

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**LUANA FERREIRA VIEIRA**

**APLICAÇÃO DE MICRORGANISMOS E SEUS BENEFÍCIOS PARA SEQUESTRO  
E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO**

**UBERLÂNDIA  
2023**

LUANA FERREIRA VIEIRA

APLICAÇÃO DE MICRORGANISMOS E SEUS BENEFÍCIOS PARA SEQUESTRO  
E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Uberlândia como requisito parcial para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dra. Angela Marcia de  
Souza

UBERLÂNDIA

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

V658  
2023 Vieira, Luana Ferreira, 1995-  
APLICAÇÃO DE MICRORGANISMOS E SEUS BENEFÍCIOS PARA  
SEQUESTRO E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO [recurso  
eletrônico] / Luana Ferreira Vieira. - 2023.

Orientador: Dra. Angela Marcia de Souza.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em  
Engenharia Ambiental.  
Modo de acesso: Internet.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia ambiental. I. Souza, Dra. Angela Marcia  
de, 1968-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Graduação em Engenharia Ambiental. III.  
Título.

CDU: 628.5

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

LUANA FERREIRA VIEIRA

APLICAÇÃO DE MICRORGANISMOS E SEUS BENEFÍCIOS PARA SEQUESTRO  
E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Uberlândia como requisito parcial para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Angela Marcia de  
Souza

Uberlândia, 2023.

Banca Examinadora:

Prof<sup>a</sup> Dra. Angela Marcia de Souza - UFU

Prof<sup>a</sup> Dra. Samara Carbone - UFU

Prof<sup>a</sup> Dra. Renata Pereira Marques - IF Goiano Campis Rio Verde

## AGRADECIMENTOS

A saudosa banda Engenheiros do Hawaii tem uma música que em um dos seus trechos diz “Não vim até aqui pra desistir agora”, em vários momentos dessa jornada desistir me parecia o certo, usei muitas vezes esse trecho como um mantra para me manter forte e seguir com o meu propósito.

Agradeço primeiramente a Luana de 2015 que tomou a decisão correta de desbravar o desconhecido, e por todas as decisões e escolhas que fizeram com que esse momento pudesse acontecer.

Agradeço minha família (Valiaine Divina Ferreira Vieira, Valdemar Vieira Silva, João Ferreira dos Reis Neto, Marcela Cristina Fonseca Bessa, Viviane Silvestre Ferreira, Vanilson Maia Medeiros e João Ferreira dos Reis (*in memoriam*)), que apesar de todas as dificuldades e desentendimentos sempre estiveram comigo, me amparando e inspirando para continuar nessa caminhada.

Agradeço minha segunda família (Raissa Barcelos, Julia Sousa Costa, Amanda da Cunha Ferreira, Iury Lopes e Thiago Martins Bolina Costa), que foram meu suporte, compartilhando momentos que nunca serão esquecidos.

Agradeço principalmente a minha namorada (Renata Lima da Cunha Ferreira), que foi e é o meu ponto de equilíbrio e sanidade (as vezes) nesses últimos 6 anos, sou feliz que apesar de todas as impossibilidades durante nosso caminho sempre nós mantivemos unidas.

Agradeço minha querida orientadora (Prof<sup>a</sup> Dra. Angela Marcia de Souza) que durante todo esse processo apoiou meu projeto, sempre paciente me guiando para desenvolver o meu melhor.

Agradeço ainda minha banca avaliadora (Prof<sup>a</sup> Dra. Renata Pereira Marques e Prof<sup>a</sup> Dra. Samara Carbone) que foram escolhidas além dos seus vastos conhecimentos acadêmicos, por representarem mulheres fortes e inspiradoras que deixaram suas marcas em minha vida.

Por fim, agradeço ainda as inomináveis pessoas, que passaram por mim e compartilharam suas vivências e experiências, que me fortaleceram e ergueram, fazendo com que me tornasse a mulher que sou hoje.

## RESUMO

O carbono é um elemento químico com a capacidade de assumir diversas formas, dependendo de sua composição, e desempenha várias funções. Existem duas formas químicas de carbono de grande importância para a natureza: o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ). Ambos são gases que têm o potencial de intensificar o efeito estufa na atmosfera, o que pode alterar o clima da Terra e ter sérias consequências para a biodiversidade. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo compreender os benefícios da utilização de microrganismos para o sequestro e armazenamento de carbono, com o intuito de reduzir sua presença no ambiente. A metodologia empregada foi a revisão bibliográfica, na qual foram analisados autores e estudos que abordam a temática proposta, com o intuito de apresentar as informações mais relevantes. Os resultados obtidos reuniram um total de 10 estudos relacionados ao tema, o que permitiu atender ao objetivo da pesquisa. Além disso, ficou evidente a eficácia do uso de microrganismos como agentes de sequestro de carbono, bem como a influência da qualidade do solo nesse processo. Dessa forma, foi possível compreender como os microrganismos podem desempenhar um papel crucial no sequestro e armazenamento de carbono. Isso se dá através de diversas metodologias, que visam tanto incorporar o carbono sequestrado em outros processos naturais realizados pelos organismos presentes no solo, quanto armazená-lo no solo como forma de utilizar o ambiente como um reservatório natural.

**Palavras chave:** Sequestro de carbono. Microrganismos. Solo. Efeito Estufa.

## **ABSTRACT**

Carbon is a chemical element with the ability to take on various forms depending on its composition and serves several functions. There are two chemical forms of carbon that are of great importance to nature: carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>). Both are gases with the potential to enhance the greenhouse effect in the atmosphere, which can alter the Earth's climate and have serious consequences for biodiversity. In this context, this study aims to understand the benefits of using microorganisms for carbon sequestration and storage, with the intention of reducing its presence in the environment. The methodology employed was a bibliographic review, in which authors and studies addressing the proposed theme were analyzed to present the most relevant information. The results gathered a total of 10 studies related to the topic, which allowed us to achieve the research objective. Furthermore, the effectiveness of using microorganisms as carbon sequestration agents was evident, as well as the influence of soil quality in this process. Thus, it was possible to understand how microorganisms can play a crucial role in carbon sequestration and storage. This is achieved through various methodologies, aiming to both incorporate the sequestered carbon into other natural processes carried out by organisms in the soil, and to store it in the soil as a way to use the environment as a natural reservoir.

**Keywords:** Carbon Sequestration. Microorganisms. Soil. Greenhouse Effect.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo biogeoquímico do carbono.....	15
Figura 2 - Concentração de dióxido de carbono na atmosfera de 1960-2020.....	17
Figura 3 - Emissões de CO <sub>2</sub> por setor.....	18
Figura 4 - Funções da matéria orgânica do solo. ....	23



## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Síntese dos autores encontrados.....	27
---	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

- CO<sub>2</sub> Dióxido de Carbono  
COP27 27º Conferência do Clima  
ONU Organização das Nações Unidas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Geral.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Ciclo do carbono.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Os efeitos do excesso de gases estufa no ambiente .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Busca por métodos alternativos de sequestro de carbono .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4 A mudança climática no Brasil .....</b>	<b>21</b>
<b>3.5 A matéria orgânica no solo .....</b>	<b>23</b>
<b>3.6 Microrganismos como estratégia .....</b>	<b>24</b>
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>26</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>34</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>36</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O carbono é uma molécula química que pode possuir diversos formatos de acordo com sua composição, além de ter diversas funções. O carbono possui dois elementos químicos que são importantes para a natureza, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ), sendo ambos gases capazes de aumentar o efeito estufa da atmosfera, fazendo com que transforme o clima na Terra e podendo levar a consequências graves para as formas de vida.

O efeito estufa é um efeito natural que, garante aquecimento ao planeta, fazendo com que se torne ideal para que seres vivos possam viver em condições adequadas, mas quando aumentado, pode causar problemas graves ao meio ambiente, como as mudanças climáticas, levando ao derretimento de calotas polares, aquecimento de locais originalmente frios e outras alterações; alterando *habitats* e consecutivamente toda a vida de determinado local (MONTEIRO, 2018).

Devido ao desenvolvimento desenfreado da urbanização, a emissão desses gases tem crescido cada vez mais, levando à necessidade de desenvolver metodologias que consigam conter a produção dos compostos de carbono na natureza e assim diminuindo o impacto da emissão. Alencar e colaboradores (2016) sugerem o sequestro de carbono como uma alternativa, onde através de dispositivos, o carbono é retirado da atmosfera e convertido em outros elementos ou estocado. O dispositivo sugerido pelos autores neste estudo, é o uso de seres vivos que sejam capazes de sequestrar este carbono e estocar a molécula em seus tecidos, como o caso de algumas microalgas e alguns microrganismos.

