

# ESTOQUE DE CARBONO NOS ECOSSISTEMAS



Iran Carlos Stalliviere Corrêa  
CECO/DGEOD/IGEO/UFRGS

**Imagem da capa:** Todo organismo vivo na face da terra é feito de carbono. É a maior parte da energia que nos move.  
(fonte: [https://services.meteored.com/img/article/del-carbono-venimos-y-hacia-el-carbono-vamos-1694411750862\\_1280.jpg](https://services.meteored.com/img/article/del-carbono-venimos-y-hacia-el-carbono-vamos-1694411750862_1280.jpg))

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**CENTRO DE ESTUDOS DE GEOLOGIA COSTEIRA E OCEÂNICA**

**DEPARTAMENTO DE GEODÉSIA**



(fonte: <https://matanativa.com.br/wp-content/uploads/2021/12/20220120-Mapas-de-estoque-de-carbono-organico-do-solo.jpg>)

***ESTOQUE DE CARBONO NOS  
ECOSSISTEMAS***

**Iran Carlos Stalliviere Corrêa**

**2025**

Prof. Iran Carlos Stalliviere Corrêa  
Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica  
Departamento de Geodésia  
Instituto de Geociências  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

C824e Corrêa, Iran Carlos Stalliviere  
Estoque de carbono nos ecossistemas. /  
Iran Carlos Stalliviere Corrêa - Porto Alegre:  
CECO/DPGEO/IGEO/UFRGS, 2025.  
[103 f.] il.

**ISBN: 978-65-01-60875-4**

1. Sequestro de carbono. 2. Bioma. 3. Ecossistema.
4. Mercado de carbono. 5. Manejo. I. Título.

**CDU 504.06**

---

**Catálogo na Publicação**

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113



## **INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

***Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica***

***Departamento de Geodésia***



*Solos de manguezais com os mais altos estoques de carbono.*  
*(fonte: <https://ciclovivo.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Mangue-1024x682.jpg>)*

# ***ESTOQUE DE CARBONO NOS ECOSSISTEMAS***

**2025**

**Iran Carlos Stalliviere Corrêa**



Reitora  
**Márcia Cristina Bernardes Barbosa**

Vice-Reitor  
**Pedro de Almeida Costa**

Diretor do Instituto de Geociências  
**Nelson Luiz Sambaqui Gruber**

Vice-Diretora do Instituto de Geociências  
**Cassiana Roberta Lizzoni Michelin**

*Projeto Livro Didático*

**Projetado e elaborado pelo Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica e  
Departamento de Geodésia do Instituto de Geociências da UFRGS**

**Diretora CECO: María Alejandra Gomez Pivel**  
**Vice-Diretor CECO: Jairo Francisco Savian**

**Chefe do Departamento de Geodésia: Clódis de Oliveira Andrades Filho**  
**Chefe Substituto: Flavia Cristiane Farina**

**2025**

**Segundo a lei nº 9610/98 e o Código Penal no Artigo 184, é vedada a  
reprodução, por qualquer meio, desta apostila didática, sendo somente  
permitida com autorização do professor-autor.  
A cópia não autorizada é punível com sanções administrativas e penais.**

## SUMÁRIO

<b>Apresentação</b>	<b>8</b>
<b>I. INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1. O que é sequestro de carbono?	13
1.2. Como funciona o sequestro de carbono?	14
1.3. Qual a importância do sequestro de carbono?	16
1.4. Quais são os tipos e métodos de sequestro de carbono?	17
1.4.1. Sequestro biológico de carbono	17
1.4.1.1. Sequestro florestal de carbono	17
1.4.1.2. Sequestro de carbono em pastagens	18
1.4.1.3. Sequestro de carbono do solo	19
1.4.1.4. Fertilização dos oceanos	21
1.4.2. Sequestro geológico de carbono	22
1.4.3. Sequestro tecnológico de carbono	24
1.4.4. Benefícios do sequestro de carbono	25
1.4.5. Desafios do sequestro de carbono	26
1.5. O diagnóstico territorial do sequestro de carbono	26
1.6. Contribuição do Brasil no Acordo de Paris	27
1.6.1. Redução do nível de ambição	28
1.6.2. Metas setoriais	29
1.6.3. Objetivo de longo prazo	33
<b>II. URBANISMO</b>	
2.1. Armazenar carbono nos ecossistemas: Desenvolver cidades com natureza	34
2.2. Como integrar as questões do sequestro de carbono nas estratégias urbanas?	36
2.3. Armazenar carbono nos ecossistemas: Quais são as questões que envolvem o plantio de árvores?	39
2.4. Que ferramentas podemos utilizar para melhor integrar o sequestro de carbono nos projetos de desenvolvimento urbano?	43
<b>III – MANEJO FLORESTAL E USO DA MADEIRA</b>	<b>47</b>
3.1. Mitigação e adaptação das florestas às alterações climáticas	47
3.2. Como integrar a melhoria florestal nas estratégias das autoridades locais para combater as alterações climáticas	51
3.2.1. Agir como proprietário da floresta	51
3.2.2. Atuar como prescritor público	52
3.2.3. Construir e liderar uma estratégia territorial	52
<b>IV – AGRICULTURA: O CAMPO DAS POSSIBILIDADES</b>	<b>53</b>
4.1 Agricultura de conservação, agricultura biológica e metanização, quais os efeitos nas reservas de carbono?	53
4.1.1. Agricultura de conservação do solo, armazenamento de C e equilíbrio de GEE	54
4.1.2. Agricultura orgânica, armazenamento de C e equilíbrio de GEE	55
4.1.3. Digestão anaeróbica, armazenamento de C e equilíbrio de GEE	56
4.2. Apresentação do método ABC'Terre e a abordagem participativa para	

