações geoquímicas naturais de minerais para remover o  $\text{CO}_2$  atmosférico, através da conversão de  $\text{CO}_2$  em alcalinidade. Os resíduos industriais não perigosos (NHIW) reagem com  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  atmosférico reduzindo assim o carbono. Uma vantagem da EW é o baixo uso da terra e do recurso água em comparação com outras NETs, podendo ser aplicado em conjunto com o florestamento e reflorestamento, como mostrado na figura 3<sup>26</sup>.



**Figura 3.** Proporção de custo do EW com uso de NHIW. Equipamento (10,9%), infraestrutura (9,44%), investimento (9,72%), eletricidade (13,22%) e transporte (56,72%).

**Figure 3.** EW cost ratio using NHIW. Equipment (10.9%), infrastructure (9.44%), investment (9.72%), electricity (13.22%) and transport (56.72%).



Fonte: Autores  
Source: Authors

As rochas alcalinas ricas em silicato são moídas e aplicadas à terra. A grande área de superfície específica acelera a reação de intemperismo onde o CO<sub>2</sub> atmosférico é dissolvido com ácido carbônico na água da chuva formando espécies aquosas que aceleram a dissolução de silicato com consumo de prótons para gerar íons de bicarbonato. Esse bicarbonato é transportado para os oceanos através de escoamento, onde é armazenado por aproximadamente 100.000 anos<sup>33</sup>.

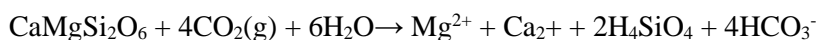
A olivina, silicato utilizado em estudos sobre EW possui alto rebaixamento de CO<sub>2</sub> em relação ao maciço rochoso, porém, tem como desvantagem liberação de metais tóxicos durante sua dissolução<sup>33</sup>.



A carbonatação usa uma via geoquímica alternativa que leva à supersaturação de carbonato formando assim carbonatos sólidos em vez de bicarbonatos dissolvidos, reduzindo a eficiência do processo<sup>33</sup>.



O basalto também usado no EW, é rico em Ca e Mg, fornece alcalinidade ao solo e auxilia a produção agrícola. Possui intemperismo acelerado devido ao desgaste de seus constituintes, aumentando a área de superfície reativa por unidade de volume de basalto triturado comparado aos minerais de rochas graníticas ou sedimentares<sup>34</sup>.



A principal desvantagem do EW é a demanda de energia relacionada à britagem e moagem do material para atingir granulometrias. O transporte torna-se menos importante com a diminuição do tamanho do grão<sup>34</sup>.

### 3.5.3 Captura direta do ar (DAC)

A captura direta do ar (DAC) é um sistema de engenharia considerado uma NET que utiliza processos físico-químicos para remover o CO<sub>2</sub> atmosférico desempenhando uma opção favorável à mitigação das mudanças climáticas, devido a sua intensidade do uso de terras relativamente baixa, configuração e operação mais simples e flexibilidade na localização da DAC. Em 2021, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera foi de cerca de 415 ppm em qualquer local do planeta, algumas empresas como Climeworks, Carbon Engineering, Global Thermostat desenvolvem tecnologias comerciais da DAC levando em consideração parâmetros como: velocidade do vento, precipitação e altitude exercendo um papel relevante na determinação da DAC, porém, a temperatura e a umidade relativa (UR) possuem um efeito significativo na cinética do contador de ar, apresentando forte influência nas taxas de captura de carbono e na demanda total de energia no processo<sup>35</sup>.

Alguns trabalhos pioneiros usam como base o uso de solventes para a DAC. Pesquisadores apresentaram e validaram em artigos recentes que o aumento de CO<sub>2</sub> reduz a permeabilidade da área de membrana, tornando-se um componente crucial na estratégia de minimização da área de membrana e do consumo de energia em um sistema m-DAC, disponíveis para fabricar membranas de camada seletiva muito fina (espessura da membrana < 200 nm) são alcançáveis<sup>36</sup>.

Pesquisas recentes destacam que a implantação de NETs tem um custo rentável e não interrupto após sua implantação, oferecendo seguro contra vazamento de carbono, independentemente da localização da DAC, para uma DAC viável é necessário a exploração de solventes de nova geração com baixa penalidade energética e alta capacidade de absorção<sup>37</sup>.

As metodologias de DAC existentes apresentam alta demanda de energia associada à regeneração de solventes. O processo de DAC resulta em uma energia de regeneração menor em comparação com as tecnologias baseadas em solventes de última geração<sup>38</sup>.

A Carbon Engineering adota a DAC captura o CO<sub>2</sub> atmosférico pelo contador de ar que contém uma fina superfície plástica com hidróxido de potássio em sua composição, o qual reage com o CO<sub>2</sub> formando o carbonato de potássio. Este sal é separado em pallets aquecidos e o produto desta reação é encaminhado para o calcinador, responsável por liberar CO<sub>2</sub> puro. Contudo possui repercussões negativas na saúde e no meio ambiente devido aos solventes e necessidade de calor e energia<sup>25</sup>.