O desmatamento também tem sido uma das grandes problemáticas no que tange a atividade humana, levando a níveis comprometedores de vegetações que são capazes de realizar fotossíntese e assim converter o  $\text{CO}_2$  em oxigênio. Diante do cenário apresentado e da necessidade de buscar novas alternativas viáveis de sequestro de carbono, essa pesquisa tem como objetivo compreender para explicar a seguinte temática: como o uso de microrganismos poderá promover o sequestro de carbono e ser benéfico para o meio ambiente?

O carbono, assim como diversos outros elementos, possui um ciclo na natureza, podendo estar presente em diversos locais, como no solo. No solo, também há a presença de diversas formas de vida microscópicas que acabam tendo funções importantes dentro destes ciclos biológicos. No caso do carbono, este pode ser obtido

através da degradação da matéria orgânica, transformando-o em carbono orgânico dissolvido ou ainda ser oriundo de biomassa microbiana, tendo a participação ativa de diversas formas de vida neste processo (HELLEQUIN *et al.*, 2021).

A presença de microrganismos nos ciclos biológicos é capaz de alterar a quantidade do componente químico que é produzido ou estocado, fazendo com que o solo seja um grande depósito para esses elementos, incluindo o carbono. No entanto, é preciso compreender as formas de carbono presente no local, tendo em vista que cada microrganismo é capaz de metabolizar uma quantidade específica de carbono e por isso, para realizar o sequestro biológico de carbono, é necessária uma quantidade pré-determinada de microrganismos e também das espécies adequadas para isso (SHAO *et al.*, 2023).

Outro fator determinante para que o sequestro biológico de carbono seja eficiente, é o estudo das condições do ambiente e também as propriedades químicas do solo, podendo ainda fazer o uso de adubação para otimizar os nutrientes e assim incentivar o sequestro de carbono. Variantes como pH, condutividade elétrica, salinidade, macronutrientes e micronutrientes devem ser analisadas previamente, de forma a garantir que o máximo de eficiência seja obtida durante o processo.

O solo com a presença de microrganismos também sinaliza um ambiente saudável de qualidade, já que a atividade biológica destes microrganismos também libera nutrientes para o solo e enriquece as formas de vida ali presentes (MCGONIGLE; TURNER, 2017; BHAMBURA *et al.*, 2018).

Para tal, este estudo é dividido em três partes onde a primeira consistiu em demonstrar o estado da arte através de uma revisão bibliográfica, de forma a contextualizar a importância do carbono na atmosfera e o porquê incentivar o sequestro deste componente no ar; em seguida estabelecer a os métodos deste estudo, considerando que será necessário o uso de trabalhos disponíveis na literatura, a fim de dar maior embasamento para a discussão; e por fim, antes das considerações finais, o estudo apresenta os resultados obtidos através de os autores pesquisados, demonstrando as principais informações obtidas e uma discussão para que os objetivos propostos sejam alcançados.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Compreender os benefícios do uso de microrganismos para o sequestro e estoque de carbono no solo, visando a sua diminuição no ambiente.

### **2.2 Específicos**

Quanto aos objetivos específicos, foi planejado:

- I. Levantar alguns dos tipos de microrganismos mais utilizados para este fim;
- II. Conhecer as metodologias para uso de sequestro biológico de carbono;
- III. Mapear o solo como possível reservatório para estocar o carbono que é sequestrado pelos microrganismos presentes no meio.

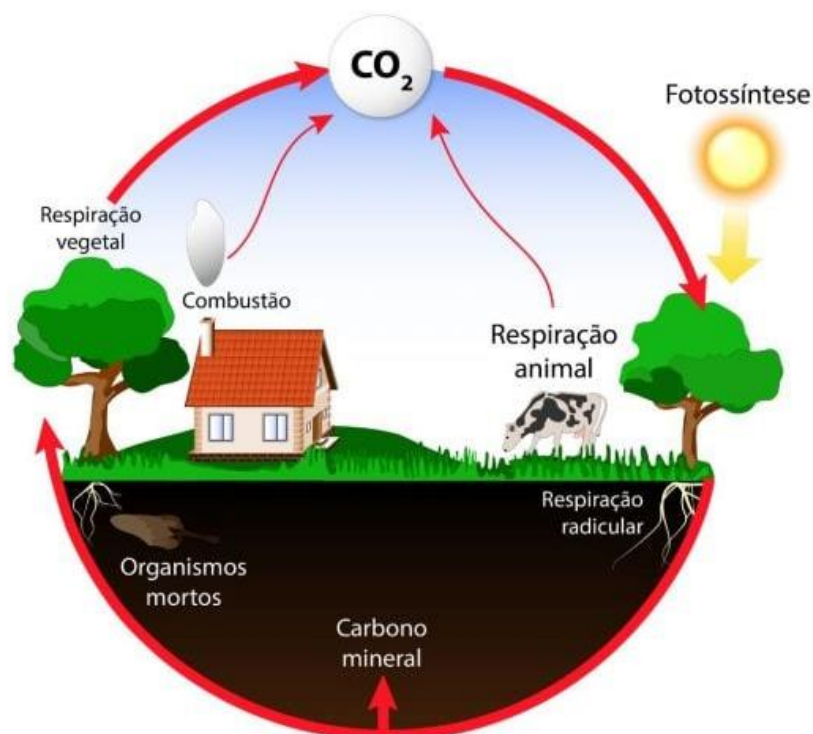
### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Ciclo do carbono

Desde a formação da atmosfera terrestre, o carbono tem sido um elemento considerado vital para a vida e para a natureza, tendo em vista a sua estrutura química que permite quatro ligações covalentes e se integra a outros elementos químicos para formação de macromoléculas (carboidratos, proteínas e lipídeos) e também outras substâncias como tecidos e pigmentos. Dentre os reservatórios, considera-se o oceano o principal ambiente que estoca carbono na Terra, seguido pelas formações geológicas, solo e vegetação, e por fim a atmosfera (SOUZA *et al.*, 2012).

A **Figura 1** demonstra o ciclo do carbono, onde há a emissão da molécula por meio de respiração e combustão e seu sequestro através de plantas e o solo, na figura se demonstra o solo como reservatório.

Figura 1 - Ciclo biogeoquímico do carbono.



Fonte: Savage (2023).

O estudo de Soto-Pinto e Jiménez-Ferrer (2018), demonstrou que a maior quantidade de carbono se encontra absorvida pelo solo, por conta da vegetação que

sequestra o elemento da natureza, além de possuir biomassa viva e matéria orgânica incorporada. Além disso, estruturas consideradas mais complexas também possuem grande importância no sequestro de carbono, tendo em vista a quantidade de matéria que acaba por ser degradada no solo e assim incorpora o carbono em sua estrutura.

Entretanto, em decorrência das ações humanas, reservatórios como o solo, acabam sendo afetados por degradação, dificultando o sequestro do carbono, fazendo com que não somente o solo seja afetado, mas também a atmosfera tenha seu efeito estufa agravado. Quanto aos oceanos, estes, acabam sobrecarregados e a vegetação não consegue realizar a fotossíntese (SOUZA *et al.*, 2012).

### **3.2 Os efeitos do excesso de gases estufa no ambiente**

Em decorrência deste cenário, o assunto aquecimento global tem se destacado nos últimos anos devido ao crescimento industrial desenfreado, desmatamento, diminuição da incidência de chuvas, mudanças climáticas, interferências nos ciclos biogeoquímicos entre outros, sendo estes os motivos para as catástrofes naturais no planeta (BARBOSA *et al.*, 2013).

O degelo nas regiões frias do mundo também é uma consequência destas problemáticas, aumentando os compostos de carbono na atmosfera e tornando o efeito estufa um ciclo vicioso, sendo o principal gás o CO<sub>2</sub>, elemento com ligações de oxigênio junto à estrutura do carbono (BARBOSA *et al.*, 2013).