serviço territorial	56
4.3. Apresentação da abordagem participativa ABC'Terre	57
4.4. Que ações as comunidades podem tomar para apoiar o sequestro de carbono na agricultura	59
4.4.1. O que está em jogo para as comunidades?	59
4.4.2. Quais os principais obstáculos e alavancas à evolução das práticas agrícolas?	60
4.4.3. Qual poderia ser o papel das autoridades locais? Com que contexto?	61
4.4.4. O que lembrar em poucas palavras?	62
4.4.5. Nova teoria sobre sequestro de carbono pelas árvores	62
<b>V – POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO EM DIFERENTES BIOMAS BRASILEIROS</b>	<b>64</b>
5.1. Bioma Amazônia	64
5.2. Bioma Cerrado	66
5.3. Bioma Mata Atlântica	67
5.4. Bioma Caatinga	68
5.5. Bioma Pantanal	70
5.6. Bioma Pampa	71
<b>VI – SEQUESTRO DE CARBONO PELOS OCEANOS</b>	<b>73</b>
6.1. Sequestro de carbono artificial no ecossistema oceânico	75
<b>VII – SEQUESTRO DE CARBONO PELOS MANGUEZAIS</b>	<b>76</b>
7.1. Distribuição e formação dos manguezais	76
7.2. Estoque de carbono no solo dos manguezais	79
7.3. Estoque de carbono nas marismas	80
7.4. O carbono azul	82
<b>VIII – MERCADO DE CARBONO</b>	<b>83</b>
8.1. Conceito de mercado de carbono	83
8.2. Mercado de carbono no Brasil	85
a. Mercado voluntário de carbono	86
b. Mercado regulado de carbono	87
<b>IX - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>89</b>
<b>X - LEITURAS RECOMENDADAS</b>	<b>94</b>
<b>XI – ABREVIATURAS</b>	<b>95</b>
<b>XII – ALGUNS SITES DE INTERESSE</b>	<b>97</b>
<b>XIII – GLOSSÁRIO</b>	<b>98</b>

## APRESENTAÇÃO

A elaboração deste livro não tem o intuito de compará-lo a um livro de cunho científico, mas sim de servir como um complemento para os alunos no acompanhamento de suas aulas e para a comunidade em geral ter um conhecimento sobre o assunto, mostrando os benefícios que o sequestro de carbono pode fornecer para amenizar os efeitos gerados pelos gases de efeito estufa sobre o aquecimento global.

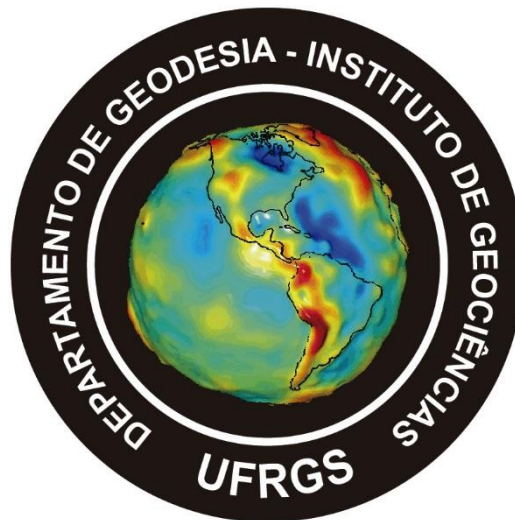
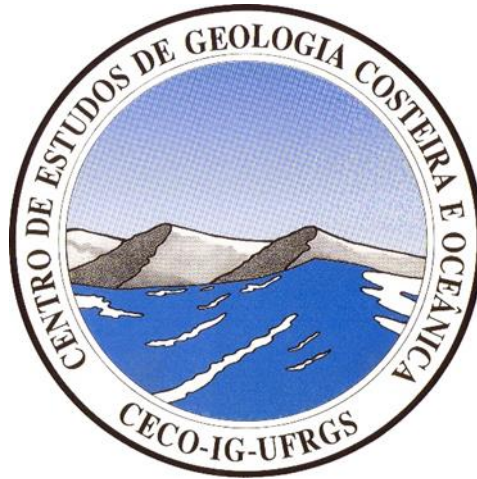
Este manuscrito pretende fornecer ideias básicas sobre a importância do sequestro de carbono no estudo e prevenção dos desastres naturais e ambientais. Neste contexto, são apresentadas as causas e os impactos ao meio ambiente e à vida humana que as emissões de carbono na atmosfera podem ocasionar. Além disso, é discutida as possibilidades de estocagem de carbono no ambiente marinho e continental, bem como os esforços que as comunidades científicas e governamentais estão fazendo para amenizar os efeitos provocados pelas emissões de carbono na atmosfera.

Além desses aspectos ecológicos, é fundamental reconhecer o papel da vegetação de grande e pequeno porte na manutenção dos ciclos naturais e na regulação dos elementos ambientais. O equilíbrio proporcionado pelas espécies nativas contribui diretamente para a estabilidade dos ecossistemas, influenciando a disponibilidade de recursos hídricos, a fertilidade do solo e a biodiversidade regional. A valorização dessas funções é essencial não apenas para a conservação da natureza, mas também para o bem-estar das populações humanas, que dependem desses serviços ambientais para a sua qualidade de vida.

Quero deixar registrado os meus mais profundos agradecimentos aos **Profs. Dr. Clóvis Carlos Carraro** (*in memoriam*) e **Dr. Luiz Roberto Silva Martins** (*in memoriam*), que me apoiaram durante toda minha vida universitária, e me ensinaram os primeiros passos no conhecimento nas inúmeras áreas das Geociências.

A eles o meu respeito e gratidão.

O Autor.



## **I. INTRODUÇÃO**

Como pode ser observado no relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC), publicado em 2019, sobre as alterações climáticas e a massa terrestre, a gestão dos solos é uma questão essencial na luta contra as mudanças climáticas, notavelmente através da sua capacidade de capturar e armazenar carbono na vegetação e nos solos, ou seja, sequestrar (Fig.1).



Figura 1. O aquecimento global ameaça a produção de alimentos.  
(fonte: [https://organicsnewsbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/08/climate-change-2063240\\_1280.jpg](https://organicsnewsbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/08/climate-change-2063240_1280.jpg))

A nível mundial, o objetivo primordial é equilibrar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o sequestro de carbono até 2050. Isso é chamado de neutralidade de carbono (NC).

A nível local, vários países do mundo adotaram o plano territorial clima-ar-energia, tornando obrigatório, aos Estabelecimentos Públicos de Cooperação Intermunicipal (EPCI) com mais de 20.000 habitantes, a realização de um diagnóstico do sequestro de carbono e do desenvolvimento de planos de ações territoriais.