### 3.5.4 Bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS)

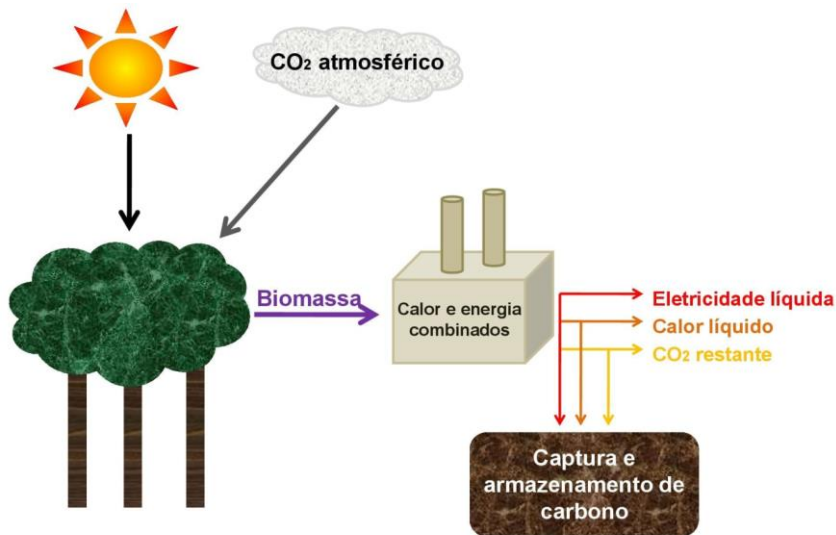
A BECCS (Figura 4) é uma técnica onde as plantas são cultivadas absorvendo CO<sub>2</sub> atmosférico via fotossíntese, direcionando-o a uma usina, onde o CO<sub>2</sub> será capturado e armazenado, podendo também ser usado diretamente aumentando sua eficiência energética. Diversas tecnologias de bioenergia com fontes de matéria-prima podem ser integradas ao BECCS, como culturas energéticas lenhosas e lignocelulósicas, culturas contendo amido, plantas, madeira, resíduos e outros recursos biológicos. O caminho de conversão para bioenergia (termoquímico, bioquímico ou químico) vai depender das características da matéria-prima<sup>39</sup>.

Tecnologias comercialmente isoladas como combustão, gaseificação, depuração de aminas pós-combustão, absorção de pré-combustão usando metanol ou dutos de transporte de CO<sub>2</sub> e armazenamento em aquíferos salinos fazem parte dos sistemas BECCS. No entanto, sua aplicação comercial integrada a BECCS é limitada. Anualmente seis instalações BECCS ativas capturam aproximadamente 1,7 Mt CO<sub>2</sub>. A única instalação de grande escala (>400 kt CO<sub>2</sub>pa armazenado) é o Illinois Industrial CCS, capturando até 1 Mt CO<sub>2</sub> anualmente, enquanto as demais são sistemas piloto<sup>39</sup>.

Uma das limitações da BECCS é que esta metodologia requer grandes áreas de terra arável (até 7 milhões de km<sup>2</sup> em 2050 de acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), e de grande volume de água doce. Uma das razões pelas quais o BECCS consome muitos recursos é devido a sua baixa eficiência fotossintética: os valores máximos de eficiência teórica são 2,4% e 3,7% para plantas C3 e C4, respectivamente<sup>40</sup>.

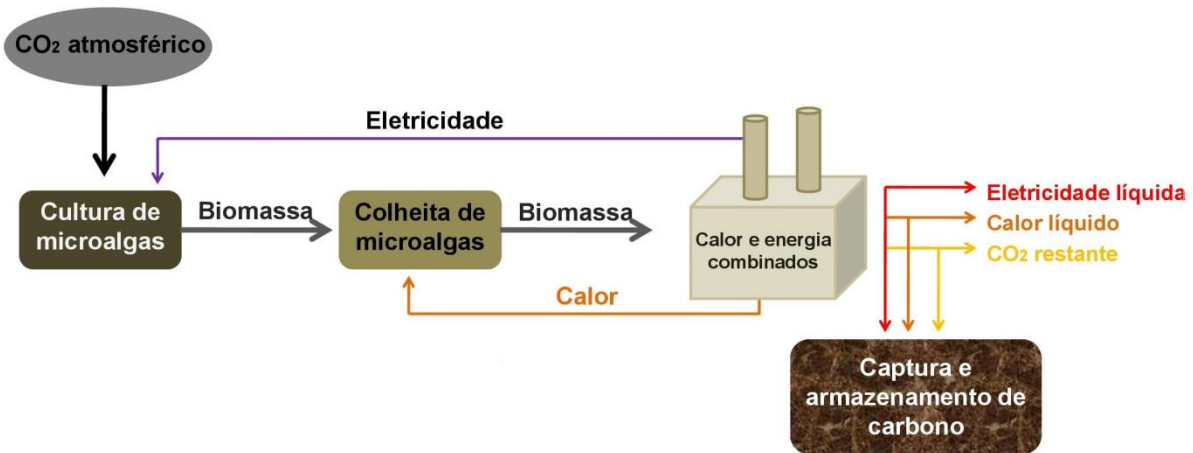
**Figura 4.** Cultivo de culturas ou florestas com absorção de CO<sub>2</sub> atmosférico, a biomassa correspondente é queimada em uma usina combinada de calor e energia, gerando calor e eletricidade; o produto da combustão (CO<sub>2</sub>) é capturado e armazenado geologicamente.