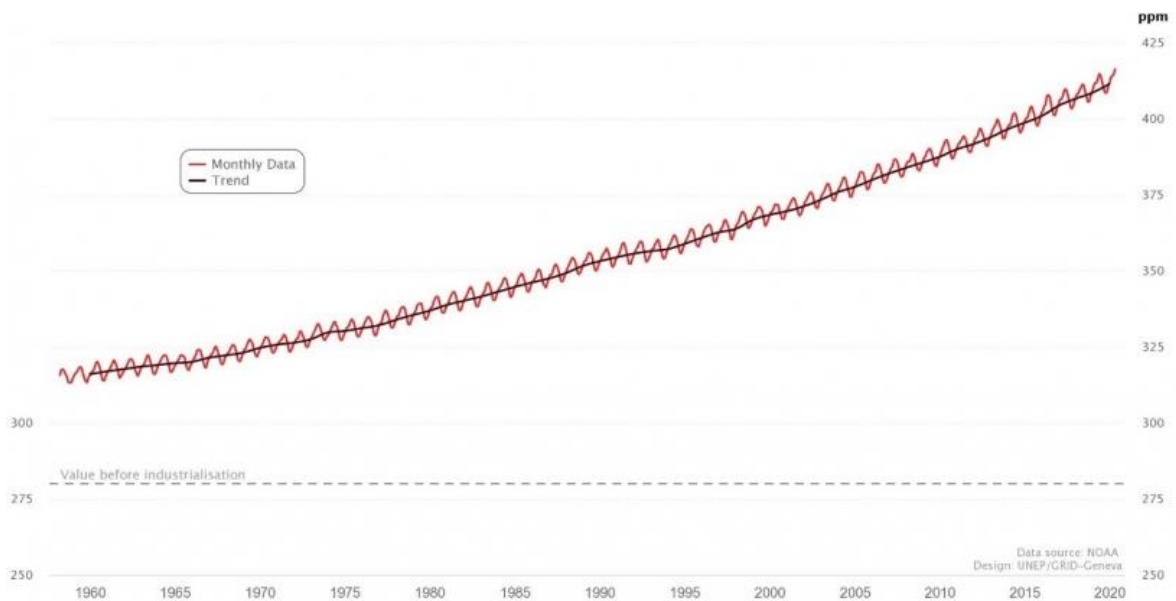
Assim, sendo uma importante molécula oriunda do carbono, o estudo de Barbosa e colaboradores (2013) apresenta um histórico de 2006 a 2013, onde a concentração de CO<sub>2</sub> aumentou de 280 partes por milhão (ppm) para 380 ppm.

Num retrospecto, a União Nacional de Bioenergia (UDOP, 2022) registrou aumento para 421 ppm, sendo a concentração maior do que 50% se considerarem o período anterior do avanço industrial. De acordo com a instituição, 75% da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera é oriunda da queima de combustíveis fósseis, grande parte provocada pela combustão de automóveis, tráfego aéreo, funcionamento industrial, dentre outros.

Na **Figura 2**, é explicitado o aumento de gás carbônico nos últimos anos.



Figura 2 - Concentração de dióxido de carbono na atmosfera de 1960-2020.



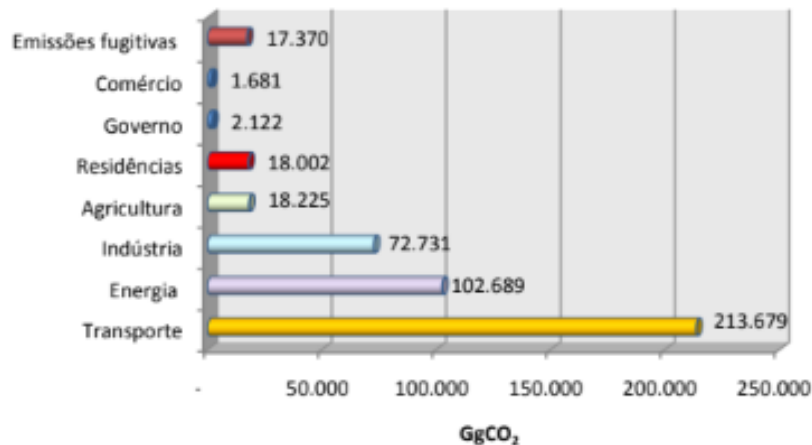
Fonte: UNEP (2020).

De acordo com a **Figura 2**, medida no Hawaii, é possível observar aumento progressivo da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, superando os 400ppm por volta de 2015. Essa média de CO<sub>2</sub> é considerada equivalente ao período Plioceno<sup>1</sup>, há 5 milhões de anos, momento em que a atmosfera não era considerada para a vida humana e não existiam formas de vida como as formas da atualidade.

Em razão destas informações, considera-se que a quantidade de gases presente na atmosfera não é considerada benéfica para a sobrevivência no planeta, sendo necessário o uso de metodologias, como redução do desmatamento, redução de combustíveis fósseis e diminuição de atividades industriais para contribuir para a redução de CO<sub>2</sub>. Além disso, faz-se crucial o reflorestamento, afim de conseguir essa contribuição.

De acordo com a **Figura 3**, o transporte se configura como o principal emissor de gás carbônico na atmosfera, já que a maioria dos veículos (leves, pesados, aéreos e marítimos) ainda é dependente de combustíveis fósseis.

<sup>1</sup> Final do período Terciário da era Cenozoica, há 5,3 milhões de anos atrás, marcado pelo resfriamento da Terra e a criação de um ambiente seco que contribuiu para a expansão das savanas.

Figura 3 - Emissões de CO<sub>2</sub> por setor.

Fonte: Murta e colaboradores (2023).

Essa discussão tem se fortalecido desde a Conferência de Kyoto em 1997, momento em que países criaram e firmaram acordos para reduzir as emissões de gases (BARRETO *et al.*, 2009).

Um dos acordos realizados pelos países, o Protocolo de Kyoto, faz com que estes se comprometam a diminuir as emissões, tendo sanções caso o limite estabelecido seja excedido, sendo este limite controlado por agendas que visam frear o crescimento exacerbado das emissões de gás carbônico (BARRETO *et al.*, 2009).

Aqueles emissores que não cumprem com o protocolo, podem comprar a cota excedente de outro país, de forma que todos trabalhem em união para garantir a redução de CO<sub>2</sub>. Logo, visando diminuir a emissão de gases e os impactos ambientais causados, criou-se o tratado de pagar pelo excesso e a ligação entre as empresas, para que se tenha o comprometimento e a transparência sobre o que tem sido consumido e o que foi poupado (BARRETO *et al.*, 2009).

Apesar da intenção das empresas que corroboram com o estabelecido durante a conferência, outras atividades humanas, como o desmatamento, acabam sendo um empecilho para o sequestro de carbono por parte da vegetação (VIEIRA *et al.*, 2022).

O estudo de Vieira e colaboradores (2022) demonstra que, o solo degradado acaba tendo seus nutrientes retirados o que desencadeia a sua erosão. A erosão do solo, consecutivamente, impede que a vegetação recubra a sua superfície, reduzindo a capacidade de retenção de água, e biomassa o que culmina na aridez.

Outra questão que também acaba comprometendo o sequestro de carbono, é a diminuição das chuvas em decorrência do comprometimento dos ciclos

biogeoquímicos, fazendo com que a vegetação tenha sua manutenção comprometida e contribuindo para a aridez do solo. Logo, para que se torne possível a atividade fotossintética da vegetação, deve-se considerar as condições climáticas, sendo esta a maior razão da necessidade de obter novas formas de sequestrar e estocar o carbono da atmosfera (VIEIRA *et al.*, 2022).

A Conferência de Kyoto também foi a responsável por apresentar pela primeira vez o conceito de sequestro de carbono, incentivando o desenvolvimento de tecnologia ambientalmente correta para reduzir o acúmulo de CO<sub>2</sub>, além de mostrar às organizações que proteger a natureza também é uma forma de reduzir carbono na atmosfera e seus impactos (BARBOSA *et al.*, 2013).

Outro compromisso ambiental firmado mundialmente, é a Agenda 21, também intitulada como Agenda 21 *Sustainable Construction* em 1992, visando a contribuição sustentável de potências, no que tange a sociedade civil, as empresas e o setor público. Esta agenda estabelece conceitos de acordo com as particularidades de cada país, respeitando a economia e as atividades desenvolvidas, mas preconizando a qualidade do ar, diminuição da poluição, a gestão de resíduos sólidos, uso racional de energia e recursos naturais e ainda processos que viabilizem uma agenda ambiental realista (JOHN *et al.*, 2001).

Dentro destes critérios da Agenda 21, considera que a qualidade do ar é um dos aspectos inclusos, inclui indiretamente a questão da emissão de CO<sub>2</sub>, já que este é considerado um dos gases nocivos para a saúde humana. A Agenda 21 também preconiza a saúde e qualidade de vida, e o excesso de CO<sub>2</sub> no ar leva ao superaquecimento global e também problemas respiratórios, indo contra os fatores que contribuem para o bem-estar mundial, sendo esta mais uma política que incentiva a diminuição da emissão de gases na atmosfera.