No entanto, devido aos recursos escassos, à falta de conhecimentos especializados sobre o assunto e à necessidade de apoio nos métodos disponíveis, os EPCIs se encontram por vezes desamparados, quando se trata desta questão, e não implementam medidas concretas que correspondam ao potencial dos seus territórios.

Além disso, algumas entidades desenvolveram recursos e ferramentas documentais para abordar este assunto, em conexão com a questão da mitigação das alterações climáticas.

Este treinamento tem como objetivo a capacitação dos EPCIs em:

- compreender os desafios do sequestro de carbono ligado aos ecossistemas;
- conhecer as principais alavancas de ação nos setores-chave do planejamento urbano, agricultura e silvicultura;
- identificar e otimizar as ações a implementar;
- assumir o comando das diversas ferramentas que lhes são colocadas à disposição;
- beneficiar do *feedback* sobre a implementação concreta.

Esta formação apoiará, portanto, o aumento das competências dos intervenientes territoriais nas questões dos sumidouros biológicos de carbono, na luta contra as alterações climáticas e a implementação de um plano de ação otimizado no terreno.

A velocidade das alterações climáticas em curso põe em perigo a vida na Terra. Esta tem sido a observação feita pela comunidade científica há vários anos. Os efeitos são visíveis hoje (Fig.2).

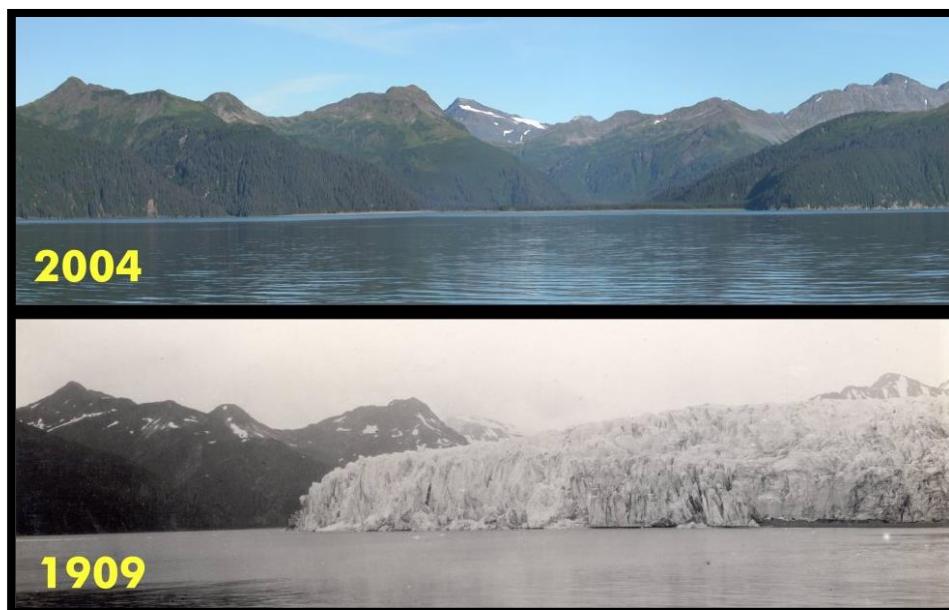


Figura 2. Efeitos das mudanças climáticas na biodiversidade (Glaciar McCarty, Alasca).  
(fonte: <https://offloadmedia.feverup.com/lisboasecreta.co/wp-content/uploads/2022/04/08091813/foto-da-terra-alterac%CC%A7o%CC%83es-clima%CC%81ticas-2.jpeg>)

Como parte do Acordo de Paris de 2015, os estados decidiram limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C, em comparação com os níveis pré-industriais.

Este objetivo exige a rápida inversão da tendência de aumento das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Até o final do século, devemos emitir menos CO<sub>2</sub> para a

atmosfera, mas devemos capturar e armazenar mais CO<sub>2</sub> nos ecossistemas (plantas, solos, oceanos) e na madeira (construção, mobiliário).

Esta captura e armazenamento chama-se sequestro de carbono, entretanto os ecossistemas não podem sequestrar mais carbono indefinidamente, para isso novas tecnologias industriais de captura e armazenamento estão sendo estudadas.

Na sua estratégia nacional de baixo carbono conhecida, o Brasil planeia alcançar a neutralidade carbônica até 2050. Isto envolve dividir as emissões de GEE por seis e multiplicar o sequestro de carbono por dois.

Hoje, de acordo com o inventário nacional de emissões de GEE, as pastagens e as florestas são sumidouros significativos de carbono. Elas sequestram, anualmente, o equivalente a 15% das emissões nacionais. Pelo contrário, pastagens degradadas ou mal manejadas e a urbanização, são fontes significativas de emissões.

Atualmente, os produtos de madeira representam um ligeiro sumidouro que poderia ser aumentado com o desenvolvimento da utilização da madeira na construção. No entanto, o carbono armazenado na madeira pode ser liberado de volta à atmosfera quando a madeira é queimada ou se decompõe. Para alcançar a neutralidade de carbono, se destaca a importância de preservar um sumidouro florestal significativo, enquanto se desenvolvem produtos de madeira de longa vida. Recomenda-se, também, controlar o desenvolvimento da urbanização e orientar a agricultura para a agroecologia. Finalmente esta estratégia considera o surgimento de tecnologias de captura.

De acordo com o IPCC, o desenvolvimento do sequestro de carbono nos solos e florestas se baseia em abordagens conhecidas e eficazes, com um custo de implementação inferior ao das abordagens tecnológicas de captura e armazenamento de carbono, inferior a 700 reais por tonelada de CO<sub>2</sub>.

O armazenamento de carbono nos ecossistemas, também pode ser acompanhado de numerosos cobenefícios: permitir que a agricultura se adapte às alterações climáticas, preservar a qualidade do solo e preservar a biodiversidade.

As ações mais virtuosas incluem, entre outras, o desenvolvimento da agroecologia, da agrossilvicultura, da proteção e restauração de ambientes naturais, florestas, zonas húmidas e do controle dos riscos de incêndio.

Contudo, nem todas as ações destinadas a armazenar carbono são iguais. Para obter o máximo benefício, elas devem ser adaptadas ao meio ambiente, por exemplo, conhecer a disponibilidade de recursos hídricos para plantar novas florestas (Fig.3).

Mas também avaliar os impactos na biodiversidade e nos requisitos de superfícies para a produção de alimentos.



