

CENTRO UNIVERSITÁRIO BRASILEIRO - UNIBRA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BIOMEDICINA

ANANDA ALVIM FERNANDES  
ARYLAINE ROBERTA AXIOTIS GALDINO  
MARIA RITA FERREIRA DOS SANTOS

**A UTILIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE EMISSÕES  
NEGATIVAS E SEU POTENCIAL NAS CIÊNCIAS  
BIOMÉDICAS**

RECIFE/2022

ANANDA ALVIM FERNANDES  
ARYLAINE ROBERTA AXIOTIS GALDINO  
MARIA RITA FERREIRA DOS SANTOS

**A UTILIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE EMISSÕES  
NEGATIVAS E SEU POTENCIAL NAS CIÊNCIAS  
BIOMÉDICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Disciplina TCC II do Curso de Bacharelado em  
Biomedicina do Centro Universitário Brasileiro -  
UNIBRA, como parte dos requisitos para conclusão  
do curso.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Me. Luiz da Silva Maia Neto

RECIFE/2022

Ficha catalográfica elaborada pela  
bibliotecária: Dayane Apolinário, CRB4- 1745.

F363u      Fernandes, Ananda Alvim  
              A utilização de tecnologias de emissão negativas e seu potencial nas  
ciências biomédicas. / Ananda Alvim Fernandes, Arylaine Roberta Axiotis  
Galdino, Maria Rita Ferreira dos Santos. Recife: O Autor, 2022.  
              41 p.  
  
              Orientador(a): Me. Luiz Da Silva Maia Neto.  
  
              Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário  
Brasileiro – UNIBRA. Bacharelado em Biomedicina, 2022.  
  
              Inclui Referências.  
  
              1. CO2. 2. Qualidade do ar. 3. Aquecimento global. 4. NETs.  
5. Combustíveis fósseis. 6. Energia. I. Galdino, Arylaine Roberta Axiotis .  
II. Santos, Maria Rita Ferreira dos. III. Centro Universitário Brasileiro -  
UNIBRA. IV. Título.

CDU: 616-071

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos aos nossos pais, familiares e a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação.

“Somos a primeira geração a sentir o efeito das  
alterações climáticas e a última geração que  
pode fazer algo a esse respeito.”

- Barack Obama

## 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 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) 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  $\text{CO}_2$  por árvore anualmente; enquanto o intemperismo aprimorado utilizando a olivina teve a capacidade de remoção de 2,7 t olivina por t  $\text{CO}_2$  e o basalto de em média 0,5-2 Gt  $\text{CO}_2^{-1}$ ; 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  $\text{CO}_2$  por ano. Desta forma, essas tecnologias fornecem uma solução viável, mas não auto-suficientes para a mudança do atual cenário climático.

**Palavras-chave:**  $\text{CO}_2$ . Qualidade do ar. Aquecimento global. NETs. Combustíveis fósseis. Energia.

## ABSTRACT

After the industrial revolution, greenhouse gas (GHG) emissions have been increasing exponentially. Anthropogenic action is the main cause of this increase, due to deforestation, fires, burning of fossil fuels, among others. The increase in the concentration of these gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) in the atmosphere promotes global warming, generating extreme and unstable climatological episodes; in addition to resulting in poor air quality that directly interferes with human health. The objective of this work is the analysis of negative emission technologies (NETs) and their potential in mitigating global warming, using as a foundation a flowchart based on the search for articles on platforms such as Science Direct and Pubmed. According to the selected articles, the effectiveness of methods such as reforestation was observed, which had the removal of approximately 5 kg CO<sub>2</sub> per tree annually; while the enhanced weathering using olivine had the capacity 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 direct air capture method had a removal capacity of approximately 52% and 90% depending on temperature and humidity; BECCS applications have six active installations capturing approximately 1.7 Mt CO<sub>2</sub> per year. In this way, these technologies provide a viable but not self-sufficient solution to the changing current climate scenario.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>. Air quality. Global warming. NETs. Fossil fuels. Energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema da Tecnologia de Emissões Negativa.....	20
Figura 2 - Início do processo de fotossíntese.....	22
Figura 3 – Incorporação do CO <sub>2</sub> no espaço intracelular da folha por.....	22
Figura 4 - Estroma do cloroplasto.....	22
Figura 5 - Proporção de custo do EW com uso de NHIW.....	24
Figura 6 – Esquema da BECCS.....	25
Figura 7 – Esquema da MBECCS.....	27
Figura 8 - Opções tecnológicas para a CCS.....	29
Figura 9 – Processo de captura pré-combustão.....	39
Figura 10 – Processo de captura oxícombustão.....	30
Figura 11 – Processo de captura pós-combustão.....	30

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Capacidade de armazenamento de CO<sub>2</sub> de metodologias NETs..... 32

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AAILs	Líquidos Iônicos à Base de Aminoácidos
AAS	Solução de Sais de Aminoácidos
AR	Reflorestamento
ATP	Adenosina Trifosfato
AVC	Acidente Vascular Cerebral
BECCS	Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono
C	Carbono
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CBIO	Crédito de Descarbonização
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
CCU	Captura e Utilização de Carbono
CERs	Comercialização de Reduções Certificadas de Emissões
CH <sub>4</sub>	Metano
CHP	Produção Combinada de Calor e Energia
Cu-BTC MOF	Estrutura orgânica metálica de cobre benzeno-1,3,5-tricarboxilato
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COS	Sulfeto de Carbonila
CS <sub>2</sub>	Dissulfeto de Carbono
DAC	Captura Direta de Ar
DETA	Dietilentriamina
DPOC	Doença Obstrutiva Crônica do Pulmão
ETC	Cadeia fotossintética de transferência de elétrons
EW	Intemperismo Aprimorado
GEE	Gases do Efeito Estufa
Gt	Gigatoneladas
H <sub>2</sub> O	Água
HTT	Tratamento Hidrotérmico
IR	Luz Infravermelha
IGE	Imunoglobulinas
KOH	Hidróxido de potássio
MBECCS	Bioenergia à base de microalgas com captura e armazenamento de Carbono

MDEA	Metildietanolamina
MEA	Monoetanolamina
Mg	Magnésio
MOFs	Estruturas metal-orgânicas
Mt	Megatoneladas
NC	Carbono Microporoso Contendo Nitrogênio
NaCO <sub>3</sub>	Cálcio Carbonato de sódio
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NADPH	Fosfato de Dinucleótido de Adenina e Nicotinamida
NADS	Diamina Sulfanato de Sódio
NETS	Tecnologias de Emissões Negativas
NH <sub>3</sub>	Amônia
NHIW	Resíduos industriais não perigosos
NO <sub>x</sub>	Óxido de Nitrogênio
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
O <sub>2</sub>	Oxigênio
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potência Hidrogênionica
ppm	Partes por Milhão
PSI	Fotossistema I
PSII	Fotossistema II
PSQH <sub>2</sub>	Plastoquinona
PV	Instalações Fotovoltaicas
PZ	Piperazina
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
SOC	Carbono Orgânico do solo
SO <sub>x</sub>	Óxido de enxofre
SSP	Caminhos Socioeconômicos Compartilhados
T	Toneladas
UE27	Estados Membros da União Européia
UR	Umidade relativa

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Efeito estufa e aquecimento global.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Qualidade do ar.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 <i>Permafrost</i>.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4 Uso de combustíveis fósseis e energias renováveis.....</b>	<b>18</b>
<b>3.5 Tecnologias de emissões negativas.....</b>	<b>19</b>
3.5.1 Reflorestamento (AR).....	20
3.5.2 Intemperismo aprimorado (EW).....	23
3.5.3 Captura direta do ar (DAC).....	24
3.5.4 Bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS).....	25
3.5.5 Captura e armazenamento de carbono (CCS).....	27
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>32</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>37</b>

## 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 (YORO, DARAMOLA, 2020).

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 (KHOSROABADI, 2021; MU, 2020).