**Figure 4.** Cultivation of crops or forests with absorption of atmospheric CO<sub>2</sub>, the corresponding biomass is burned in a combined heat and power plant, generating heat and electricity; the product of combustion (CO<sub>2</sub>) is captured and geologically stored.



**Fonte:** Autores  
**Source:** Authors

A técnica de BECCS à base de microalgas (MBECCS) (Figura 5) segue o mesmo método do BECCS, exceto que as plantas são substituídas por microalgas; uma vez que o BECCS possui uma alta demanda de eletricidade e calor para seu cultivo e colheita, ademais as microalgas fotoautotróficas apresentaram uma eficiência fotossintética de 3-20% a depender da espécie. As microalgas podem ser cultivadas de duas formas: planctônicas (estão em suspensão na água e são extremamente diluídas) ou em biofilmes (agregados de microrganismos aderidos a uma superfície de forma concentrada). Dessa forma, a produtividade em área para biofilmes é duas vezes maior do que para microalgas planctônicas<sup>40</sup>.

**Figura 5.** Técnica de MBECCS**Figure 5.** MBECCS technique

**Fonte:** Autores  
**Source:** Authors

O uso de microalgas marinhas evitaria a elevada necessidade de água para o cultivo. A única etapa que seria necessária a utilização de água doce é na parte CCS, sendo apenas 0,5% do uso global de água para a agricultura<sup>40</sup>.

Esta metodologia é atraente para os parâmetros de modelagem porque faz a otimização simultânea entre os demais modelos, gerando energia e reduzindo a concentração do CO<sub>2</sub>. Apesar das vantagens oferecidas pelas BECCS, esta técnica só existe na escala piloto, pois ainda há incertezas técnicas e sociais consideráveis para ser colocada em escala comercial<sup>41</sup>.

A implantação em larga escala de BECCS depende da cultura energética. Na visão econômica as implantações de BECCS e reflorestamento podem causar alterações nos preços dos alimentos. A visão econômica será mais benéfica do que prejudicial para economia global. Já na visão do sistema, os BECCS apresentam uma vantagem sobre o CCS, pois as BECCS reduzem o custo operacional marginal, enquanto no CCS apresenta alto consumo de combustível fóssil (alto custo operacional de energia renováveis e geração nuclear)<sup>42</sup>.

Alguns dos entraves apresentados nessa técnica são os recursos de biomassa sustentável que são limitados. Uma implantação descentralizada poderia permitir o acesso a uma variedade de recursos regionais de biomassa, resultando em maior flexibilidade e funcionalidade<sup>39</sup>.

### 3.5.5 Captura e armazenamento de carbono (CCS)

A plataforma de modelagem de sistemas de energia integrados do TIMES é um modelo de sistema de energia de otimização de programação linear, dinâmico e de baixo para cima. Existem muitos estudos que utilizam a plataforma TIMES para suas análises de sistemas de energia. Os estudos são conduzidos usando uma abordagem de todo o sistema, ou abordagem setorial tanto para países em desenvolvimento e desenvolvidos. Atualmente existem 19 projetos de CCS de grande escala em operação e quatro em

construção<sup>43</sup>.

Análises tecnoeconômicas revelam que tecnologias atuais de captura de CO<sub>2</sub> exigem alta demanda de energia. A captura e utilização de carbono (CCU) concernem a um conjunto de tecnologias em que o dióxido de carbono é capturado de fontes pontuais e transformado em matéria-prima. O gás é convertido por meio de processos químicos e biológicos em combustíveis, produtos químicos ou materiais de construção. Ainda que o CO<sub>2</sub> seja uma molécula estática, ela pode ser anabolizada e ligada a um material para que não retorne à atmosfera durante sua vida útil. Entretanto, há várias inseguranças por parte da indústria química e da população relacionadas à utilização de produtos à base de CO<sub>2</sub> como: o eventual vazamento de dióxido de carbono de produtos plásticos, os riscos ambientais do descarte de produtos provenientes de CO<sub>2</sub> e liberação do gás durante a combustão<sup>44</sup>.

A captura e armazenamento de carbono (CCS) por sua vez têm como finalidade aperfeiçoar a eficiência energética, substituir combustíveis fósseis e transferir o CO<sub>2</sub> decorrente da combustão de combustíveis fósseis para o aprisionamento subterrâneo permanente<sup>45</sup>.

Entre as várias etapas existentes para a captura de CO<sub>2</sub>, temos capturas: pré-combustão (o CO<sub>2</sub> é removido do fluxo de gás de síntese gerado através da gaseificação do metano ou de combustíveis sólidos e líquidos); combustão ou oxicomustão (queima do combustível na presença de O<sub>2</sub> quase puro para produção de CO<sub>2</sub>); e pós-combustão (A saída dos gases de combustão passa pela separação do CO<sub>2</sub> dos demais gases através de tecnologias apropriadas)<sup>46</sup>.