Figura 3. Área de plantio de eucalipto nas proximidades de um rio.  
(fonte: [https://www.maisfloresta.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Paper-Excellence\\_IMAGE-2.jpg](https://www.maisfloresta.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Paper-Excellence_IMAGE-2.jpg))

Por último, esta obrigação pode ser vista como um incentivo, para uma visão mais global do papel do uso do solo e da biomassa, na estratégia “climática” do território e para encontrar o equilíbrio certo.

Permitir abordar as questões ligadas ao planejamento urbano:

- em quais áreas o carbono deve ser sequestrado?
- como esse serviço pode ser considerado nas estratégias financeiras?

Questões ligadas à agricultura:

- quais mudanças, nas práticas agrícolas, devem ser encorajadas?

E por último as questões ligadas à gestão florestal:

- que gestão e que utilização da madeira?

## 1.1. O que é sequestro de carbono?

O conceito de sequestro de carbono está relacionado à remoção do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera da Terra, e ao seu armazenamento nos chamados “reservatórios”. Como o CO<sub>2</sub> aumenta o efeito estufa, esse processo é crucial na luta da humanidade contra as mudanças climáticas. O sequestro de carbono, que ocorre naturalmente em grande escala, também pode ser intencionalmente ocasionado ou desencadeado por uma variedade de meios naturais e tecnológicos (Fig.4). Desta maneira, existem duas formas do processo:

Forma natural - Toda a vida orgânica, desde a água e terra até as árvores e animais, serve como um reservatório natural de  $\text{CO}_2$ . Quando os seres vivos se decompõem naturalmente, a maioria do conteúdo de carbono vai para o solo, onde dificilmente contribui para as mudanças climáticas.

Forma artificial - Diversas operações, desenvolvidas por humanos, propiciam a captura de emissões de  $\text{CO}_2$  após sua produção e, posteriormente, armazená-las ou reutilizá-las.

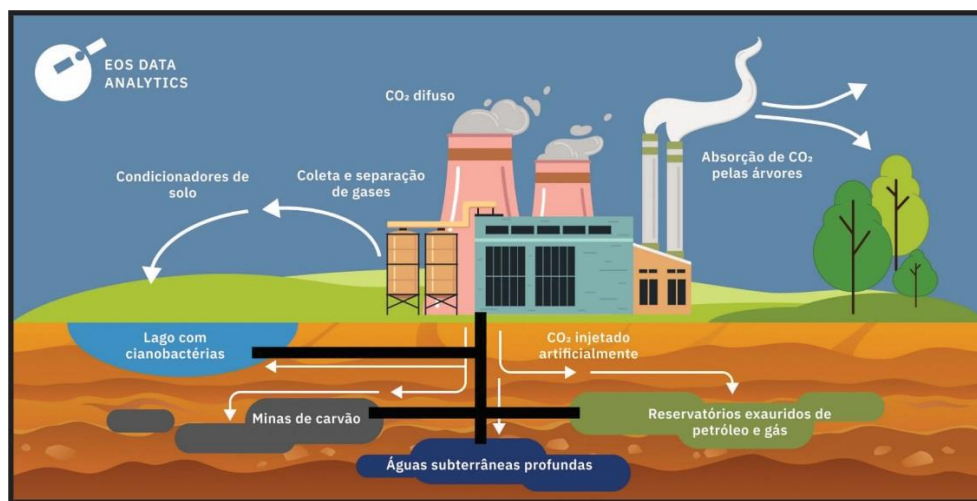


Figura 4. Sequestro de carbono.

(fonte: <https://eos.com/wp-content/uploads/2024/09/carbon-sequestration-process-pt.png>)

Em geral, o carbono é um elemento essencial para a vida no planeta e é encontrado na atmosfera na forma de  $\text{CO}_2$ . Esse gás é produzido por meio da oxidação do monóxido de carbono e é liberado por diversos organismos, incluindo plantas e árvores, durante o processo de respiração.

No entanto, a preocupação não reside na presença do  $\text{CO}_2$  na atmosfera, mas sim na sua alta concentração, uma vez que esse gás é o principal contribuinte para o aquecimento global, causando o desequilíbrio no efeito estufa.

Desse modo, o sequestro do  $\text{CO}_2$  ajuda a restabelecer o equilíbrio desses gases, amenizando as consequências da crise climática que afetam tanto o meio ambiente quanto a saúde humana.

## 1.2. Como funciona o sequestro de carbono?

A forma mais comum de sequestro de carbono é realizada naturalmente pelas florestas. Na fase de crescimento, as árvores demandam uma quantidade muito grande

de carbono para se desenvolverem, fixando, a partir da fotossíntese, o  $\text{CO}_2$  da atmosfera na forma de carboidratos, que são incorporados à parede celular das árvores.

Essa forma natural de sequestro de carbono, ajuda a diminuir consideravelmente a quantidade de  $\text{CO}_2$  na atmosfera: cada hectare de floresta em desenvolvimento é capaz de absorver de 150 a 200 toneladas de carbono. É por isso que o desmatamento é um grande inimigo do sequestro de carbono, já que o corte de árvores promove a liberação do  $\text{CO}_2$  capturado pelas plantas.

O sequestro natural de carbono mantém o  $\text{CO}_2$  afastado da atmosfera da Terra através de dois mecanismos naturais:

- Fotossíntese e sequestro de carbono - A vida vegetal absorve o  $\text{CO}_2$  atmosférico, armazena-o na biomassa e libera oxigênio em troca.
- Decomposição da matéria orgânica - Com o tempo, a decomposição da matéria orgânica libera carbono no solo (Fig.5).