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. (SIVARETHINAMOHAN, 2021).

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. Por tanto, novas tecnologias capazes de regular os níveis desse gás precisam ser desenvolvidas (MU, 2020).

Dentro desse contexto, as tecnologias de emissões negativas (NETs) tem 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 uma forte candidato para a redução da poluição atmosférica (UDEN; DARGUSCH; GREIG, 2021).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

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.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Exemplificar maneiras de remover CO<sub>2</sub> da atmosfera através das NETs;
- Expor as vantagens e limitações das NETs como solução para redução dos GEE em especial o CO<sub>2</sub>.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 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 (KLEIN; ANDEREG, 2021). 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 (DI CICCIO; et al, 2020; TIMLIN; et al, 2022).

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 (RANNEY; VELAUTHAM, 2021).

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 a 40°C, visando um aumento de 2,4°C (KLEIN; ANDEREG, 2021).

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 (BONNEUIL; CHOQUET; FRANTA, 2021; KUMAR; et al, 2022).

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 agnognese

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 (BONNEUIL; CHOQUET; FRANTA, 2021; KUMAR; et al, 2022).

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 (OREGGIONI; et al, 2021).

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 (OREGGIONI; et al, 2021).

### **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 (HASSAN BHAT; JIAWEN; FARZANEH, 2021;SCHRAUFNAGEL; et al, 2019).

A OMS observa que 99% das pessoas respiram ar insalubre causado principalmente por queima de combustíveis fósseis acarretando 43% das mortes totais pela doença obstrutiva crônica do pulmão (DPOC) devido a contaminação do ar. Eventos climáticos, perda de biodiversidade, degradação da terra e escassez de água estão afetando a saúde da população. Essa crise social e de saúde está requerendo a competência da população de assumir o controle de sua saúde e de suas vidas(WHO, 2022; SIVARETHINAMOHAN; et al, 2021).

Mais de 6.000 cidades em 117 países está monitorando a qualidade do ar. Embora tenha essa monitoração, pessoas que vivem nessas cidades ainda respiram níveis insalubres de partículas finas e NO<sub>2</sub>. Essas descobertas conduziram a Organização Mundial da Saúde a salientar a importância da redução do uso de combustíveis fósseis e tomar outras medidas tangíveis para reduzir os níveis de poluição do ar. A OMS revisou no ano de 2021 suas Diretrizes de Qualidade do Ar, tornando-as mais rigorosas em um esforço para apoiar os países a avaliar melhor a salubridade de seu próprio ar (WH, 2022).

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 (SIVARETHINAMOHAN; et al, 2021).

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 (RANNEY; VELAUTHAM, 2021).

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 (DI CICCO; et al, 2020).

Ainda de acordo com Di Cicco; et al (2020), 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.

### **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 (OLIVA; FRITZ, 2018).

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 (ORLOV; et al, 2020).

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 sanguíneo 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 (HUEFFER; et al, 2020).

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 (ZHANG; et al, 2021).

### **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 (VAN ASSELT, 2021).

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 (SOLARIN, 2020).

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 (RAYNER, 2021).

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) (LONDONO-PULGARIN; et al, 2021).

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 (LONDONO-PULGARIN; et al, 2021).

O uso de combustíveis fósseis esgota o teor de  $O_2$  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  $O_2$  e  $H_2O$ . 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. (NEWBOROUGH; COOLEY, 2021).

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, E; Michaelides, D (2020) propôs um sistema energético híbrido industrial com interações térmicas, químicas, elétricas, mecânicas de hidrogênio e informações formados 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.

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 (LEONARD; MICHAELIDES; MICHAELIDES, 2020).

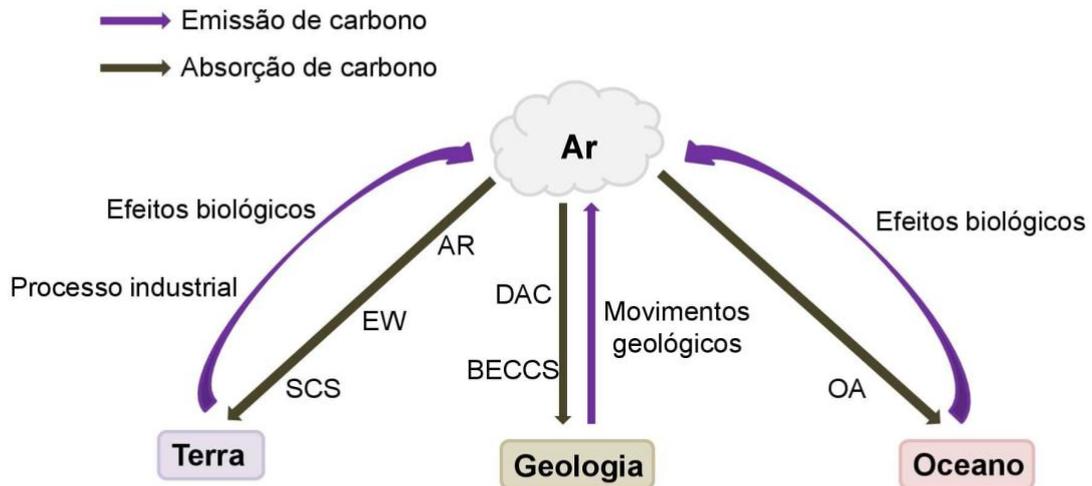
### 3.5 Tecnologia de emissão negativa (NETs)

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 (COOPER; DUBEY; HAWKES, 2022).

Tecnologias de Emissões Negativas (NETs) 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 (JIA, 2022).

Há diversas alternativas de NETs desde as que ampliam os sumidouros de carbono, até o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>. Algumas opções exemplificadas na figura 1 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) (COOPER; DUBEY; HAWKES, 2022).

**Figura 1.** Esquema da Tecnologia de Emissões Negativa



Fonte: Autores

#### 3.5.1 Reflorestamento

O C 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 agroecossistemas. Alguns fatores influem na dinâmica de sequestro de C, entre eles: o manejo, classificação do solo,

clima, recursos hídricos, seleção das espécies arbóreas (CHEN; et al, 2020; LEWIS, 2019).

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 (RYTTER; RYTTER, 2020).