A captura e armazenamento de carbono “pós-combustão” (CCS) envolve a separação de CO<sub>2</sub> de uma corrente de gás, condensando-o em um fluido supercrítico para conservação subterrânea ou sob o oceano. Dependendo do tipo de combustível, contaminantes podem interferir no sistema. A captura pós-combustão baseada em amina é a mais utilizada atualmente, porém necessita de equipamentos de grande porte resultando em alta demanda de energia e elevado custo de capital. O “otimismo cego” do CCS apóia-se na negligência dos riscos e incertezas. Os impactos ambientais e políticos desta metodologia são: seu lento desenvolvimento; alta demanda de energia; conservação subterrânea de carbono insegura; seu elevado custo dificulta o subsídio a respostas sustentáveis<sup>47</sup>.

Dentre as demais metodologias de captura de CO<sub>2</sub> temos: a adsorção (o gás encontra partículas das quais se fixa devido à sua afinidade química, separando-o da mistura gasosa); absorção (aplicada normalmente pós-captura com materiais que absorvem, solubilizam o CO<sub>2</sub> (com soluções de amina a altas temperaturas) para sua separação e transporte); captura por membranas (o utilizam CO<sub>2</sub> permeia a membrana de acordo com parâmetros como permeabilidade, tamanho de partícula, seletividade e volume de poros em relação ao gás); e captura química (faz uso de reações químicas com o CO<sub>2</sub> para obter produtos como carbonatos com alto ponto de ebulição, baixa toxicidade e serem biodegradáveis agregando valor indústria e a agroindústria).

#### 4. Resultado

A seguir na tabela 1 estão apresentados os resultados dos artigos selecionados para compor a sessão dos resultados bem como posteriormente da discussão.

**Tabela 1.** Resultados dos artigos selecionados

**Table 1.** Results of selected articles

<b>Autores</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Resultados</b>
SCHMIDT-ROHR, 2021	AR	A função primária da fotossíntese é a síntese de biomoléculas. A maior parte da energia química formada na fotossíntese

		<p>oxigenada é armazenada no O<sub>2</sub> de ligação dupla parcialmente fraca.</p> <p>As análises quantitativas de rendimento da fotossíntese devem levar em consideração que a maior parte da energia química é armazenada no O<sub>2</sub> e que a fotossíntese pode ocorrer sem síntese de glicose, produzindo ATP utilizando transporte cíclico de elétrons.</p>
COOPER; DUBEY; HAWKES, 2022	AR	<p>O AR remove em média de 5 kg CO<sub>2</sub> por árvore anualmente. Apesar de ser o mais carbono efetivo; exibir mínima ecotoxicidade e ter elevada remoção líquida de carbono tem o impacto da alta demanda de manejo florestal.</p>
COOPER; DUBEY; HAWKES, 2022	EW	<p>O processo de EW, o mineral moído da olivina (nesosilicato) é aplicado sobre o solo, reagindo com o CO<sub>2</sub> atmosférico formando minerais de carbonato. A capacidade de absorção deste método é em média de 2,7 t olivina por t CO<sub>2</sub>. Contudo, a redução da pureza do minério é o impacto mais relatado. Além da ecotoxicidade terrestre e humana desencadeada pelo uso da eletricidade para moer a olivina e ao seu transporte e espalhamento na terra.</p>
JIA, 2022	EW	<p>Neste trabalho foram considerados cinco tipos de NHIW: escória de alto-forno (B), escória de aciaria (S), cinzas volantes de carvão (C), lama vermelha (M) e gesso de dessulfuração (G).</p> <p>O custo de todo o processo é \$184,25/t CO<sub>2</sub>. O preço unitário de toneladas de CO<sub>2</sub> é parcialmente barato, mas a relevância é significativa devido à quantidade de NHIW processada. A quantidade de CO<sub>2</sub> sequestrada depende da capacidade de sequestro de CO<sub>2</sub> pelos resíduos.</p>
RINDER; VON HAGKE, 2021	EW	<p>O potencial de remoção de CO<sub>2</sub> do basalto é ~0,5-2 Gt CO<sub>2</sub><sup>-1</sup>. Se mantida ao longo de 50 anos, pode estar entre 25 e 100 Gt CO<sub>2</sub>.</p> <p>Rochas de silicato reduzem a toxicidade de metais e efeitos da seca, melhora a absorção de K<sup>+</sup>, P e Ca<sup>+2</sup> e aumenta a resistência a pragas em culturas de trigo, cevada e beterraba sacarina.</p>