A agenda ambiental mais recente é a COP27 ocorrida em 2022, uma cúpula que visa reunir os líderes das potências mundiais para discutir sobre o meio ambiente e sustentabilidade, além de ações que contribuam para reduzir os efeitos das mudanças climáticas. Foi a partir de 1992 que as reuniões da Cúpula do Clima começaram a acontecer, com apoio da Organização das Nações Unidas e de outros 197 países, na qual estes firmaram o compromisso de evitar o aquecimento de 1,5 °C da temperatura do planeta, visando reduzir o aquecimento global (ONU, 2022).

Até o momento, ainda não foram atingidas as metas referentes à diminuição da temperatura global, em grande parte, devido ao alto consumo de CO<sub>2</sub> pela população.

### 3.3 Busca por métodos alternativos de sequestro de carbono

A partir disto, o conhecimento sobre as microformas de vida, além do avanço da biotecnologia, possibilitou o investimento em estudos que utilizem microrganismos como forma de sequestrar e estocar carbono, garantindo que as espécies promovam a ciclagem dos nutrientes disponíveis e então incorporem os elementos, retirando-os do meio e contribuindo positivamente no que tange a emissão. (REIS, 2023).

Um exemplo foi mencionado no estudo de Reis (2023), onde gêneros de fungos foram selecionados e observados seu crescimento no meio. Foi comprovado que os microrganismos utilizam o substrato degradando celulose, de forma que elementos sejam retirados do solo e promovam uma ciclagem benéfica às plantas.

Ou seja, além de ser benéfico para o ambiente, o estudo demonstrou que os fungos não causam malefícios para a vegetação presente no mesmo solo, não havendo competição, mas sim uma compensação entre as espécies. De acordo com Silva (2023), para que os microrganismos sejam capazes de sequestrar o carbono, o solo precisa ser de qualidade, com a formação de húmus que será capaz de aprisionar o CO<sub>2</sub>.

Ao considerar a qualidade do solo, a microbiota do ambiente acaba por se desenvolver melhor em locais com maior disponibilidade de nutrientes, o que explica o não comprometimento da vegetação. É visto que, em ambientes onde o nitrogênio é mais abundante, o carbono tem maior dificuldade de fixação, mas com a presença de microrganismos a ciclagem do carbono sendo incentivada, fazendo com que as plantas sejam enriquecidas, o carbono diminuído e a biomassa e atividade microbianas aumentadas. Apesar da atividade microbiana se mostrar presente em meios com maior quantidade de substrato, ainda é possível verificar o auxílio dos microrganismos ao sequestrar carbono (SOUSA, 2019).

É importante considerar que na literatura os microrganismos mais estudados para este fim, além de compreender como o sequestro de carbono pode funcionar de maneira biológica, considera-se que a sua permanência no solo já faz parte do ciclo biogeoquímico do carbono e não impacta na natureza, além de ser benéfico para a redução de seu excesso e de seus malefícios ao ambiente.

Diante isso, vê-se a emergência em encontrar novas estratégias para reduzir o impacto do aquecimento global a partir da redução da emissão de gases, podendo

esta acontecer a partir de metodologias que contribuam para o sequestro de carbono e assim atingir às metas das agendas ambientais e acordos firmados entre os países junto à ONU.

### **3.4 A mudança climática no Brasil**

Na atual condição mundial, vê-se que as mudanças climáticas são capazes de afetar o ambiente em diversos espectros e nos diversos níveis, impactando ambientalmente, economicamente, socialmente e também culturalmente. Com os avanços da ciência, vê-se que existe dificuldade de prever os problemas que a mudança climática pode causar no mundo, deixando as populações em situação de vulnerabilidade por essa condição (COUTINHO *et al.*, 2021).

Em virtude disto, em 2016 o Governo Federal lançou o Plano Nacional de Adaptação à Mudança de Clima (PNA), de forma a apresentar diretrizes para adaptação à mudança climática, melhorando o desenvolvimento urbano e também adicionando as questões ambientais neste desenvolvimento, conseguindo assim prevenir e criar planos de mitigação para situações que envolvam desastres naturais em decorrência deste evento. Sabe-se que o Brasil é rico em fauna, flora, recursos hídricos e diferentes biomas; e quaisquer mudanças de clima poderiam afetar o andamento destas características, gerando riscos para as formas de vida (COUTINHO *et al.*, 2021).

Junto ao PNA, o Governo Federal optou pela criação de índices que pudessem mensurar e mapear as regiões mais prejudicadas em decorrência das mudanças climáticas, sendo os principais índices o de deslizamento de terras e de enxurradas e o de vulnerabilidade a secas, pois são essas as principais consequências decorrentes das mudanças climáticas. A intenção de estimar os casos de acordo com estes índices é de prever possíveis problemas, tendo dados estimados pelo menos até o ano de 2040 (CAMARINHA, 2019).

As principais regiões do país que são acometidas por estes problemas, são as cidades de Salvador-BA, Blumenau-SC, Recife-PE, Anápolis-GO, Santa Inês-BA e as regiões do Leste do Alagoas (AL), Litoral Sul do Rio de Janeiro, Litoral Norte de São Paulo, Vale do Paraíba-SP, Baixada Maranhense-MA, Nordeste de Alagoas-AL e o Sudoeste do Pernambuco-PE (DEBORTOLI *et al.*, 2017).

O Brasil atualmente estabeleceu alguns objetivos para atingir às metas propostas nas agendas ambientais que foram citadas anteriormente neste estudo, de acordo com o próprio Governo Federal (2022), sendo esses objetivos:

- Até 2028, zerar o desmatamento ilegal, aumentando gradativamente a cada ano até atingir os 0%;
- Incentivar o reflorestamento para que 18 milhões de hectares sejam replantados até 2030;
- Até 2030, conseguir incluir pelo menos 45% de energia renovável na matriz energética atual;
- Recuperar pastagens (pelo menos 30 milhões de hectares);
- Aumentar a malha ferroviária para diminuir o uso de caminhões para trajetos logísticos e automóveis para passeios.

No entanto, como visto anteriormente, é necessário que o solo seja de qualidade para que o uso de microrganismos seja uma alternativa para sequestro de carbono e assim tentar reduzir o excesso do elemento da atmosfera. As atividades antropogênicas, ou seja, causadas pelo homem, também envolvem a modificação do solo original de diversos ecossistemas, de forma a comprometer a sua função dentro de ciclos biogeoquímicos. Logo, ao causar a destruição do solo, é produzido ainda mais carbono para a atmosfera originado da ação dos seres humanos, sendo mais um problema que o uso de microrganismos pode vir a mitigar (KURTZ, 2022).

Diante o apresentado, foi possível compreender a importância do carbono na natureza, mas diante o desenvolvimento urbano e as ações antropológicas, tal elemento acaba se tornando exacerbado na atmosfera, trazendo consequências desvantajosas para as formas de vida e para o planeta. Foi possível observar que existem agendas e movimentações em prol da diminuição do carbono na atmosfera, mas estas ainda se encontram abaixo do esperado e demandam ainda mais incentivos para obter êxito na diminuição de carbono no ambiente. Por isso, pensar em novas tecnologias para retirada de carbono da atmosfera pode ser vantajoso, podendo utilizar os microrganismos para essa função em decorrência de seus metabolismos.