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 (MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, 2022).

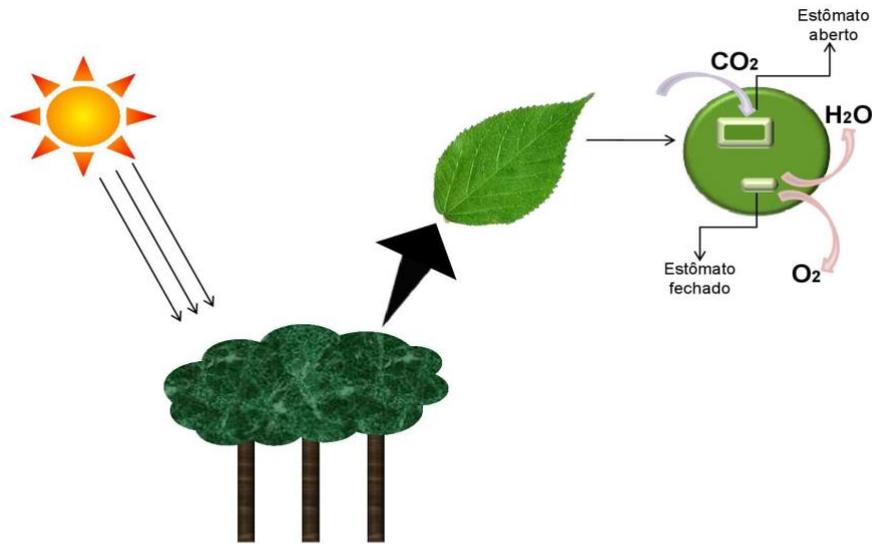
A bacia amazônica possui a maior floresta tropical com alta reserva de C. O solo amazônico tem 74,7% da sua cobertura formada por Latossolos e Argissolos, caracterizados por baixa retenção de cátions e fertilidade, porém, o melhoramento genético de alguns gêneros pode apresentar bom desempenho nesses solos (NUNES, 2020).

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 (NUNES, 2020).

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 (NUNES, 2020).

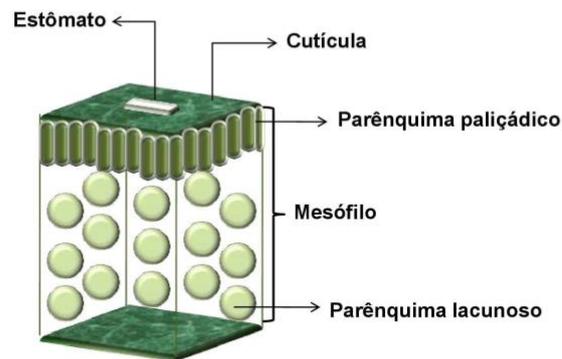
A fotossíntese é um processo ramificado demonstrado na figura 2, que converte a energia da luz em energia química mediante a cadeia fotossintética de transferência de elétrons (ETC), incluída na rede de membranas tilacóides intra-cloroplastas preenchidos por ligantes de pigmentos como a clorofila. A fotossíntese depende do processo de difusão gasosa. O modo em que 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) está representado na figura 3, 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>) até atingir o estroma do cloroplasto como na figura 4 (CRUZ; AVENSON, 2021).

**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  $\text{H}_2\text{O}$



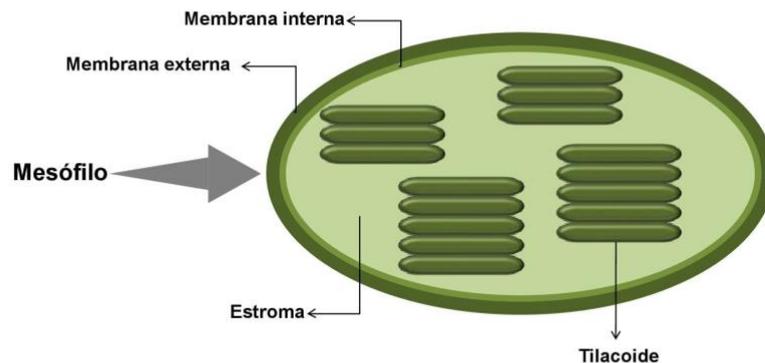
Fonte: Autores

**Figura 3.** O  $\text{CO}_2$  incorporado no espaço intracelular da folha por meio dos poros estomáticos se propaga pelo mesófilo, passando por resistência à difusão de  $\text{CO}_2$  na via mesófila até ser sorvido pelo cloroplasto onde ocorrerão dois fotossistemas (fotossistema I e II)



Fonte: Autores

**Figura 4.** O  $\text{CO}_2$  é difundido na parede celular e introduzido no estroma do cloroplasto, organela onde ocorre o processo de fotossíntese.



Fonte: Autores

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 H<sub>2</sub>O para ligação ao CO<sub>2</sub> 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 O<sub>2</sub>. 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 H<sub>2</sub>O, gerando plastoquinona (PQH<sub>2</sub>) e O<sub>2</sub>; fornecendo pouca energia à planta; (ii) fotossistema I (PSI) produz energia química armazenada e ATP, assim como transportador de hidrogênio, NADPH (SCHMIDT-ROHR, 2021).

### 3.5.2 Intemperismo aprimorado (EW)

O intemperismo aprimorado é baseado na aceleração de reações geoquímicas naturais de minerais para remover o CO<sub>2</sub> atmosférico, através da conversão de CO<sub>2</sub> em alcalinidade. Os resíduos industriais não perigosos (NHIW) reagem com H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> 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 (JIA, 2022).

As rochas alcalinas ricas em silicato são moídas e aplicadas a 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. (LEWIS, 2021; JIA, 2022).

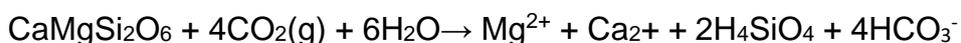
A olivina, silicato utilizado em estudos sobre EW possui alto rebaixamento de CO<sub>2</sub> em relação ao maciço rochoso, porém, tem como desvantagem liberação de metais tóxicos durante sua dissolução (RINDER; VON HAGKE, 2021).



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 (RINDER; VON HAGKE, 2021).