		<p>O potencial de rebaixamento é expresso pela quantidade de CO<sub>2</sub> (R<sub>CO2</sub>) removido da atmosfera por massa de rocha.</p> <p>A composição mineralógica de rochas basálticas influencia na estequiometria dos cátions liberados (Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>).</p> <p>A adição de olivina à água do mar requer partículas &lt;10 µm para alcançar uma dissolução parcialmente completa em 100 anos. A olivina adicionada ao solo deveria estar na faixa de 0,1 a 0,01 µm para dissolução em 5 anos.</p> <p>A dissolução completa de uma rocha leva 97 anos, o qual 70% do pó é dissolvido. Já o núcleo de encolhimento dissolve apenas 0,14% do pó em 1 ano e a dissolução completa levaria 2120 anos. Os grãos menores se dissolvem primeiro, comparado com os maiores que não oferecem grande área de superfície.</p>
CASABAN; TS ALAPORTA, 2022 <sup>49</sup>	DAC	<p>Carbon Engineering é a primeira grande empresa a implantar a DAC com o objetivo de provar a viabilidade de uma planta de DAC em escala de megatoneladas (Mt), visando capturar 1 Mt CO<sub>2</sub> da atmosfera por ano. O solvente usado para essa remoção é o hidróxido de potássio (KOH) acarretando benefícios ambientais como remover e armazenar permanentemente o CO<sub>2</sub> da atmosfera. Há duas formas armazenar o CO<sub>2</sub> a depender da localização geográfica: armazenamento geológico ou oceânico</p>
AN; FAROOQ UI; MCCOY, 2022	DAC	<p>De acordo com simulações executadas baseadas em taxa de temperaturas abaixo de 0 a 40°C e condições climáticas de umidade relativa de 10% a 90%. A faixa de temperatura, 0 a 40°C, é determinada pela faixa de temperatura dos dados cinéticos de OH – e CO<sub>2</sub>. Dessa forma taxas de captura de CO<sub>2</sub> podem variar entre 52% e 90. A taxa de captura de CO<sub>2</sub> é mais sensível à temperatura do que à umidade</p>
EVEN, 2022	BECCS	<p>A utilização de MBECCS com uma espécie de microalga ou combinação de espécies em larga escala tem como objetivo a remoção de 10 Gt de CO<sub>2</sub> anualmente da atmosfera. Em relação</p>

		<p>à redução da produtividade de área por unidade e tempo. A área vital para absorver 10 Gt de CO<sub>2</sub> anual usando microalgas é 3,2% da área agrícola global, para ser comparado com 14,6% usando BECCS a água usada para o cultivo. A vantagem do MBECCS sobre o BECCS é que as microalgas podem se desenvolver na água do mar em vez da água doce. MBECCS necessitaria de 4,5 vezes mais amônia do que BECCS sozinho. A quantidade de fósforo essencial para MBECCS e BECCS é semelhante. Produtividade em área de microalgas planctônicas cultivadas sob CO<sub>2</sub> atmosférico apresenta valor considerável de 10 g<sup>2</sup>.dia<sup>-1</sup>. Fatores que interferem na eficiência do processo incluem água para cultivo de microalgas seja estado planctônico ou em biofilme, quanto maior a produtividade de área x, menor a quantidade de microalgas, água e demais nutrientes necessário. O consumo de nutrientes e água doce necessária para cultivo de microalgas para captura e armazenamento de carbono (CCS) depende da quantidade de CO<sub>2</sub> a ser tratado. Para 10 Gt de CO<sub>2</sub> anual, precisa-se de 3,3 10<sup>10</sup>m<sup>3</sup> de água doce, que caracteriza 0,5% da água utilizada por ano na agricultura sendo valor relativamente razoável. Biofilmes são sempre mais eficientes que microalgas planctônicas, pois a biomassa é mais concentrada no biofilme, portanto, não requer a etapa de concentração energeticamente onerosa no processo. MBECCS requer artificialização do solo em grande escala ameaçando a biodiversidade tornando-se uma desvantagem, outro ponto negativo que durante a combustão ocorre a produção de cinza afetando principalmente as microalgas marinha.</p>
<p>ALMENA, 2022</p>	<p>BECCS</p>	<p>O caso de instalação de aquecimento e energia (CHP) considera resíduos agrícolas usados em uma CHP que envolve CCS pós-combustão.  Caso H<sub>2</sub> considera resíduos florestais utilizados em uma unidade</p>



		<p>de gaseificação para produção de hidrogênio, para operação de célula a combustível, envolvendo CCS de pré-combustão.</p> <p>A tecnologia de captura pós-combustão remove o CO<sub>2</sub> dos gases de combustão produzidos durante a combustão da biomassa. Os processos de absorção/remoção de CO<sub>2</sub> usando um solvente químico são a opção preferida para o tratamento de gases de combustão em relação às opções de absorção física.</p> <p>A monoetanolamina (MEA) é uma excelente opção para tratar gases da combustão de biomassa, visto que apresentam baixo teor de pressão parcial de CO<sub>2</sub> e sulfeto de carbonila (COS) e dissulfeto de carbono (CS<sub>2</sub>) concentrações de contaminantes insignificantes. As desvantagens deste sistema são a alta intensidade de energia e a corrosão envolvida.</p>
CHENG; PORTER; COLOSI, 2020	BECCS	<p>A Drax BECCS tem alta remoção líquida de CO<sub>2</sub> utilizando a monoetanolamina (MEA) como solvente, com capacidade de remoção de 4 Mt CO<sub>2</sub> por ano. Porém, exibem altos custos energéticos e econômicos relativos à biomassa e baixa eficiência energética via combustão direta, independente do combustível. A melhor execução de BECCS corresponde à produção de etanol com CCS. O tratamento hidrotérmico (HTT) é a conversão termoquímica apropriada para biomassa úmida, pois é desnecessária a pré-secagem com intenso uso de energia. A HTT de biomassa lignocelulósica em baixa temperatura tem o melhor desempenho de energia</p>

**Fonte:** Autores  
**Source:** Authors

## 5. Discussão

Diante dos resultados apresentados acima podemos fazer uma comparação entre as vantagens e limitações de acordo com as técnicas abordadas. Schmidt-Rohr (2021) e Cooper; Dubey; Hawkes (2022) mencionaram a função primária da fotossíntese através da análise bioquímica do processo fotossintético. Além disso, faz-se uma estimativa de remoção anual de CO<sub>2</sub> relativamente razoável, entretanto, apesar de demonstrar benefícios em relação à eco toxicidade e a remoção líquida de carbono o uso da terra torna-se uma limitação a ser considerada.