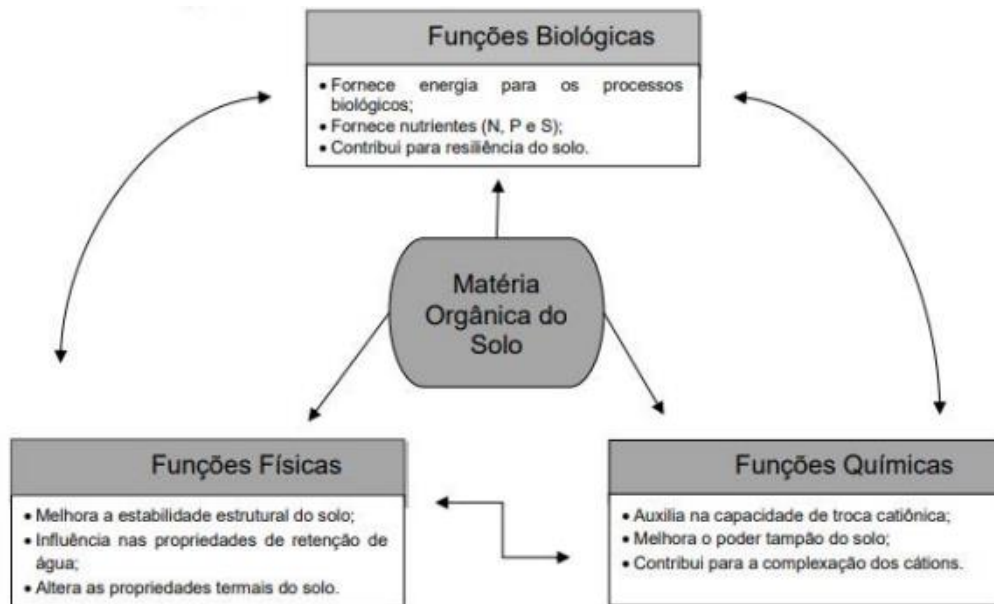
Sendo assim, o capítulo a seguir irá delinear como este estudo busca apresentar tais estratégias a partir do uso de microrganismos como agentes naturais para o sequestro de carbono.

### 3.5 A matéria orgânica no solo

O carbono constitui cerca de 60% do solo no que tange a matéria orgânica, sendo correspondente ao ciclo natural, como plantas e animais e decomposições, atividade microbiológica e a fixação por parte dos vegetais. O sequestro de carbono acontece de acordo com a quantidade de matéria orgânica que está presente no solo. Ou seja, o ciclo compreende a decomposição de matéria, e essa matéria devolve os nutrientes para o solo, para as plantas e para o ar (BOLSON, 2023).

A matéria orgânica terá a função, portanto, de influenciar nos ciclos biogeoquímicos, de conferir nutrientes para as plantas e para o solo, irá também conferir a troca de cátions (sem interferir no volume do solo) e diretamente irá contribuir para que o solo seja saudável e estabelecer controle sobre os gases que são emitidos na atmosfera. Considerando o estudo de Bolson (2023), a **Figura 4** demonstra como o carbono terá funções no solo, tendo em vista a matéria orgânica que está presente no ambiente.

Figura 4 - Funções da matéria orgânica do solo.



Fonte: Bolson (2023).

Para esclarecer a qualidade do solo e a sua composição, é possível utilizar indicadores biológicos, como a presença de microrganismos que contribuem para o funcionamento dos ciclos biogeoquímicos, como do nitrogênio e do carbono. Por essa

razão, pensar em microrganismos como estratégia para sequestro de carbono pode ser uma possibilidade viável de reduzir este elemento da atmosfera.

### 3.6 Microrganismos como estratégia

Existem pesquisas atuais que compreendem como os microrganismos podem ser vantajosos como forma de manter a qualidade do solo e as funções normais dos ciclos biogeoquímicos. O estudo de Sobucki e colaboradores (2019), explica que existem bactérias e fungos que são considerados habitantes no solo, e por isso há discussões sobre utiliza-los como forma de avaliar a qualidade do solo. A principal vantagem e função dos microrganismos neste aspecto, é auxiliar na ciclagem de nutrientes, já que absorver e devolver estes componentes ao solo é atividade comum de seu metabolismo.

No estudo de Sobucki e colaboradores: (2019):

Historicamente, compreendia-se o solo como um ambiente inerte; substrato para manter as plantas, todavia, evidenciou-se que o ambiente solo é bastante heterogêneo e dinâmico, sendo composto por minerais (45%), espaço poroso preenchido por gases e água (50%) e matéria orgânica (5%). Em relação a matéria orgânica, uma pequena fração é biomassa vida (4%), sendo representada por microrganismos (70%) e pela macrofauna (22%). Contudo, estima-se a ocorrência de 10 a 50 mil espécies por grama de solo (SOBUCKI *et al.*, 2019, p. 2).

A partir da citação de Sobucki e colaboradores (2019), vê-se que as pesquisas acerca de microrganismos compreendem desde antes de ser observada suas atividades no solo, já que foi visto primeiramente que estes existiam no local. E junto a isso, foi percebido que sua presença é bastante significativa, compreendendo boa parte de matéria orgânica. Assim, a matéria orgânica vai além do que é decomposto, mas compreende também seus decompositores, sendo este o motivo por ser um bom índice de avaliação: a presença de microrganismos, significando assim o bom funcionamento de absorção e devolução de nutrientes, estabelecendo um ambiente de qualidade e saudável.

A qualidade do solo possui muitos significados, podendo ser importante para a questão ambiental, mas também importante pela questão econômica e sanitária. Os microrganismos que são comuns àquele ambiente, demonstram a limpeza que existe



no solo, o que significa que ele se encontra limpo por exemplo, de agentes oriundos da falta de saneamento, como excrementos. No que tange a economia, a agropecuária depende de um bom solo para as plantações, garantindo que vegetais e legumes cresçam saudáveis para consumo. Os microrganismos colaboram para a decomposição de minerais, também muito importantes para a respiração do solo e de seus componentes (OLANDINI *et al.*, 2021).

Com isso, vê-se que além da importância dos microrganismos ser discutida neste estudo, pode-se estabelecer que a presença destes seres vivos deve ser considerada, pois a existência dos microrganismos auxilia na retirada do carbono da atmosfera e o introduz em atividades importantes para a melhoria do ambiente no que tange ar e solo.

Diante do apresentado, foi possível compreender a importância do carbono na natureza, mas diante o desenvolvimento urbano e as ações antropológicas, tal elemento acaba se tornando exacerbado na atmosfera, trazendo consequências desvantajosas para as formas de vida e para o planeta. Foi possível observar que existem agendas e movimentações em prol da diminuição do carbono na atmosfera, mas estas ainda se encontram abaixo do esperado e demandam ainda mais incentivos para obter êxito na diminuição de carbono no ambiente. Por isso, pensar em novas tecnologias para retirada de carbono da atmosfera pode ser vantajoso, podendo utilizar os microrganismos para essa função em decorrência de seus metabolismos.

Sendo assim, o capítulo a seguir irá delinear como este estudo busca apresentar tais estratégias a partir do uso de microrganismos como agentes naturais para o sequestro de carbono.

#### 4. METODOLOGIA

Essa pesquisa, portanto, estruturou-se em função de sua abordagem de forma qualitativa, e em função dos seus objetivos apresenta-se de forma explicativa, apresentando o cenário a partir da observação de fenômenos e seus resultados. Quanto aos procedimentos a pesquisa se desenvolveu na perspectiva bibliográfica, buscando encontrar autores e estudos que discutam sobre a temática proposta e assim expor as principais informações obtidas.

Ambos os critérios selecionados, visam analisar a situação atual do uso de microrganismos como sequestradores de carbono e o sucesso ou insucesso que foi obtido a partir disso.

Para tanto, foram considerados como materiais de pesquisa, livros, artigos, monografias, revistas da área, agendas ambientais e também informações da ONU e do Governo Federal; garantindo assim a qualidade dos dados e a veracidade das informações encontradas.

Como bases de dados, foram estabelecidas a *Scientific Eletronic Library Online* (SciELO), a PubMed, o *Google Scholar*, os sites da ONU, os sites do Governo Federal e também repositórios acadêmicos nacionais.

Foram escolhidos 10 (dez) estudos compreendidos dentro de uma série histórica dos últimos 10 anos, estabelecendo como critério de inclusão, portanto, estudos publicados desde 2013, a leitura de resumos e também pesquisas nas línguas portuguesa e inglesa.

Como métodos de exclusão, foram desconsideradas as pesquisas anteriores a 2012, as pesquisas que não utilizam microrganismos como meio de redução de CO<sub>2</sub> e também aqueles que não se enquadrem à temática proposta. A pesquisa foi realizada entre agosto de 2023 a outubro de 2023, sendo os artigos escolhidos interpretados através de seus resumos.

Para garantir que tais critérios fossem satisfeitos, foram definidos como descritores de busca, em português, as palavras “Microrganismos e CO<sub>2</sub>”, “Sequestro de Carbono”, “Bactérias e Sequestro de Carbono” e “Fungos e Sequestro de Carbono”. Após a busca e a escolha dos estudos, foi estruturado um quadro com as informações relevantes, visando expor o autor, o ano da pesquisa, seu título, a metodologia e os resultados (Quadro 1).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo, é exposto o Quadro 1 que ilustra os resultados encontrados.

Quadro 1 - Síntese dos autores encontrados.