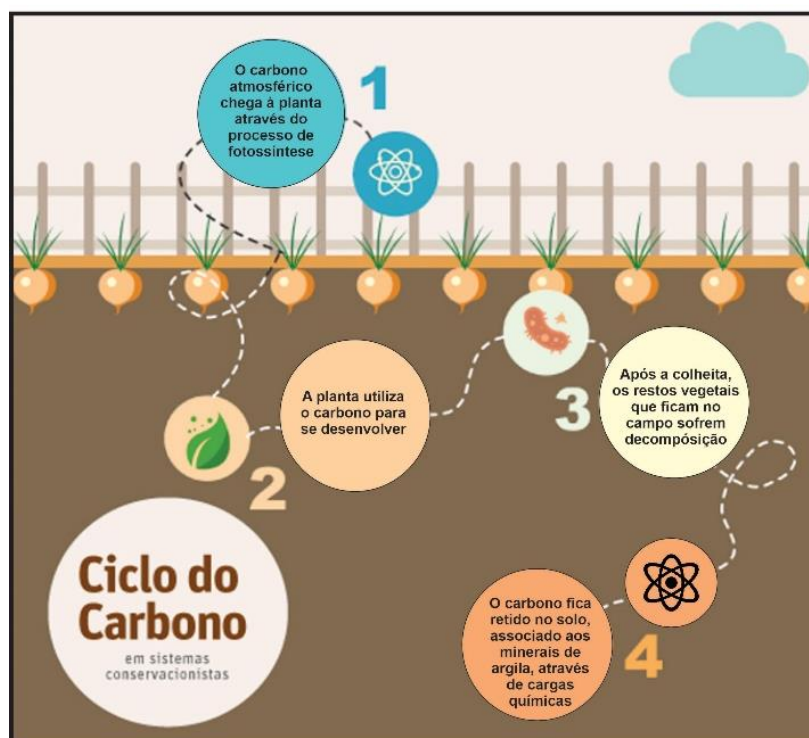


Figura 5. Ciclo do carbono.  
(modificado: Embrapa, 2018)

As atividades humanas, como o reflorestamento, a redução do cultivo, a gestão de resíduos de colheitas e a captura de  $\text{CO}_2$ , ajudam a facilitar esses processos.

Além das árvores e florestas, como as da Amazônia, o sequestro de carbono também ocorre de forma natural nos oceanos, os quais capturam carbono da atmosfera para

manter os processos de calcificação de diversos organismos marinhos. A presença excessiva de carbono na atmosfera, ocasiona o desregulamento desse processo de absorção natural, causando acidificação dos oceanos.

Preservar os meios naturais de sequestro de carbono é fundamental para evitar que a Terra entre em um “efeito estufa permanente”. Estudar e explorar tecnologias artificiais de captura e sequestro de carbono, são outras formas que têm sido usadas para amenizar os impactos da poluição atmosférica sobre o meio ambiente.

### **1.3. Qual a importância do sequestro de carbono?**

O aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera tem sido uma preocupação de governantes, cientistas e da sociedade em geral, devido ser este um dos constituintes da atmosfera, responsável pelo aumento do efeito estufa e da temperatura global. O aumento do CO<sub>2</sub>, na atmosfera, é devido as atividades antropogênicas, seguidas pela mudança do uso da terra, com redução da capacidade de armazenamento de carbono na biomassa.

Nos últimos dois séculos, a atividade humana causou um aumento significativo na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, da ordem de 35%, resultando em um aquecimento global perceptível hoje em dia.

Ao bloquear a entrada de CO<sub>2</sub> na atmosfera, o sequestro de carbono demonstrou um enorme potencial para mitigar as mudanças climáticas. Algumas indústrias, como a aviação e a indústria pesada, são notoriamente difíceis de descarbonizar, o sequestro de carbono de suas emissões é essencial para compensar suas pegadas e alcançar emissões líquidas zero.

Essa ação é muito importante para o combate ao efeito estufa, causado pelo excesso de CO<sub>2</sub> no meio ambiente, proveniente da queima de combustíveis fósseis e desmatamento, dentre outras atividades humanas nocivas.

As Florestas Plantadas têm um papel importante no sequestro de carbono e, conseqüentemente, no combate ao aquecimento global, uma vez que são semeadas com o intuito de reflorestar áreas desmatadas, reequilibrando o ecossistema.

Além de viabilizar o sequestro de carbono, para combater o efeito estufa, é preciso, principalmente, diminuir a emissão de CO<sub>2</sub>. Uma das formas de se fazer isso é utilizar fontes de energia renováveis, como a energia solar, eólica e a biomassa, que apresentam um balanço de carbono mais adequado.

## 1.4. Quais são os tipos e métodos de sequestro de carbono?

Existem três principais tipos de sequestro de carbono: biológico, que ocorre nos ecossistemas; geológico, que ocorre em formações rochosas, e tecnológico, impulsionado por atividades humanas específicas (Fig.6).



Figura 6. Tipos de sequestro de carbono

(fonte: <https://eos.com/wp-content/uploads/2024/09/carbon-sequestration-types-pt.png.webp>)

### 1.4.1. Sequestro biológico de carbono

O sequestro biológico de carbono se refere ao armazenamento de  $\text{CO}_2$  em ecossistemas naturais, como florestas, solos, plantas de pastagens e oceanos. Podemos nos perguntar quais são as maneiras de promover o sequestro biológico de carbono?

#### 1.4.1.1. Sequestro florestal de carbono

As florestas e os bosques são os sistemas terrestres de sequestro mais eficazes, devido às abundantes quantidades de  $\text{CO}_2$  que capturam através da fotossíntese (Fig.7). Na verdade, esses sistemas capturaram quase 30% das emissões de  $\text{CO}_2$ , ocasionadas pela atividade humana nas últimas décadas. Entretanto, o desmatamento e a fragmentação florestal, representam sérias ameaças ao processo de sequestro de carbono.



Figura 7. Sequestro biológico de carbono

(fonte: <https://p2.trrsf.com/image/fgget/cf/800/450/middle/images.terra.com/2023/09/06/1627566855-bdd4f4dccace8e4d2e66fe8198dd2073.jpg>)

No entanto pode-se direcionar atividades, por intervenção humana, que irão auxiliar no sequestro de carbono:

- Plantio de árvores tanto em áreas previamente florestadas (reflorestamento) quanto em áreas não florestadas (aflorestamento);
- Gestão florestal sustentável, abrangendo práticas como corte seletivo, desbaste de madeira e queima controlada.

#### **1.4.1.2. Sequestro de carbono em pastagens**

Apesar das florestas terem a reputação como absorvedoras de CO<sub>2</sub>, as árvores arriscam contribuir para as mudanças climáticas devido a secas e incêndios florestais. As pastagens são mais resilientes a essas calamidades, pois, ao contrário das árvores, as gramíneas armazenam a maior parte de seu conteúdo de carbono no subsolo. Mesmo após a ocorrência de um incêndio, as gramíneas retêm seu carbono armazenado no solo e em suas raízes profundas.