Cooper; Dubey; Hawkes, (2022), Jia (2022) e Rinder; Von Hagke (2021) trouxeram a exemplificação de diferentes minerais que possuem grande área de superfície responsável por reagir e capturar o CO<sub>2</sub> atmosférico que podem ser aplicados ao solo. Algumas rochas além de promover essa remoção também reduzem a toxicidade de metais, melhora a absorção de íons no solo e tem efeitos na resistência de pragas em determinadas culturas. A eficiência quanto ao sequestro de CO<sub>2</sub> vai depender da capacidade de sequestro pelos resíduos. Dessa forma, a redução da pureza do minério a eco toxicidade terrestre e humana são desvantagens a serem encaradas.

Nos resultados sobre a DAC Casaban; Tsalaporta (2022) demonstraram seu sucesso no mercado das startups ao implantar uma captura em escala de megatoneladas de CO<sub>2</sub>. Diferentes solventes são adicionadas ao reator para promover a fixação do CO<sub>2</sub> que posteriormente será removido e armazenado permanentemente. A taxa de remoção de CO<sub>2</sub> é mais sensível à temperatura do que à umidade, corroborando com An; Farooqui; McCoy (2022).

Quanto ao BECCS Even (2022) evidenciou que diferentes matérias-primas foram consideradas para se obter uma remoção eficiente de CO<sub>2</sub>. A MBECCS apresentou vantagens relevantes em relação ao processo de BECCS convencional. Entre estas utilidades destaca-se a redução da área agrícola para cultivo e consumo de água. Contudo a demanda por amônia é maior do que o BECCS. Fatores que interferem no consumo de nutrientes e água doce dependem da quantidade de CO<sub>2</sub> a ser tratado. O uso de água doce para o cultivo de microalgas é relativamente razoável comparada a agricultura. A depender da espécie a concentração energética será diferente, interferindo assim no custo final do processo. Como barreiras a MBECCS gera a artificialização do solo e a produção de cinzas. Uma comparação energética em baixa produtividade de área entre a MBECCS e a DAC, mostra que a MBECCS consome eletricidade comparável ou até melhor que a DAC. Quando se refere a uma maior produtividade em área, o MBECCS com uso de biofilmes produz eletricidade líquida, comparativamente aos aerogeradores e ao BECCS, fazendo-se necessário a mistura de microalgas para maior resistência a perturbações externas e possíveis contaminações, seus resultados corroboram com os encontrados no estudo de Almena (2022).

## 6. Considerações finais

A elevada concentração de GEE promove o aquecimento global, o qual interfere diretamente na qualidade do ar. Dentre os gases emitidos, o que possui maior concentração é o CO<sub>2</sub>. Desta forma este trabalho trouxe metodologias que podem ser aplicadas para auxiliar na mitigação das mudanças climáticas e possíveis causas e consequências para esse aumento dos gases.

As NETs são soluções que auxiliam na redução do aquecimento global, mas que sozinhas não possuem o potencial de reverter o quadro climático previsto para as próximas décadas.

Entre as NETs podemos citar: AR, EW, DAC, BECCS e CCS. Apesar das vantagens e limitações de cada técnica, a NET que apresentou melhor desempenho de captura foi a BECCS, entretanto, seu custo operacional e demanda energética é elevado, a escolha da biomassa utilizada também é um critério que irá interferir em sua eficiência.

A maior parte das NETs ainda está em escala piloto, pois necessitam de mais delineamento quanto a sua eficiência técnica, custo operacional, danos ambientais e a saúde. Concluindo assim a necessidade de mais estudos aliado a soluções secundárias que auxiliam na mitigação climática e na melhoria da qualidade do ar.