<b>Autor (ano)</b>	<b>Título</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Resultados</b>
Araujo <i>et al.</i> (2015)	Potencial de sequestro do carbono em solo pela incorporação de carvão das cascas de frutos da castanha-do-brasil.	Utilizou-se um ensaio de respirometria para estimar o potencial de sequestro de carbono no solo pela incorporação de carvão das cascas de frutos da castanha-do-brasil.	Os resultados mostraram que os carvões ativados adicionados possuem estabilidade, pois o percentual de perda de C no solo foi inferior a 10% em um prazo de 10 anos.
Reis <i>et al.</i> (2017)	Bioprecipitação de carbonato de cálcio por bactérias ureolíticas e suas aplicações	Uma revisão acerca dos principais mecanismos celulares envolvidos na precipitação do carbonato de cálcio por bactérias ureolíticas, bem como o detalhamento dos tipos de cristais produzidos e fontes de isolamento desses organismos.	Diversos microrganismos capazes de produzir a urease podem ser utilizados para a precipitação de carbonato de cálcio. Vários pesquisadores têm buscado desenvolver métodos para remoção de contaminantes na natureza.
Monteiro (2018)	Sequestro de carbono e supressão de plantas invasoras por cobertura vegetal	As espécies de plantas de cobertura usadas nos tratamentos foram: <i>Brachiaria decumbens</i> ; <i>Brachiaria ruziziensis</i> ; Feijão-de-porco; Calopogônio e Milheto. Além das plantas de coberturas, outros tratamentos foram as plantas invasoras como cobertura natural e tratamento sem vegetação.	As plantas de cobertura sequestraram carbono e com qualidade superior da matéria orgânica, quando comparadas sem a cobertura vegetal. Estas plantas foram eficientes em manter e elevar os estoques de matéria orgânica do solo.
Sobucki <i>et al.</i> (2019)	Manejo e qualidade biológica do solo: uma análise	Revisão bibliográfica.	Em suma, os principais protagonistas da

			obra são os diversos organismos que habitam o ambiente solo e nele exercem diversas funções que contribuem para a construção e manutenção da qualidade do solo.
Olandini <i>et al.</i> (2021)	Atividade microbiana e carbono orgânico no solo em agroecossistemas sob diferentes manejos no semiárido paraibano	Foram avaliados os sistemas de Caatinga sob pastejo (CP), monocultivo de palma forrageira (SM) e silviagrícola (SA) em AF nos municípios de Queimadas e Boqueirão, semiárido paraibano.	s sistemas com cultivo de palma forrageira (SM e SA) foram responsáveis pelas maiores concentrações de glomalina, resultando em condições mais favoráveis à adsorção de nutrientes e agregação dos solos.
Jesus <i>et al.</i> (2021)	A biotecnologia como instrumento de sequestro de carbono: bactérias, microalgas e árvores geneticamente modificadas	Uma revisão da utilização de <i>Escherichia coli</i> , Microalgas e Árvores Geneticamente Modificadas, como biosequestradores potenciais de carbono atmosférico.	Entre as alternativas disponíveis, o biosequestro de carbono ganhou espaço nos últimos anos, seu objetivo é utilizar organismos vivos para aprisionar o carbono atmosférico de forma a minimizar os impactos do aumento da temperatura do planeta.
Gomes <i>et al.</i> (2021)	Cinética de liberação de CO <sup>2</sup> e decomposição da fitomassa em sistemas de uso e manejo do solo	A atividade microbiana foi estimada pela quantificação do dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) desprendido no processo de respiração edáfica, a partir da superfície do solo, e capturado por solução de KOH.	O sistema que emitiu maior quantidade de CO <sub>2</sub> para a atmosfera foi a horta mandala. Os fatores climáticos, como precipitação e temperatura, influenciam na dinâmica de decomposição e na emissão de CO <sub>2</sub> liberado pelos microrganismos edáficos.
Rocha <i>et al.</i> (2022)	Utilização de bactérias diazotróficas associativas em áreas de pastagens: Alternativa para mitigação dos gases do efeito estufa	Foi realizada uma revisão sistemática.	O uso desses microrganismos traz benefícios ambientais, pois promove melhores condições para a pastagem, reduzindo a degradação e as

			emissões de GEE. Além disso, apresenta resultados satisfatórios quanto à produtividade de forragem, beneficiando economicamente o sistema e auxiliando na diminuição dos impactos gerados pela produção animal.
Silva <i>et al.</i> (2023)	Distribuição da Biomassa vegetal e sequestro de carbono na sub-bacia do Rio Pirajibu no município de Sorocaba/SP	Foram obtidas 100 amostras de treinamento. A classificação supervisionada foi realizada pelo método Random Forest, com 10 árvores de decisão e 5.000 de variáveis que foram selecionadas e treinadas.	A distribuição da biomassa para as classes muito alta, alta e média pode ser ainda maior considerando outros reservatórios de carbono, como os reservatórios abaixo do solo.
Bolson (2023)	Avaliação da concentração de carbono orgânico em função do uso do solo no bioma pampa.	Foram aferidas as alterações do teor de carbono em uma área de estudo, com coberturas vegetais distintas e em três faixas de profundidade	Os resultados evidenciam que a recuperação dos solos degradados promove o aumento da concentração de carbono no solo. Todos os pontos de coleta apresentam maior teor de carbono nas suas camadas mais superficiais e decrescem conforme a profundidade aumenta. O uso do solo se mostrou como o fator de maior interferência do carbono orgânico no solo estudado.

Fonte: Autoria própria (2023).

Araujo e colaboradores (2015) indicam como metodologia que pode ser empregada para o sequestro de carbono, o uso de carvão natural no solo. Os autores explicam que ao adicionar carvão – de fontes naturais, como castanhas – no solo, é possível observar um desprendimento de carbono do material, estimulando a produção de matéria orgânica, o aumento da população microbológica e ainda o aumento da ciclagem de nutrientes; fazendo com que o solo venha se tornar mais

forte e com atividades de qualidade, onde a obtenção de carbono é feita de forma natural na atmosfera, promovendo assim o sequestro.

Cita-se ainda como metodologia que pode promover o sequestro de carbono, de acordo com Reis e colaboradores (2017), a realização de bioprecipitação por bactérias ureolíticas<sup>2</sup>, onde bactérias que vivem no solo e utilizam a ureia para produzir minerais inorgânicos, podem aproveitar a biodisponibilidade do excesso de carbono no ar e sequestra-lo para utilizar em seu metabolismo.

Os autores citados acima indicam como bactérias candidatas para este processo a *Sporosarcina pasteurii*, *Aerobacter aerogenes*, diversas bactérias do gênero *Bacillus sp.* (*megaterium*, *flexus*, *firmus* e afins), *Pseudomonas azotoformans* e *Arthrobacter crystallopoietes*. É esclarecido que o uso destes e demais microrganismos podem ser uma alternativa com menor custo, natural, que não compromete o solo e que ainda se mostra efetiva para os impactos antropogênicos que têm ocorrido ao longo dos anos.

Nos estudos analisados, vê-se que existe uma grande preocupação em relação à qualidade do solo. Monteiro (2018) demonstra o porquê de tal preocupação, haja vista que nos últimos anos, estudos sobre o impacto humano sobre o solo e sua relevância para a vida na terra, demonstram que um solo deficiente de nutrientes é prejudicado quanto à qualidade física, química e biológica podendo contribuir para a perda dos recursos naturais, para o aumento da emissão de gases (já que não haverá plantas ou outros organismos que sejam capazes de fixar estes gases em seus ciclos) e ainda para a queda de matéria orgânica e conseqüentemente a deficiência da população microbiológica e também do sequestro de carbono.

Logo, é possível afirmar a importância do solo quanto abrigo para micro populações e também como reservatório de estoque de carbono. Sobucki e colaboradores (2019) afirmam que para mitigar as emissões de carbono, é necessário que o solo esteja incluído na agenda ambiente dos responsáveis por este processo, já que são fundamentais como reservatórios de carbono e ainda atuam como ecossistema para organismos que podem contribuir para este fim.

Para tal, Sobucki e colaboradores (2019) estabelecem que a quantidade de carbono emitida não seja superior à quantidade de carbono que pode ser estocada,

---

<sup>2</sup> Bactérias responsáveis por produzir carbonato de cálcio a partir da conversão de ureia.

esclarecendo que há uma grande influência da atividade humana sobre este equilíbrio e aconselha que se providenciem medidas eficientes que consigam sanar o problema.