Para o aumento das áreas de pastagem, o ser humano, pode revitalizar terras degradadas, com o intuito de aumentar sua capacidade de armazenamento e nutrindo sistemas agroflorestais, que atuam como importantes absorvedores de CO<sub>2</sub> (Fig.8).



Figura 8. Manejo de pastagens perenes para sequestro de carbono.  
(fonte: <https://blog.epagri.sc.gov.br/wp-content/uploads/2024/03/silvipastoral-ABC.jpg>)

Conant *et al.* (2001), revisaram cerca de 115 estudos, em 17 países, sobre os efeitos do manejo da pastagem sobre a matéria orgânica do solo. Identificaram que fertilização, manejo do pastejo adequado, espécies produtivas, conversão de cultivos agrícolas em pastagens permanentes, presença de leguminosas e irrigação, aumentaram o sequestro de carbono do solo. A taxa média de sequestro de carbono, nestes estudos, foi  $-0,2$  a  $+3,0$  tC/ha/ano (Tonelada de Carbono por hectare por ano).

#### **1.4.1.3. Sequestro de carbono no solo**

O sequestro de carbono no solo se refere ao processo em que o  $\text{CO}_2$  da atmosfera é capturado e armazenado no solo.

Esse processo pode ocorrer de diferentes formas: por incorporação de matéria orgânica, fixação biológica do nitrogênio, fotossíntese e até por meio dos próprios agregados do solo.

Isso contribui para a formação do chamado Estoque de Carbono no Solo (ECS), que além do  $\text{CO}_2$  da atmosfera, também é proveniente de restos animais, vegetais ou de microrganismos presentes em matérias em decomposição (Fig.9).

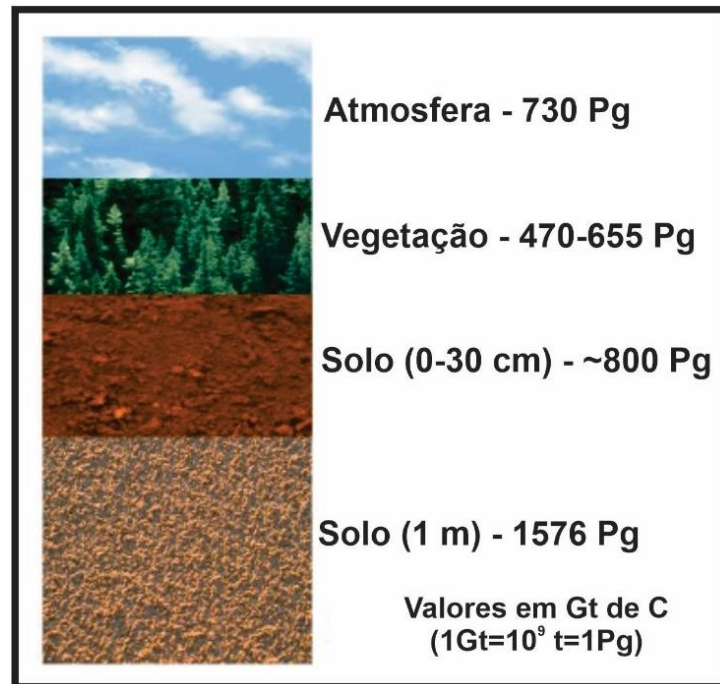


Figura 9. Estoques globais de carbono no sistema solo-planta-atmosfera.  
(modificado: Cerri, 2023)

À medida que a matéria orgânica se decompõe, ela deixa para trás no ECS, uma forma de armazenamento de CO<sub>2</sub> no solo. Em muitos casos, o ECS tem uma capacidade de armazenamento de CO<sub>2</sub> de várias anos ou décadas. O sequestro de carbono no solo é uma das estratégias mais econômicas para mitigar os impactos das mudanças climáticas.

O processo de sequestro de carbono no solo pode ocorrer de diferentes formas, sendo uma delas a incorporação de matéria orgânica no solo, como resíduos vegetais, esterco ou restos de culturas agrícolas.

A incorporação desse carbono é realizada por microrganismos que ocasionam a decomposição da matéria orgânica, liberando o CO<sub>2</sub> e permitindo a integração do carbono na estrutura do solo.

O sequestro de carbono ocorre também por meio das raízes das plantas. Afinal, elas retiram CO<sub>2</sub> da atmosfera por meio da fotossíntese e parte desse carbono é enviado para as raízes, onde é liberado no solo.

Além disso, o sequestro de carbono também pode ocorrer via fixação biológica do nitrogênio. Isso porque várias espécies de plantas estabelecem uma relação simbiótica com bactérias fixadoras de nitrogênio. Essas bactérias transformam o nitrogênio atmosférico em formas utilizáveis, ocasionando o aumento da biomassa das plantas e, conseqüentemente, o teor de carbono no solo.

Por fim, os agregados do solo, formados a partir da junção de partículas minerais e matéria orgânica, estão entre os principais responsáveis pelo sequestro de carbono no solo. Afinal, esses agregados contribuem para a estruturação do substrato e impedem sua decomposição, permitindo que o solo atue como estoque de carbono por um período maior.

#### **1.4.1.4. Fertilização dos oceanos**

Antes de iniciar o assunto da fertilização dos oceanos é necessário entender que a concentração de fitoplâncton no planeta Terra é estritamente essencial para a regulação do clima global e para a manutenção do equilíbrio dos oceanos. O fitoplâncton é responsável pela maior parte da captura do CO<sub>2</sub> da atmosfera, essencial no processo de fotossíntese.

Além disso, o fitoplâncton, como organismos produtores, constitui a base das cadeias tróficas marinhas. Dessa forma, é através das microalgas que ocorre o início do aprisionamento do CO<sub>2</sub> atmosférico, inicialmente assimilado por meio da fotossíntese.

Deste modo, o CO<sub>2</sub>, bioassimilado, percorre a coluna d'água oceânica por transferência de energia, quando o fitoplâncton é utilizado como alimento por outros seres vivos. Quando não são consumidos, quando morrem, afundam nos oceanos sequestrando carbono.