## Agradecimentos

A todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

## Referências

- [1]YORO KO.; DARAMOLA MO. Fontes de emissão de CO<sub>2</sub>, gases de efeito estufa e efeito do aquecimento global. In: **Avanços na captura de carbono** . Publicação Woodhead, 2020. p. 3-28.
- [2]HALL AE.; ZISKA, LH. Crop breeding strategies for the 21st century. In: REDDY, K.R.; HODGES, H.F. Climate change and global crop productivity London: British Library, 2000. p.407-419.
- [3]SIVARETHINAMOHAN R. et al. Impacto da poluição do ar na saúde e nos aspectos socioeconômicos: revisão sobre abordagem futura. **Materiais Hoje: Anais** , v. 37, p. 2725-2729, 2021.
- [4]UM C et al. O status e a estabilidade do carbono do permafrost no planalto tibetano. **Earth-Science Reviews** , v. 211, p. 103433, 2020.
- [5]UDEN S; DARGUSCH P; GREIG C. Cortando o ruído nas emissões negativas. **Joule** , v. 5, n. 8, pág. 1956-1970, 2021.
- [6]KLEIN T; ANDEREG WR. Um grande aumento na exposição ao calor no século 21 é impulsionado pelo aquecimento global e pelo crescimento da população urbana. **Cidades e Sociedade Sustentáveis** , v. 73, p. 103098, 2021.
- [7]DI C, Maria E et al. Mudanças climáticas e saúde respiratória infantil: um apelo à ação para pediatras. **Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública** , v. 17, n. 15, pág. 5344, 2020.
- [8]RANNEY MA; VELAUTHAM, L. Cognição e educação sobre as mudanças climáticas: dada nenhuma bala de prata para a negação, diversos pedaços de informação aumentam a aceitação do aquecimento global. **Current Opinion in BehavioralSciences** , v. 42, p. 139-146, 2021.
- [9]BONNEUIL C; CHOQUET, PL; FRANTA B. Alertas precoces e responsabilidade emergente: as respostas da Total ao aquecimento global, 1971–2021. **Mudança Ambiental Global** , v. 71, p. 102386, 2021.
- [10]OREGGIONI GB et al. Mudança climática em um mundo em mudança: transições socioeconômicas e

tecnológicas, marcos regulatórios e tendências das emissões globais de gases de efeito estufa de EDGAR v. 5.0. **Mudança Ambiental Global** , v. 70, p. 102350, 2021.

[11]HASSAN BT; JIAWEN G; FARZANEH H. Air pollution health risk assessment (AP-HRA), principles and applications. **International journal of environmental research and public health**, v. 18, n. 4, p. 1935, 2021.

[12] Ferreira CAS; Cukier, A. Avaliando a DPOC pela perspectiva do paciente. *J. Pneumologia*, 2006; 32 (2):vii-viii.

[13] Jorm AF, Christensen H, Korten AE, Henderson AS, Jacomb PA, Mackinnon A. Do cognitive complaints either predict future cognitive decline or reflect past cognitive decline? A longitudinal study of an elderly community sample. *Psychol Med.* 1997;27(1):91-8.

[14]RAYNER T. Mantê-lo no chão? Avaliando a governança global para a redução da oferta de combustíveis fósseis. **Governança do Sistema Terrestre** , v. 8, p. 100061, 2021.

[15]OLIVA M; FRITZ M. Degradação do permafrost em uma Terra mais quente: desafios e perspectivas. **Current Opinion in Environmental Science &Health** , v. 5, p. 14-18, 2018.

[16]ORLOV D et al. Ecossistemas saudáveis são um pré-requisito para a saúde humana – um apelo à ação na era das mudanças climáticas com foco na Rússia. **Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública** , v. 17, n. 22, pág. 8453, 2020.

[17]HUEFFER K et al. Fatores que contribuem para surtos de antraz no norte circumpolar. **EcoHealth** , v. 17, n. 1, pág. 174-180, 2020.

[18]ZHANG D et al. Ecological barrier deterioration driven by human activities poses fatal threats to public health due to emerging infectious diseases. **Engineering**, 2021.

[19]VAN AH. Governando a produção de combustível fóssil na era da perturbação climática: Rumo a uma lei internacional de 'deixá-lo no chão'. **Governança do Sistema Terrestre** , v. 9, p. 100118, 2021.

- [20]SOLARIN SA. Rumo ao desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento: análise agregada e desagregada da intensidade energética e o papel dos subsídios aos combustíveis fósseis. **Produção e Consumo sustentáveis** , v. 24, p. 254-265, 2020.
- [21]LONDONO-PULGARIN D et al. Fóssil ou bioenergia? Tendências do mercado global de combustíveis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , v. 143, p. 110905, 2021.
- [22]NEWBOROUGH M; COOLEY G. Hidrogênio verde: O único combustível balanceado entre oxigênio e água. **Boletim de Células de Combustível** , v. 2021, n. 3, pág. 16-19, 2021.
- [23]MICHAELIDES EE.; MICHAELIDES DN. Impacto da energia nuclear na substituição de combustíveis fósseis. **Nuclear Engineering and Design** , v. 366, p. 110742, 2020.
- [24]LEONARD MD.; MICHAELIDES EE; MICHAELIDES DN. Necessidades de armazenamento de energia para substituição de usinas de combustíveis fósseis por renováveis. **Energias Renováveis**, v. 145, p. 951-962, 2020.
- [25]COOPER J; DUBEY L; HAWKES A. Avaliação do ciclo de vida de tecnologias de emissões negativas para eficácia no sequestro de carbono. **Procedia CIRP** , v. 105, p. 357-361, 2022.
- [26] JIA X et al. Redução regional de carbono com intemperismo aprimorado de resíduos industriais não perigosos. **Recursos, Conservação e Reciclagem** , v. 176, p. 105910, 2022.
- [27]CHEN D et al. Os terraços aumentam o sequestro de carbono orgânico do solo? Uma análise de dados em escala nacional na China. **Ciência do Ambiente Total** , v. 721, p. 137751, 2020.
- [28]RYTTER RM; RYTTER L. Sequestro de carbono na conversão do uso da terra – Mudanças iniciais nos estoques totais de carbono para seis espécies de árvores cultivadas em antigas terras agrícolas. **Ecologia e Manejo Florestal** , v. 466, p. 118129, 2020.
- [29]MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ M et al. Species-specific and generalized biomass models for estimating

carbon stocks of young reforestations. **Biomass and Bioenergy**, v. 161, p. 106453, 2022.