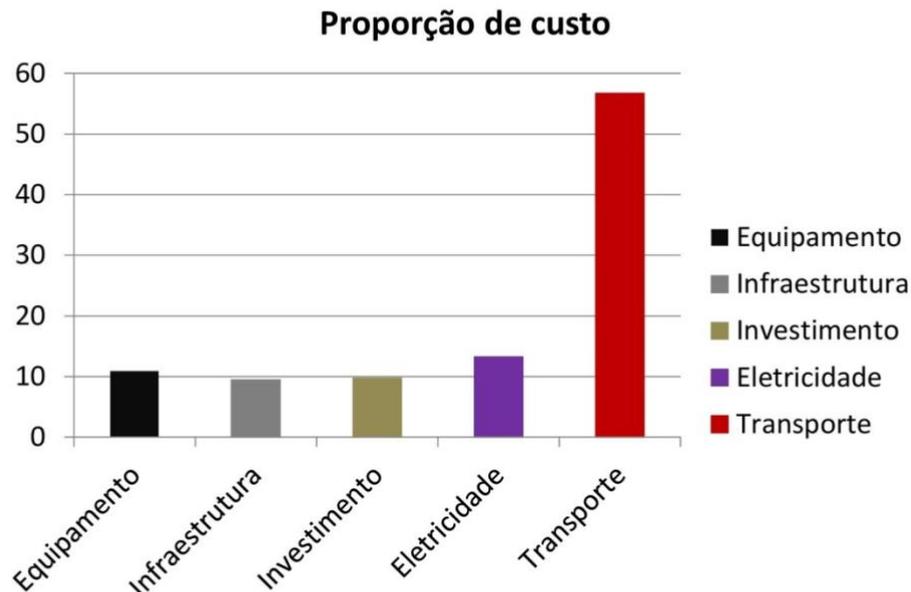
O basalto também usado no EW, é rico em Ca e Mg, fornece alcalinidade ao solo e auxilia a produção agrícola. Possui intemperismo acelerado devido ao desgaste de seus constituintes, aumentando a área de superfície reativa por unidade de volume de basalto triturado comparado aos minerais de rochas graníticas ou sedimentares (LEWIS, 2021).



A principal desvantagem do EW é demonstrada na figura 5 em relação à 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 (LEWIS, 2021).

**Figura 5.** 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%).



Fonte: Autores

### 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 partes por milhão (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 (AN; FAROQUÍ; MCCOY, 2022).

Alguns trabalhos pioneiros usam como base o uso de sorventes 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 (CASTRO-MUÑOZ, 2022).

Pesquisas recentes destacam que a implantação de NETs tem um custo rentável e não interrupto após sua implantação, oferecendo seguro contra vazamento

de carbono, independente 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 (DENG, 2021).

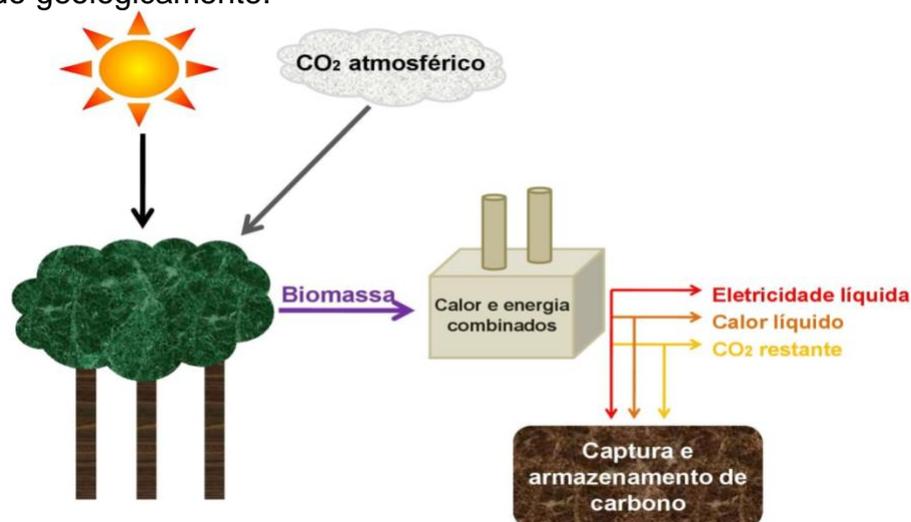
As metodologias de DAC existentes apresentam alta demanda de energia associada à regeneração de solventes. O processo de DAC resulta em uma energia de regeneração menor em comparação com as tecnologias baseadas em solventes de última geração (CUSTELCEAN, 2021).

A Carbon Engineering adpta a DAC captura o  $\text{CO}_2$  atmosférico pelo contator de ar que contém uma fina superfície plástica com hidróxido de potássio em sua composição, o qual reage com o  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  puro. Contudo possui repercussões negativas na saúde e no meio ambiente devido aos solventes e necessidade de calor e energia (COOPER; DUBEY; HAWKES, 2022).

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

A BECCS é uma técnica onde as plantas são cultivadas absorvendo  $\text{CO}_2$  atmosférico via fotossíntese, direcionando-o a uma usina, onde o  $\text{CO}_2$  será capturado e armazenado, podendo também ser usado diretamente aumentando sua eficiência energética como na figura 6. 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 (ALMENA, 2022).

**Figura 6.** Cultivo de culturas ou florestas com absorção de  $\text{CO}_2$  atmosférico. A biomassa correspondente é queimada em uma usina combinada de calor e energia, gerando calor e eletricidade; o produto da combustão ( $\text{CO}_2$ ) é capturado e armazenado geologicamente.



Fonte: Autores

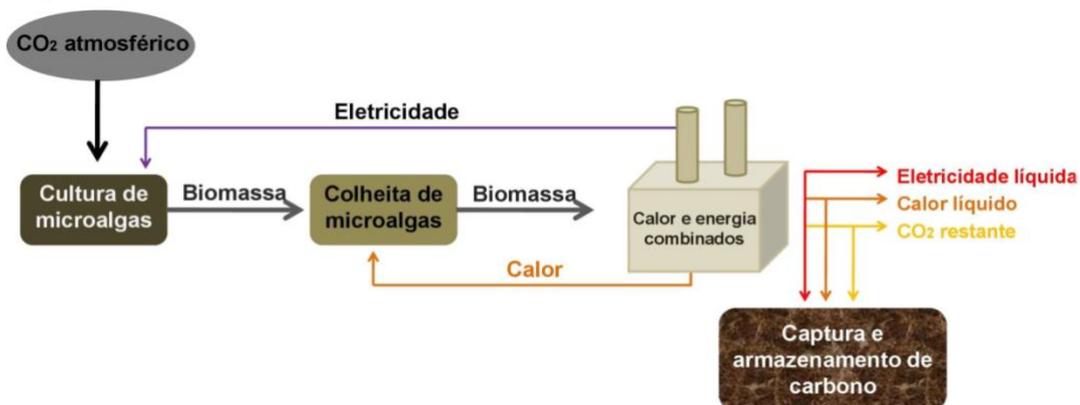
Tecnologias comercialmente isoladas como combustão, gaseificação, depuração de aminas pós-combustão, absorção de pré-combustão usando metanol

ou dutos de transporte de CO<sub>2</sub> e armazenamento em aquíferos salinos fazem parte dos sistemas BECCS. No entanto, sua aplicação comercial integrado 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> armazenado) é o Illinois Industrial CCS, capturando até 1 Mt CO<sub>2</sub> anualmente, enquanto as demais são sistemas piloto (ALMENA, 2022).

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 (EVEN, 2022).

A técnica de BECCS à base de microalgas (MBECCS) representada na figura 7 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 (EVEN, 2022).

**Figura 7.** Técnica de MBECCS. O CO<sub>2</sub> é absorvido pelas microalgas (biomassa) e encaminhada para uma usina que combina calor e energia tendo como produto final eletricidade líquida (a qual retorna e auxilia na cultura de microalgas), calor líquido (auxilia na colheita de microalgas) e CO<sub>2</sub> o qual será capturado e armazenado geologicamente.