Apoiando a estimulação do crescimento de plantas forrageiras, Olandini e colaboradores (2021) observaram em seus estudos que locais com este tipo de vegetação tendem a estocar uma quantidade maior de carbono, no entanto acabam protegendo o carbono e impedindo que microrganismos e suas enzimas promovam a mineralização do elemento, garantindo que este fique incorporado no solo e também em ciclos biogeoquímicos.

Considerando exemplos de microrganismos que são adequados para a realização do sequestro de carbono, Jesus e colaboradores (2021) falam sobre esta opção para o solo:

- ✓ *Escherischia coli*: espécie comum de bactérias que promovem o chamado biossequestro, é possível realizar alterações a nível genético nestes microrganismos. Por ser facilmente conhecida na área da pesquisa, é possível introduzir enzimas que auxiliem na facilitação do sequestro de carbono, incentivando que a bactéria transforme o CO<sub>2</sub> sequestrado em carbonato de cálcio, o que facilita o seu aprisionamento no solo.

De acordo com Gomes e colaboradores (2021), o solo é considerado um componente vivo, tendo em vista que produz todos os nutrientes e promove o próprio equilíbrio através de suas próprias atividades. Por essa razão, os autores explicitam que quando há interferência nas funções comuns do solo, acaba-se alterando questões como matéria orgânica acumulada e ação de ciclagem de nutrientes, haja vista que os nutrientes são oriundos em grande parte dos ciclos biogeoquímicos e boa parte dos ciclos ocorrem na terra.

Tem-se ainda que a matéria orgânica tem como importante componente, os microrganismos que vivem na terra, que são fundamentais para fixação de nutrientes e colaboração em ciclos.

Além dos exemplos já citados, Rocha e colaboradores (2022) também citam bactérias diazotróficas<sup>3</sup>, como a *Azospirillum brasilense*, que é capaz de estimular o crescimento de vegetação forrageira, aumentando a matéria orgânica no solo e assim dispensando o uso de fertilizantes sintéticos.

---

<sup>3</sup> Organismos que possuem funções nos ciclos biogeoquímicos, promovendo o desenvolvimento das plantas e também a ciclagem de nutrientes.

Além disso, por promover o aumento de plantas, o microrganismo acaba também promovendo o sequestro de carbono de forma indireta, já que a vegetação ao realizar fotossíntese irá retirar o carbono da atmosfera para obtenção de energia. Os autores encorajam o uso de outras bactérias do tipo diazotrófica, tendo em vista que pode ser uma técnica eficaz com menor para retirada de carbono do ar e aprisionamento no solo ou então incorporação em processos fotossintetizantes.

Tal aspecto sugere que as duas técnicas não possam ser utilizadas em conjunto. Os autores citados acima ainda observaram que fungos também podem ter um papel importante, onde os do tipo micorrizicos<sup>4</sup> produzem uma glicoproteína chama de glomalina que é responsável por promover a estabilidade do solo e garantir vantagens para este ambiente como melhoria na aeração e drenagem, aumento da atividade microbiológica, degradação de matéria orgânica, sequestro de carbono, aumento da absorção de nutrientes pelo solo, dispersão de contaminantes e ainda proteger contra ações de erosão e consequências de emissão de gases que podem comprometer a fertilidade do solo.

Silva e colaboradores (2023) aconselham, portanto, que o solo onde se planeja realizar um cultivo ou então utilizar como meio de sequestro de carbono, seja devidamente estudado, de forma a conhecer características como clima ideal, pH, formas de vida microbianas existentes, tipo de vegetação, o limite de carbono que o ambiente se permite estocar e outros dados que podem se mostrar pertinentes quando houver o interesse.

Bolson (2023) explica que ao utilizar plantas ou microrganismos para promover o sequestro de carbono, este recebe o nome de sequestro biótico, enquanto o que não utiliza nenhum tipo de forma de vida é chamado de sequestro abiótico. O autor incentiva que diferentes formas sejam combinadas para garantir uma maior efetividade, de forma a não supersaturar o limite de carbono que determinado solo pode estocar, não comprometendo as atividades da vegetação, dos microrganismos, dos ciclos biogeoquímicos e demais organismos e processos que alteram nesse sistema.

Vê-se a partir dos autores citados que, existem muitas formas de microrganismos que podem ser implementados como alternativa inovadora para realizar o sequestro e o estoque de carbono no solo. Ao citar o solo, é possível ainda

---

<sup>4</sup> Fungos que realizam associações com raízes de plantas vasculares.



perceber fortemente a sua influência na atividade destes microrganismos, tornando a associação entre este ambiente e estas formas de vida, substanciais para garantir que o carbono seja retirado do ar.

Entretanto, o microrganismo em si não precisa ser ativo no processo de retirada do carbono da atmosfera, já que pode influenciar no crescimento de vegetações que contribuem para o sequestro. Conhecer sobre a biomassa também é um parâmetro relevante, haja vista que a matéria orgânica já se mostrou um componente fundamental – sendo os microrganismos inclusive parte dela – para realização do sequestro de carbono.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com o que foi visto neste estudo, foi possível compreender como os microrganismos podem ser úteis para realizar o sequestro e o estoque de carbono, tendo em vista que existem variadas metodologias que visam tanto incorporar o carbono sequestrado em outros processos naturais realizados pelos organismos localizados no solo, como também estocar o carbono no solo como meio de utilizar o ambiente como uma espécie de reservatório natural. Os gêneros mais observados para realizar o biossequestro são *Escherischia sp.*, *Azosoirillum sp.*, *Artrhobacter sp.*, *Aerobacter sp.*, *Bacillus sp.*, *Sporosarcina sp.* e alguns fungos micorrizicos.

Tal estratégia consegue diminuir o carbono do ambiente, podendo ser incorporado às agendas ambientais e assim contribuir para a redução de carbono da atmosfera e diminuir os efeitos de gases que favorecem o efeito estufa. No entanto, fica claro que somente trabalhar para reduzir o carbono não é recomendado, tendo em vista que existe um limite para o que o solo possa estocar. Por isso, é fundamental que junto com a estratégia que utiliza os microrganismos como sequestradores de carbono, exista também medidas que busquem reduzir a emissão direto das fontes geradoras.

Quanto aos tipos de microrganismos utilizados, fica evidente que os microrganismos mais utilizados são as bactérias, fungos e as algas podendo estas serem incorporadas sem prejuízos ao solo ou então podendo ser modificadas geneticamente para aumentar a eficiência da retirada de carbono que este organismo pode processar. Pode-se comprovar que tal alternativa se mostra de baixo custo, pouco complexa e vantajosa para a qualidade do solo, contribuindo para o aumento da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e ainda para a sobrevivência da vegetação.

De acordo com os autores pesquisados, as metodologias utilizadas por eles são o uso de carvão natural para estimulação da matéria orgânica, a bioprecipitação para produção de minerais a partir da ureia, a adição de microrganismos como microalgas e bactérias no solo e ainda a estimulação de plantas forrageiras através de microrganismos para aumentar matéria orgânica e consequentemente o sequestro de carbono.

Outra questão que ficou evidente no encerramento deste estudo, é a importância do solo para contribuir para o sequestro de carbono, é a qualidade do solo

do local de onde se pretende realizar o sequestro. Viu-se que por se tratar de um pequeno ecossistema para diversas formas de vida, os microrganismos agem junto às plantas para garantir maior quantidade de nutrientes ao espaço, fazendo com que plantas cresçam, microrganismos realizem seu metabolismo e o solo seja capaz de fornecer abrigo a partir de suas propriedades. Ficou comprovado pelos estudos consultados, que um solo com uma quantidade maior de matéria orgânica, é capaz de armazenar mais carbono, portanto, impedindo assim a saturação do ambiente e reduzindo gases que podem ser prejudiciais à saúde.

Como sugestão para estudos futuros, podem ser realizados experimentos em laboratório com diferentes tipos de solo em diferentes condições, empregando algumas das cepas bacterianas citadas no estudo, como forma de comprovar a efetividade do método e ainda poder observar quais seriam as mais eficientes para realização do sequestro de carbono.

## REFERÊNCIAS

ALENCAR, V.; SILVA, A. N.; PEREIRA, R. S.; ALENCAR, V. M.; CASTRILLO, L. S.; TRAVASSOS, A.; SILVA, S. P. Desenvolvimento de sistema fotobiorreator de microalgas para sequestro de CO<sub>2</sub>. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 1, 2016.