[30]NUNES S et al. Desafios e oportunidades para o reflorestamento em larga escala na Amazônia Oriental utilizando espécies nativas. **Ecologia e manejo florestal** , v. 466, p. 118120, 2020.

[31]CRUZ JA.; AVENSON TJ. Fotossíntese: uma visão multiscópica. **Journal of Plant Research** , v. 134, n. 4, pág. 665-682, 2021.

[32]SCHMIDT-ROHR K. O<sub>2</sub> e outras moléculas de alta energia na fotossíntese: por que as plantas precisam de dois fotossistemas. **Vida** , v. 11, n. 11, pág. 1191, 2021.

[33]LEWIS AL. et al. Efeitos da mineralogia, química e propriedades físicas de basaltos no potencial de captura de carbono e liberação de elementos nutrientes de plantas via intemperismo aprimorado. **Geoquímica Aplicada** , v. 132, p. 105023, 2021.

[34]LEWIS T et ai. Reflorestamento de terras agrícolas nos trópicos: A contribuição relativa do solo, biomassa viva e reservatórios de detritos para o sequestro de carbono. **Ciência do Meio Ambiente Total** , v. 649, p. 1502-1513, 2019.

[35]NA K; FAROOQUI A; MCCOY ST. O impacto do clima em sistemas de captura direta de ar baseados em solventes. **Energia Aplicada** , v. 325, p. 119895, 2022.

[36]CASTRO-MUÑOZ R et al. Uma nova aplicação de membrana relevante: captura direta de ar de CO<sub>2</sub> (DAC). **Revista de Engenharia Química** , p. 137047, 2022.

[37]DENG Y et al. Uma revisão comparativa do desempenho de nanomateriais para captura direta de ar. **Relatórios de Energia** , v. 7, p. 3506-3516, 2021.

[38]CUSTELCEAN R et al. Captura direta do ar de CO<sub>2</sub> com peptídeos aquosos e guanidinas cristalinas. **Cell Reports Physical Science** , v. 2, n. 4, pág. 100385, 2021.

[39]ALMENA A et al. Carbon dioxide removal potential from decentralised bioenergy with carbon capture

and storage (BECCS) and the relevance of operational choices. **Biomass and Bioenergy**, v. 159, p. 106406, 2022.

[40]EVEN C et al. Bioenergia à base de microalgas com captura e armazenamento de carbono quantificado como uma tecnologia de emissões negativas. **Energy Nexus**, v. 7, p. 100117, 2022.

[41]BAIXO S; SCHÄFER S. A captura e armazenamento de carbono bioenergético (BECCS) é viável? A autoridade contestada de modelagem de avaliação integrada. **Energy Research & Social Science**, v. 60, p. 101326, 2020.

[42]FAJARDY M et al. A economia da bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) em um mundo de 1,5 C ou 2 C. **Mudança Ambiental Global**, v. 68, p. 102262, 2021.

[43]STØRSET S et al. Aproveitando as inovações da CCS: Um estudo para medir a criação de valor potencial da pesquisa e desenvolvimento da CCS. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 83, p. 208-215, 2019.

[44]ARNING K et al. Mais verde ou menos preto? Como as percepções de benefícios de redução de CO<sub>2</sub> versus economia de recursos fósseis moldam a aceitação de combustíveis à base de CO<sub>2</sub> e sua tecnologia de conversão. **Energia e Mudanças Climáticas**, v. 2, p. 100025, 2021.

[45]DU Y et al. Usinas de energia movidas a fósseis de emissões zero e negativas usando captura de CO<sub>2</sub> por aminas aquosas convencionais. **Jornal Internacional de Controle de Gases de Efeito Estufa**, v. 111, p. 103473, 2021.

[46]FERON P et al. Rumo a zero emissões de usinas de combustível fóssil. **Jornal Internacional de Controle de Gases de Efeito Estufa**, v. 87, p. 188-202, 2019.

[47]GUNDERSON, Ryan; STUART, Diana; PETERSEN, Brian. O enquadramento da captura e armazenamento de carbono da indústria de combustíveis fósseis: fé na inovação, instrumentalização de valor e manutenção do status quo. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119767, 2020.

[48]VAZ JR, Sílvio; DE SOUZA, Rodrigues AP; Lobo BE. Tecnologias para captura de dióxido de carbono: uma revisão aplicada aos setores de energia. **Engenharia e Tecnologia mais Limpas** , p. 100456, 2022.

[49]CASABAN D; TSALAPORTA E. Captura direta de CO<sub>2</sub> do ar na República da Irlanda. Isso é necessário?. **Relatórios de Energia** , v. 8, p. 10449-10463, 2022.

[50]CHENG F; PORTER RD.; COLOSI, Lisa M. O tratamento hidrotérmico combinado com captura e armazenamento de carbono é uma tecnologia de emissões negativas produtoras de energia?. **Conversão e Gestão de Energia** , v. 203, p. 112252, 2020.