Fonte: Autores

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 (EVEN, 2022).

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 (BAIXO; SCHÄFER, 2020).

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) (FAJARDY, 2021).

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 e flexibilidade e funcionalidade (ALMENA, 2022).

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

Em 2019, 51 unidades de plantas CCS com capacidade de captura e armazenamento >40 milhões de toneladas estavam em operação. Porém, outras 48 instalações estão em etapa avançada de desenvolvimento com a finalidade de ampliar esse rendimento (ALAMI, et al., 2020).

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 (ARNING, 2021).

A captura e armazenamento de carbono (CCS) por sua vez têm como finalidade aperfeiçoar a eficiência energética e transferir o CO<sub>2</sub> decorrente da combustão de combustíveis fósseis para o aprisionamento subterrâneo permanente. Fatores como a pressão de fluxo de gás, tipo de combustível e a concentração de CO<sub>2</sub> no gás, determinam a escolha do sistema de captura (DU; et al, 2021).

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 – figura 9); combustão ou oxidação (queima do combustível na presença de O<sub>2</sub> quase puro para produção de CO<sub>2</sub> – figura 10); e pós-combustão (A saída dos gases de combustão passa pela separação do CO<sub>2</sub> dos demais gases através de tecnologias apropriadas – figura 11) (FERON; et al, 2019).

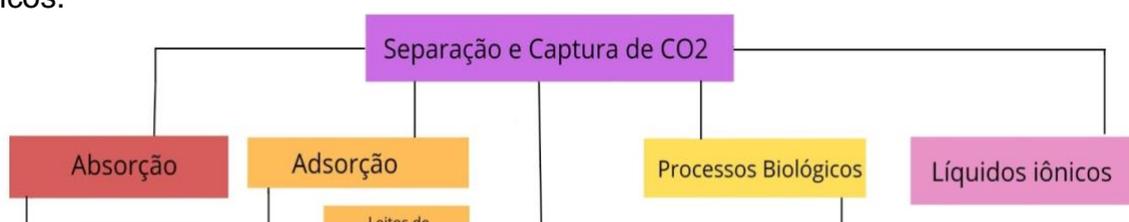
A captura e armazenamento de carbono “pós-combustão” referida na figura 11 envolve a separação de CO<sub>2</sub> de uma corrente de gás, condensando-o em um fluido supercrítico para conservação subterrânea ou sob o oceano. Dependendo do tipo de combustível, contaminantes podem interferir no sistema. 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 (GUNDERSON; STUART; PETERSEN, 2020).

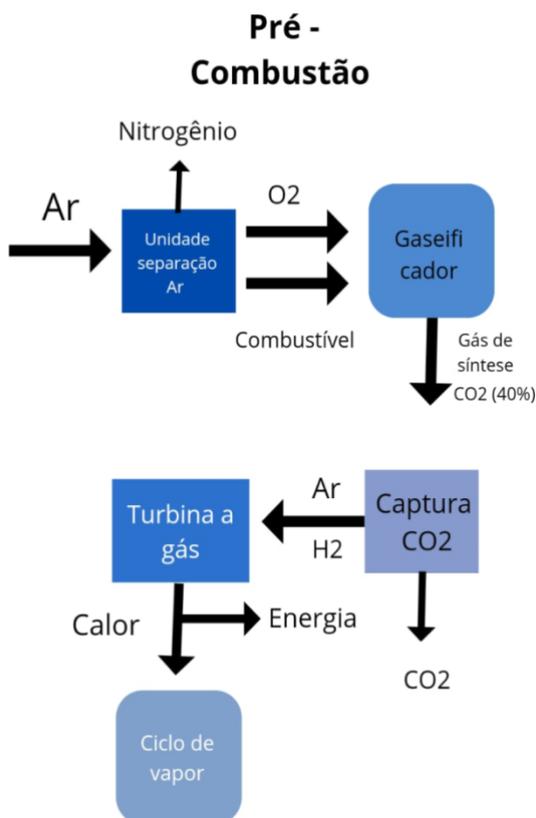
Os geopolímeros são materiais inorgânicos mutáveis e de baixo custo devido às suas propriedades expressas de acordo com sua caracterização e método de síntese. O tamanho da partícula, reatividade e cristalinidade dos materiais precursores determina suas propriedades químicas, físicas e aplicabilidade. A aplicação deste material é mais recomendada para sistemas de membranas e adsorventes na pré-combustão e pós-combustão. Materiais híbridos desenvolvidos pela fusão de geopolímeros com zeólitas, carvão ativado e hidrotalcitas são aplicados em escala laboratorial em processos de CCS. Entretanto, a lixiviação de sódio ou potássio é uma complicação que pode ocasionar incrustação e corrosão dos equipamentos (ALAMI, et al., 2020).

Dentre as demais metodologias de captura de CO<sub>2</sub> esquematizada na figura 8 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) (VAZ JR; DE SOUZA; BEATA, 2022).

**Figura 8.** Em processos de CCS de pré-combustão, oxícombustão e pós-combustão a técnica de separação e captura de CO<sub>2</sub> pode ser realizada através de métodos como: absorção, adsorção, captura por membrana, processos biológicos e líquidos iônicos.



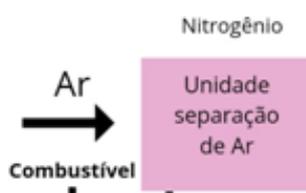
Fonte: Autores



**Figura 9.** Processo de captura pré-combustão: O ar é separado na unidade de separação de ar para a remoção de 71% de  $N_2$ , pois essa remoção evitará a demanda de grandes equipamentos durante o processo. É adicionado  $O_2$  e combustível ao sistema sendo direcionado a um gaseificador o qual irá converter todo o combustível à fase gasosa (fase em que acontecem as reações tornando mais fácil a remoção do  $CO_2$ ) obtendo-se o gás síntese (formado por 40% de  $CO_2$ ). Após a captura do  $CO_2$  o gás síntese será queimado em uma turbina a gás gerando vapor d'água e energia.

Fonte: Autores

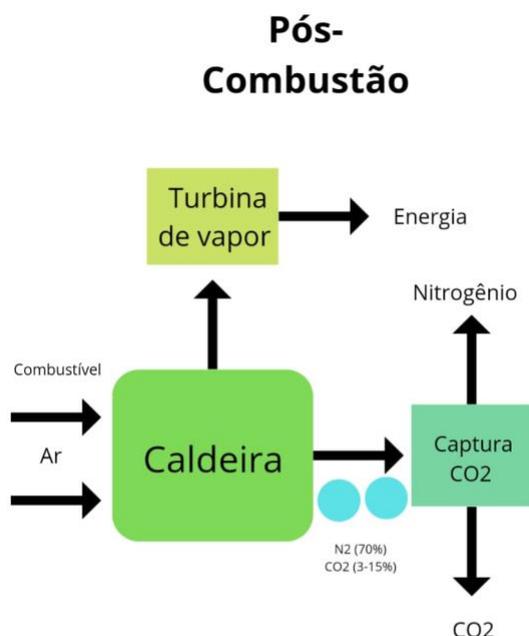
## Oxi- Combustão



**Figura 10.** Processo de oxi-combustão: ocorre à separação do ar em  $N_2$  e  $O_2$ , em seguida o  $O_2$  será adicionado a uma caldeira juntamente com o combustível gerando assim

vapor para obtenção de energia elétrica e captura de CO<sub>2</sub> no final do processo. Esse método tem a possibilidade de fazer reciclagem do efluente gasoso para maior captura de CO<sub>2</sub>.