A ideia da fertilização dos oceanos, é de que o elemento ferro age como um micronutriente limitante para o crescimento do fitoplâncton (algas microscópicas), em áreas oceânicas específicas com muito nutriente e pouca clorofila (zonas HNLC, *High-nutrient low-chlorophyll*), pois não recebem aporte significativo de poeira continental e são distantes das desembocaduras de rios, as principais fontes de ferro dos oceanos (Fig.10).

A fertilização dos oceanos, a qual envolve a adição de nutrientes limitantes, como o ferro, às águas oceânicas, pode ocasionar o aumento da fixação de CO<sub>2</sub> em uma grande parte dos oceanos. No entanto, essa técnica não é ainda bem aceita pela comunidade científica. Se a quantidade de carbono, armazenado nas camadas superficiais do oceano, for excessiva, o ecossistema aquático corre o risco de acidificação e do desenvolvimento de efeitos colaterais relacionados. Regulamentações legais internacionais devem ser implementadas, para garantir que o sequestro de carbono nos oceanos seja realizado com segurança.

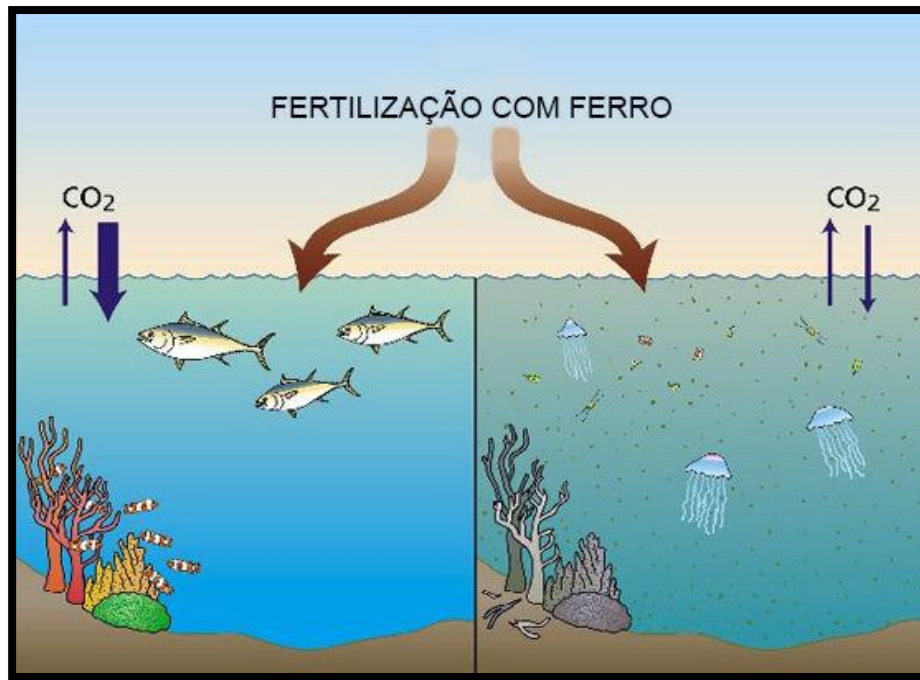


Figura 10. Fertilização dos oceanos: uma alternativa polêmica para o aquecimento global.  
(fonte: [https://static.wixstatic.com/media/c4e423\\_d790b5d94964404abef00537be08228b~mv2.jpg/v1/fill/w\\_550,h\\_400,al\\_c,q\\_80,enc\\_avif,quality\\_auto/c4e423\\_d790b5d94964404abef00537be08228b~mv2.jpg](https://static.wixstatic.com/media/c4e423_d790b5d94964404abef00537be08228b~mv2.jpg/v1/fill/w_550,h_400,al_c,q_80,enc_avif,quality_auto/c4e423_d790b5d94964404abef00537be08228b~mv2.jpg))

#### 1.4.2. Sequestro geológico de carbono

Um dos vários métodos existentes para minimizar as emissões de GEE com a finalidade de mitigar as mudanças climáticas é o da captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> em reservatórios geológicos.

O sequestro geológico de carbono, consiste na separação do CO<sub>2</sub> oriundo de processos industriais e daqueles processos relacionados à geração e/ou consumo de energia, seguido de transporte para um local de estocagem segura, de modo que haja o isolamento do gás em relação à atmosfera, por um longo período.

No sequestro geológico de carbono, o CO<sub>2</sub> é removido de sistemas estacionários de geração de energia, campos de exploração de óleo e gás, refinarias de petróleo, empresas produtoras de cimento, siderúrgicas, unidades de produção de gás natural (UPGNs), unidades de produção de fertilizantes etc., sendo injetado e armazenado com segurança em espaços porosos de formações geológicas a grande profundidade e/ou utilizados em processos industriais.

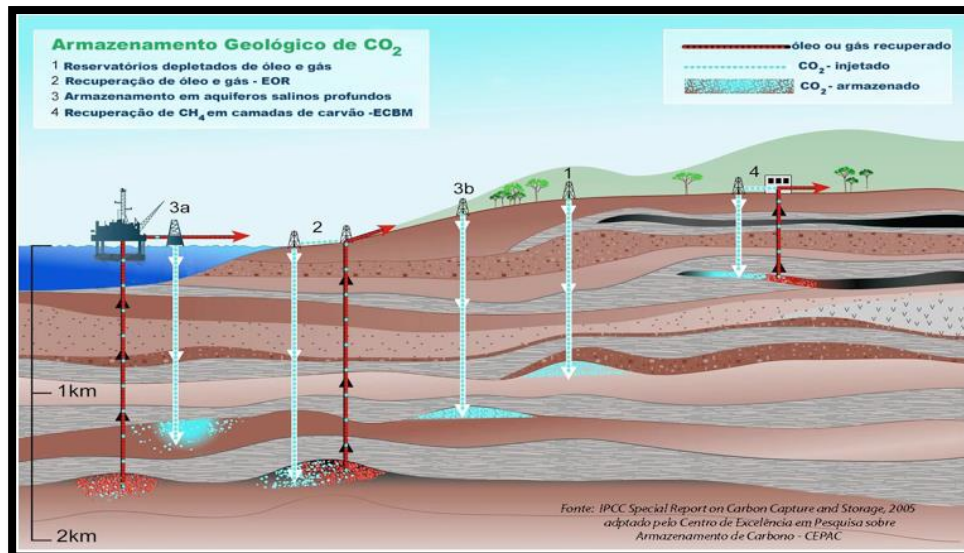


Figura 11. Esquema de opções de armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>.  
(fonte: IPCC, 2005)

O sequestro geológico de carbono envolve a injeção artificial de CO<sub>2</sub> (geralmente de fontes industriais) em corpos rochosos subterrâneos (Fig.11).