ARAUJO, D. M. F.; ANJOS, C. S. S.; PAIVA, P. M. V. Potencial de sequestro do carbono em solo pela incorporação de carvão das cascas de frutos da castanha-do-brasil. *In: 54º Congresso Brasileiro de Química*, Natal-RN, 2014.

BARBOSA, R. R. N.; SILVA, A. A.; NEVES, M. G.; GALVÃO, A. R. A.; OLIVEIRA-NETO, C. F. Produção e sequestro de carbono na atmosfera. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, p. 1783-1798, 2013.

BARRETO, L. V.; FREITAS, A. C. S.; PAIVA, L. C. Sequestro de carbono. **Enciclopédia Biosfera**, n. 7, p. 1-10, 2009.

BHAMBURE, A. B.; MAHAJAN, G. R.; KERKAR, S. *Salt tolerant bacterial inoculants as promoters of rice growth and microbial activity in coastal saline soil. Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 88, p. 1531-1538, 2018.

BOLSON, A. A. **Avaliação da concentração de carbono orgânico em função do uso do solo no bioma pampa**. 2023. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso [Bacharelado em Engenharia Sanitarista e Ambiental] - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

CAMARINHA, P. **Status e Limites do Conhecimento em Mudança do Clima no Nível Municipal**. Índice de Vulnerabilidade dos Municípios Brasileiros. CEMADEN (PPT), 2019.

COUTINHO, S. M. V.; MAGLIO, I. C.; CARBONE, A. S.; NEDER, E. A. Adaptação às mudanças climáticas no Brasil: complexidade, incertezas e estratégias existentes. **Revista Coexistências e Cocriações**, v. 8, n. 20, p. 1-22, 2021.

DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES, R. R. *An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural hazards***, v. 86, p. 557-582, 2017.

GOMES, D. S.; BARBOSA, A. S.; SANTOS, T. M.; SANTOS, S. K.; SILVA, J. H. C. S.; AQUINO, I. S. Cinética de liberação de CO<sub>2</sub> e decomposição da fitomassa em sistemas de uso e manejo do solo. ***Research, Society and Development***, v. 10, n. 1, e9810111413, 2021.

GOVERNO FEDERAL. **Em nova meta, Brasil irá reduzir emissões de carbono em 50% até 2030.** Site oficial Governo Federal, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2021/10/em-nova-meta-brasil-ira-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030>>. Acesso em 27 set. 2023.

HELLEQUIN, E.; BINET F.; KLARZYNSKI, O.; HALLIN, S.; JUHANSON, J.; DABURON, V. *Shaping of soil microbial communities by plants does not translate into specific legacy effects on organic carbon mineralization. **Soil Biology and Biochemistry***, v. 163, 2021.

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

JOHN, V. M.; SILVA, V. G.; AGOPYAN, V. Agenda 21: uma proposta de discussão para o construbusiness brasileiro. *In: **Encontro Nacional e I Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis***, Canela, 2001.

KURTZ, P. **Manejo adequado do solo aumenta sequestro de carbono em áreas irrigadas.** Site oficial EMBRAPA, 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/72379135/manejo-adequado->

do-solo-aumenta-sequestro-de-carbono-em-areas-irrigadas>. Acesso em 02 nov. 2023.

MCGONIGLE, T. P.; TURNER, W. G. *Grasslands and croplands have different microbial biomass carbon levels per unit of soil organic carbon*. **Agriculture**, v. 7, n. 7, p. 57, 2017.

MONTEIRO, G. F. P. **Sequestro de carbono e supressão de plantas invasoras por cobertura vegetal**. 2018. 78 f. Tese [Doutorado em Agronomia Tropical] – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

MURTA, A. L. S.; FREITAS, M. A. V.; MURTA, M. P. A. Redução de emissões de CO<sub>2</sub> por uso de biodiesel na frota de ônibus urbana do Rio de Janeiro. **Revista Valore**, v. 8, p. 42-56, 2023.

OLANDINI, É.; NASCIMENTO, M. M. B.; MACEDO, R. S.; SOUZA, R. F. S.; SOUZA, S. L.; SOUSA, C. S.; LAMBAIS, G. R.; BAKKER, A. P. Atividade microbiana e carbono orgânico do solo em agroecossistemas sob diferentes manejos no semiárido paraibano. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.412-427, 2021.

ONU - Organização das Nações Unidas. **COP27: o que você precisa saber sobre a Conferência do Clima da ONU**. Site oficial ONU, 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/205789-cop27-o-que-você-precisa-saber-sobre-conferência-do-clima-da-onu>>. Acesso em 27 set. 2023.

REIS, D. A. Estoques de carbono e biomassa microbiana de um latossolo cultivado com soja sub inoculação fúngica. **Revista Agri-Environmental Sciences**, v. 9, p. 1-13, 2023.

REIS, L. G. V.; RODRIGUES, A. A.; SOARES, R. S.; ARAÚJO, R. C.; VIEIRA, J. D. G. Bioprecipitação de carbonato de cálcio por bactérias ureolíticas e suas aplicações. **Enciclopédia Biosfera**, v. 14, n. 26, p. 860-881, 2017.

ROCHA, E. C.; TERRA, A. B. C.; OLIVEIRA, T. E.; ARAÚJO, B. A.; SILVA, N. C. D.; REZENDE, A. V.; FLORENTINO, L. A. Utilização de bactérias diazotróficas associativas em áreas de pastagens: Alternativa para mitigação dos gases do efeito estufa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, e20911527939, 2022.

SAVAGE, S. **Quatro modelos de criação de valor agropecuário na era do carbono.** Site oficial Forbes Agro, 2023. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesagro/2023/08/quatro-modelos-de-criacao-de-valor-agropecuario-na-era-do-carbono/>>. Acesso em 04 set. 2023.

SHAO, M.; ZHANG, S.; PEI, Y.; SONG, S.; LEI, T.; YUN, H. *Soil texture and microorganisms dominantly determine the subsoil carbonate content in the permafrost-affected area of the Tibetan Plateau.* **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1125832, 2023.

SILVA, J. G. M.; QUINTANILHA, J. A.; GROHMANN, C. H.; COSTA, D. R.; SILVA, J. M. S.; COSTA, J. D. M. Distribuição da Biomassa vegetal e sequestro de carbono na sub-bacia do Rio Pirajibu no município de Sorocaba/SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1647-1656, 2023.

SILVA, M. A. C. **Qual é o papel dos micro-organismos do solo no sequestro de carbono?** Site oficial *Biome4all Agriculture*, 2023. Disponível em: <<https://biome4all.com.br/os-micro-organismos-do-solo-no-sequestro-de-carbono/>>. Acesso em 02 nov. 2023.

SOBUCKI, L.; RAMOS, R. F.; BELLÉ, C.; ANTONIOLLI, Z. U. Manejo e qualidade biológica do solo: uma análise. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 3, p. 1-4, 2019.

SOTO-PINTO, L.; JIMÉNEZ-FERRER, G. *Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales.* **Madera y Bosques**, v. 24, p. 1-15, 2018.

SOUSA, J. E. S. **Pedogênese e sequestro de carbono em planossolos ao longo de um gradiente pluviométrico na Província Borborema, Brasil.** 2019. 135 f. Tese

[Doutorado em Ciência do Solo] – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.

SOUZA, M. F. L.; LONGHINI, C. M.; SILVA, A. M.; LENTINI, C. A. D. Ciclo do carbono: processos biogeoquímicos, físicos e interações entre compartimentos na Baía de Todos os Santos. **Revista Virtual de Química**, v. 4, n. 5, p. 566-582, 2012.

UDOP – União Nacional da Bioenergia. **Concentração de carbono na atmosfera está 50% maior do que a pré-industrial**. Site oficial UDOP, 2022. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2022/06/07/concentracao-de-carbono-na-atmosfera-esta-50-maior-do-que-a-pre-industrial.html#:~:text=De%20acordo%20com%20a%20estimativa,ou%20acima%20de%20400%20pp.>>. Acesso em 04 set. 2023.

UNEP - *United Nations Environment Programme*. **Concentração global de CO<sub>2</sub> bate recorde mesmo durante crise do COVID-19**. Site oficial UNEP, 2020. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/concentracao-global-de-co2-bate-recorde-mesmo-durante-crise-do>>. Acesso em 26 set. 2023.

VIEIRA, L. C. S.; SILVA-FILHO, V. P.; DANTAS, V. A.; SATYMURTY, P.; SANTOS, A. S. Sazonalidade do sequestro e estoque de carbono na caatinga, durante as estações seca e chuvosa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 539-564, 2022.