Fonte: Autores



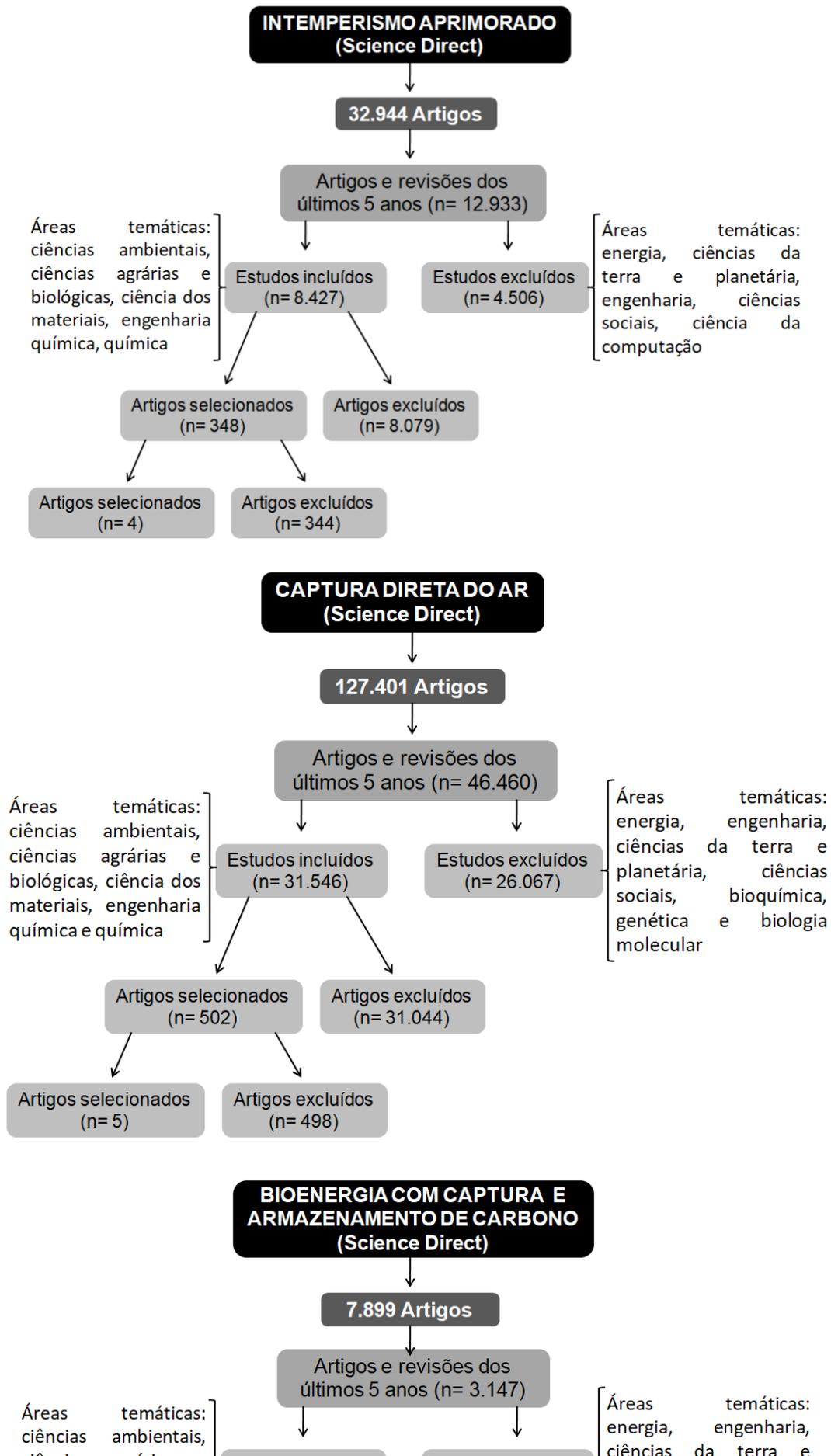
**Figura 11.** Processo de captura pós-combustão: entrada de combustível e ar em uma caldeira para gerar vapor sendo direcionado a uma turbina de vapor para geração de energia elétrica. Esse processo tem como produto até 15% de CO<sub>2</sub> em centrais térmicas a carvão e até 3% em centrais térmicas a combustível além da obtenção de 70% de N<sub>2</sub> passando pela separação e captura dos dois gases através de metodologias demonstradas na figura 8.

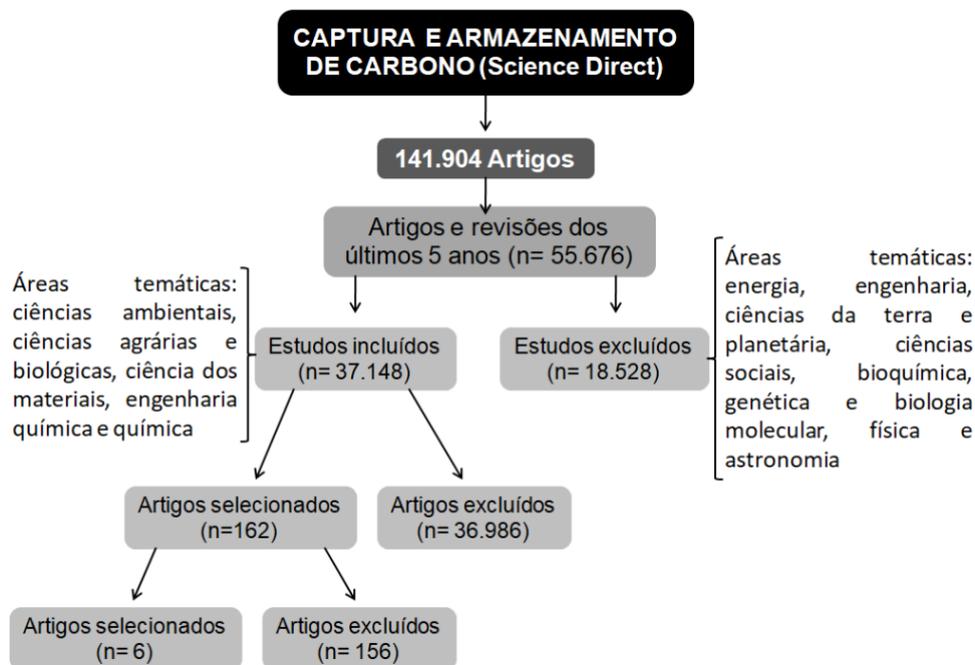
Fonte: Autores

#### 4. METODOLOGIA

Esse trabalho é uma análise descritiva e qualitativa com ênfase em tecnologias que buscam remover o CO<sub>2</sub> atmosférico como uma alternativa para a melhoria da qualidade do ar a qual interfere na saúde humana. Para desenvolver o vigente trabalho a metodologia adotada teve como base pesquisas bibliográfica nas temáticas de: ciência ambiental, ciências agrárias e biológicas, ciência dos materiais, engenharia química, química e bioquímica. Além do mais, foram empregados como critérios de inclusão artigos e revisões publicadas nos últimos cinco anos na língua inglesa, utilizando como base de dados o ScienceDirect e Pubmed buscando pelas palavras chave: greenhouse effect, global warming, air quality, permafrost, energy sources and

fuels, carbon negative technology, reforestation, enhanced weathering, direct air capture, bioenergy with carbon capture and storage, carbon capture and storage.





## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o Quadro 1, alguns autores desenvolveram metodologias aplicadas ao sequestro de CO<sub>2</sub> mostrando resultados quantitativos quanto as suas capacidades de remoção líquida de dióxido de carbono, além de vantagens e limitações de cada técnica.

**Quadro 1.** Capacidade de armazenamento de CO<sub>2</sub> de metodologias NETs

Autores	Metodologia	Resultados
(BASTIN, et al., 2019)	Reflorestamento	Se os bosques e florestas restaurados em 0,9 bilhões de hectares fossem capazes se maturarem em tempo hábil eles poderiam armazenar 205 Gt C. O potencial máximo de restauração seria capaz de reduzir ~300 Gt da carga antropogênica global de carbono.
COOPER; DUBEY; HAWKES, 2022	Reflorestamento	O AR remove em média de 5 kg CO <sub>2</sub> por árvore anualmente.
COOPER; DUBEY; HAWKES, 2022	Intemperismo aprimorado	O mineral moído da olivina 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> .
JIA, 2022	Intemperismo aprimorado	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). O custo de todo o processo é \$184,25/t CO <sub>2</sub> .
RINDER; VON HAGKE, 2021	Intemperismo aprimorado	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> . A adição de olivina à água do mar requer partículas <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. 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.
CASABAN; TSALAPOR TA, 2022.	Captura Direta do Ar	A empresa Carbon Engineering visa capturar 1 Mt CO <sub>2</sub> da atmosfera por ano. Utilizando um solvente a base de hidróxido de potássio (KOH).

AN; FAROO QUI; MCCO Y, 2022	Captura Direta do Ar	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.
EVEN, 2022	Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono	A utilização de MBECSS tem como objetivo a remoção de 10 Gt de CO <sub>2</sub> anualmente da atmosfera. 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. MBECSS necessitaria de 4,5 vezes mais amônia do que BECCS sozinho. 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.
ALMENA, 2022	Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono	A monoetanolamina (MEA) apresenta baixo teor de pressão parcial de CO <sub>2</sub> , sulfeto de carbonila (COS) e dissulfeto de carbono (CS <sub>2</sub> ) além de possuírem concentrações de contaminantes insignificantes.
CHENG; PORTER; COLOSI, 2020	Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono	A Drax BECCS utiliza a MEA como solvente, com capacidade de remoção de 4 Mt CO <sub>2</sub> por ano.
FREIRE; JOSÉ; MOREIRA, 2022	Captura e Armazenamento de Carbono	Materiais geopoliméricos têm sido aplicados como adsorventes de CO <sub>2</sub> a baixas temperaturas, porém, para o CO <sub>2</sub> ser desorvido faz-se necessário o aumentando a temperatura ou a diminuição da pressão. Esse efeito térmico durante a dessorção combinado com a oscilação de pressão e temperatura leva a um tempo mais curto para a reestruturação do compósito geopolímero e zeólita. Geopolímeros híbridos enxertados com amina podem adsorver quimicamente o CO <sub>2</sub> .

Alami (2020) abordou em sua pesquisa os principais solventes iônicos e solventes sólidos mostrando suas vantagens e desvantagens de cada substância, algumas delas não foram elucidadas suas desvantagens. Entretanto, o solvente iônico e sólido mais difundido é baseado na depuração de amina devido a sua capacidade de mitigar um gás alvo, remoção de ácido e baixo custo.

Bastin, et al. (2019) e Cooper; Dubey; Hawkes (2022) apesar de concordarem que a metodologia de reflorestamento tem elevada remoção líquida de carbono e exibe mínima ecotoxicidade, limitações como alta demanda de manejo florestal e o tempo de maturação dessas árvores são fatores a serem considerados.

Em relação ao intemperismo aprimorado autores como Cooper; Dubey; Hawkes (2022), Jia (2022) e Rinder; Von Hagke (2021) apesar de considerarem a eficiência de diferentes minerais que possuem grande área de superfície responsável por reagir e capturar o CO<sub>2</sub> atmosférico, uma barreira a ser enfrentada em ambos os processos é a redução da pureza do minério, ecotoxicidade terrestre e humana desencadeada pelo uso da eletricidade para atingir granulometrias, seu transporte e espalhamento na terra.

Os resultados sobre a DAC demonstrados por Casaban; Tsalaporta (2022) e An; Farooqui; McCoy (2022) constataram que a taxa de captura de CO<sub>2</sub> é mais sensível à temperatura do que à umidade e que a demanda energética é um fator limitante para aplicação da DAC em larga escala.

A respeito da BECCS microalgas foram implantadas no trabalho de Even (2022), apesar da maior eficiência fotossintética dessas microalgas em relação a outras fontes de biomassa, a artificialização do solo em grande escala e a produção de cinzas durante a combustão são limitações relevantes na escolha do processo. Ainda sobre a BECCS, Almena (2022) e Cheng; Porter; Colosi (2020) foi estabelecido o uso do solvente MEA determinando parâmetros qualitativos e quantitativos, porém, desvantagem como a alta intensidade de energia e a corrosão envolvida foram relatadas em ambos os trabalhos.

Um confronto energético em baixa produtividade de área entre a MBECCS e a DAC expõe que a MBECCS dissipa uma eletricidade comparável ou melhor que a DAC. Em relação a um maior rendimento em área de aerogeradores e BECCS o MBECCS com aplicação de biofilmes produz eletricidade líquida semelhante, sendo essencial a mistura de microalgas para maior resistência a impactos externos e prováveis impurezas.

Diante dos resultados apresentados acima podemos fazer uma comparação entre as vantagens e limitações de acordo com as técnicas abordadas. Freire; José; Moreira (2022) considerou a utilização de geopolímeros associados a adsorventes como zeólitas uma opção de baixo custo na captura de CO<sub>2</sub>. Outros geopolímeros híbridos com amina também foram considerados no estudo desempenhando um papel eficaz no processo de adsorção.

## 7. CONCLUSÃO

A emissão de GEE promove o aquecimento global, o qual interfere na saúde e no meio ambiente. O gás emitido em maior concentração é o CO<sub>2</sub>. Desta forma este trabalho trouxe metodologias que podem auxiliar na mitigação das mudanças climáticas e na melhoria da qualidade do ar. Embora as NETs contribuam para a redução do aquecimento global, sozinhas não possuem o potencial de reverter o quadro climático previsto para as próximas décadas. Como representantes das NETs temos: AR, EW, DAC, BECCS e CCS. Apesar das vantagens e limitações, a escolha da técnica mais eficaz varia de acordo com os recursos disponíveis, localização geográfica, aprovação pública, subsídios governamentais, entre outros fatores. Entretanto, o custo operacional e demanda energética é uma barreira a ser enfrentada na aplicação destas tecnologias. A maior parte das NETs ainda estão 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.

## REFERÊNCIAS

ALAMI, Abdul Hai et al. Materiais e logística para captura, armazenamento e utilização de dióxido de carbono. **Ciência do Ambiente Total** , v. 717, p. 137221, 2020.

ALMENA, Alberto 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.

AN, Keju; FAROOQUI, Azharuddin; MCCOY, Sean T. O impacto do clima em sistemas de captura direta de ar baseados em solventes. **Energia Aplicada** , v. 325, p. 119895, 2022.

ARNING, Katrin 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.

BAIXO, Sean; SCHÄFER, Stefan. 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.

BASTIN, Jean-François et al. O potencial global de restauração de árvores. **Ciência** , v. 365, n. 6448, pág. 76-79, 2019.

BONNEUIL, Christophe; CHOQUET, Pierre-Louis; FRANTA, Benjamim. Alertas precoces e responsabilidade emergente: as respostas da Total ao aquecimento global, 1971–2021. **Mudança Ambiental Global** , v. 71, p. 102386, 2021.

CASABAN, Daniel; TSALAPORTA, Elena. 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.

CASTRO-MUÑOZ, Roberto 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.

CHEN, Die 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.

CHENG, Fangwei; PORTER, Michael D.; 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.

COOPER, Jasmim; DUBEY, Lucas; HAWKES, Adão. Avaliação do ciclo de vida de tecnologias de emissões negativas para eficácia no sequestro de carbono. **Procedia CIRP** , v. 105, p. 357-361, 2022.

CRUZ, Jeffrey A.; AVENSON, Thomas J. Fotossíntese: uma visão multiscópica. **Journal of Plant Research** , v. 134, n. 4, pág. 665-682, 2021.

CUSTELCEAN, Radu 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.

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

DI CICCIO, Maria Elisa 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.

DU, Yang 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.

EVEN, Catherine 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.

FAJARDY, Mathilde 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.

FERON, Paul 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.

FREIRE, Alisson Lopes; JOSÉ, Humberto Jorge; MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz. Aplicações potenciais para geopolímeros na captura e armazenamento de carbono. **International Journal of Greenhouse Gas Control** , v. 118, p. 103687, 2022.

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.

HASSAN BHAT, Tavoos; JIAWEN, Guo; FARZANEH, Hooman. 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.

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

JIA, Xiaoping et al. Redução regional de carbono com intemperismo aprimorado de resíduos industriais não perigosos. **Recursos, Conservação e Reciclagem** , v. 176, p. 105910, 2022.

KLEIN, Tamir; ANDEREG, William RL. 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.

KUMAR, Abhinandan et al. Impacto do COVID-19 nas emissões de gases de efeito estufa: uma revisão crítica. **Ciência do Ambiente Total** , v. 806, p. 150349, 2022.

LEONARD, Mateus D.; MICHAELIDES, Efstathios E.; MICHAELIDES, Dimitrios N. Necessidades de armazenamento de energia para substituição de usinas de

combustíveis fósseis por renováveis. **Energias Renováveis** , v. 145, p. 951-962, 2020.

LEWIS, Amy L. 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.

LEWIS, Tom et al. 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.

LONDONO-PULGARIN, Diana et al. Fóssil ou bioenergia? Tendências do mercado global de combustíveis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , v. 143, p. 110905, 2021.

MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, María et al. Species-specific and generalized biomass models for estimating carbon stocks of young reforestations. **Biomass and Bioenergy** , v. 161, p. 106453, 2022.

MICHAELIDES, Efstathios E.; MICHAELIDES, Dimitrios N. Impacto da energia nuclear na substituição de combustíveis fósseis. **Nuclear Engineering and Design** , v. 366, p. 110742, 2020.

MU, Cuicui et al. O status e a estabilidade do carbono do permafrost no planalto tibetano. **Earth-Science Reviews** , v. 211, p. 103433, 2020.

NEWBOROUGH, Marcus; COOLEY, Graham. Hidrogênio verde: O único combustível balanceado entre oxigênio e água. **Boletim de Células de Combustível** , v. 2021, n. 3, pág. 16-19, 2021.

NUNES, Sâmia 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.

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

OREGGIONI, Gabriel David 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.

ORLOV, Dmitry 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.

RANNEY, Michael Andrew; VELAUTHAM, Leela. 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 Behavioral Sciences** , v. 42, p. 139-146, 2021.

RAYNER, Tim. 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.

RINDER, Thomas; VON HAGKE, Christoph. A influência do tamanho das partículas no potencial de intemperismo basáltico aprimorado para a remoção de dióxido de carbono - Insights de uma avaliação regional. **Journal of Cleaner Production** , v. 315, p. 128178, 2021.

RYTTER, Rose-Marie; RYTTER, Lars. 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.

SAÚDE, Organização Mundial de. Bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre: novos dados da OMS: mais de 6.000 cidades já monitoram a qualidade do ar. 2022. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>. Acesso em: 06 dez. 2022.

SAÚDE, Organização Mundial de. A OMS pede ação acelerada para proteger a saúde humana e combater a crise climática em um momento de maior conflito e fragilidade. 2022. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/06-04-2022-who-urges-accelerated-action-to-protect-human-health-and-combat-the-climate-crisis-at-a-time-of-heightened-conflict-and-fragility>. Acesso em: 06 dez. 2022.

SCHMIDT-ROHR, Klaus. 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.

SCHRAUFNAGEL, Dean E. et al. Health benefits of air pollution reduction. **Annals of the American Thoracic Society**, v. 16, n. 12, p. 1478-1487, 2019

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.

SOLARIN, Sakiru Adebola. 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.

YORO, Kelvin O.; DARAMOLA, Michael O. 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.

TIMLIN, Ulla et al. Desafios do degelo do permafrost e da vida em Svalbard. **Pesquisaatualemsustentabilidadeambiental** , v. 4, p. 100122, 2022.

UDEN, Sam; DARGUSCH, Paul; GREIG, Chris. Cortando o ruído nas emissões negativas. **Joule** , v. 5, n. 8, pág. 1956-1970, 2021.

VAN ASSELT, Harro. 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.

VAZ JR, Sílvio; DE SOUZA, Ana Paula Rodrigues; BAETA, Bruno Eduardo Lobo. Tecnologias para captura de dióxido de carbono: uma revisão aplicada aos setores de energia. **Engenharia e Tecnologia mais Limpas** , p. 100456, 2022.

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