Como exemplos desses reservatórios temos:

- Aquíferos salinos profundos. Minerais carbonáticos estáveis eventualmente se formam em formações profundas embebidas em água salgada.
- Reservatórios exauridos de petróleo e gás. Armazenar CO<sub>2</sub> nesses reservatórios contribui para a recuperação de petróleo.
- Camadas de carvão não mineráveis. O CO<sub>2</sub> adsorvido na superfície do carvão permite a coleta do metano deslocado para recuperação e uso desse como fonte de energia.
- Formações de basalto. Nessas formações o CO<sub>2</sub> reage com minerais, permitindo a formação rápida de minerais carbonáticos estáveis.

O sequestro geológico de carbono apresenta um alto risco de vazamento de CO<sub>2</sub>, e, portanto, deve ser planejado e gerenciado com o máximo de cautela.

Cada tipo de reservatório tem suas peculiaridades e estas devem ser levadas em consideração quando da injeção do CO<sub>2</sub>.

Segundo Ketzer *et al.*, (2016), para que uma rocha seja adequada para ser reservatório de CO<sub>2</sub>, necessita ter uma boa porosidade, que seja permeável e que apresente um mecanismo de aprisionamento, que impeça o CO<sub>2</sub> de migrar de volta a superfície. Este aprisionamento pode ser efetuado pela presença de uma camada “selo”,

também chamada de “armadilha”, a qual pode ser estratigráfica ou estrutural ou uma combinação de ambas.

Segundo os mesmos autores, atualmente existem no mundo mais de 12 projetos de grande escala, nos quais o CO<sub>2</sub> é armazenado em reservatórios geológicos. Estima-se que estes projetos armazenem mais de 20 milhões de toneladas (Mt) de CO<sub>2</sub>, em formações geológicas, por ano.

Segundo estudos de Dino & Gallo (2009), na Bacia do Recôncavo, a qual possui mais de 80 campos de petróleo com produção ativa e explorados a várias décadas, esta apresenta muito de seus campos em fase final de exploração. Entre estes, o campo de Buracica que foi utilizado para recuperação avançada de petróleo com injeção de CO<sub>2</sub>. O armazenamento de CO<sub>2</sub>, neste poço, teve início na década de 1990 e, até 2005, já havia armazenado mais de 0,6 Mt de CO<sub>2</sub>, tendo sido um projeto exitoso.

### 1.4.3. Sequestro tecnológico de carbono

O sequestro tecnológico de carbono compreende uma série de métodos de engenharia humana, projetados para capturar e armazenar CO<sub>2</sub> de fontes de grande porte ou diretamente da atmosfera. Estas tecnologias têm como objetivo remover as emissões de carbono do ciclo do carbono, evitando assim sua liberação na atmosfera (Fig.12).

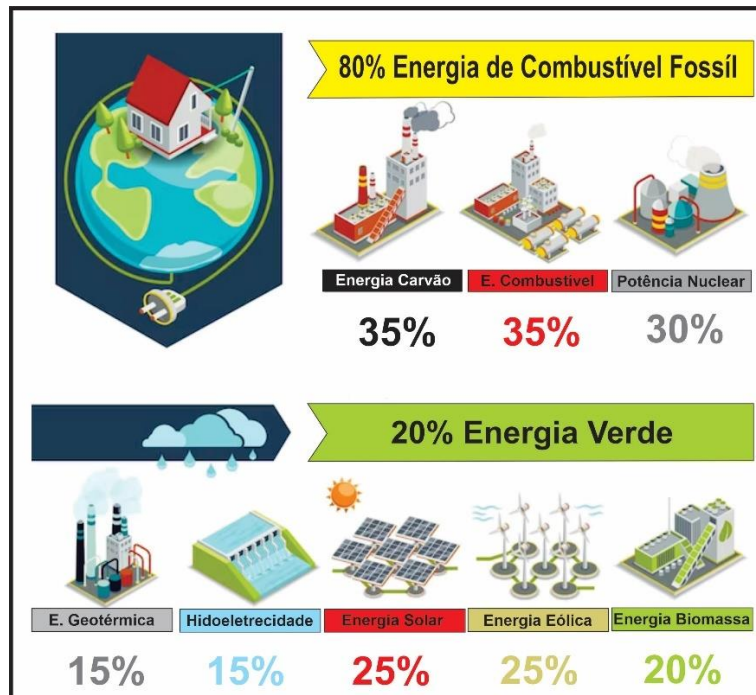


Figura 12. Infográfico de sequestro tecnológico de carbono.

(modificado: [https://img.freepik.com/vetores-premium/infografia-de-energia-de-combustivel-fossil-e-geracao-de-energia-renovavel\\_1284-52944.jpg](https://img.freepik.com/vetores-premium/infografia-de-energia-de-combustivel-fossil-e-geracao-de-energia-renovavel_1284-52944.jpg))

Os cientistas estão sempre em busca de novos métodos para extrair CO<sub>2</sub> da atmosfera e armazená-lo, ou melhor ainda, reutilizá-lo por meio de tecnologias inovadoras, como:

- Captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> (CCS). Essa visão envolve a captura de emissões de usinas de energia ou plantas industriais, comprimindo e transportando o gás por redes de tubulação e injetando-o em formações geológicas para armazenamento.
- Produção de grafeno. Captura de emissões de CO<sub>2</sub> da indústria da construção e utilização da carbonização acelerada para produzir grafeno, um material tecnológico à base de carbono.
- Captura direta do ar (CDA). Essa tecnologia depende de plantas avançadas especializadas, e, embora seja eficaz, permanece proibitivamente cara e intensiva em energia para uma adoção em larga escala.
- Moléculas projetadas. Essa abordagem inovadora permite a redução simultânea de emissões atmosféricas e a produção de matérias-primas por meio da conversão de moléculas de CO<sub>2</sub> em outros compostos químicos.

#### **1.4.4. Benefícios do sequestro de carbono**

Segundo dados da EOS Data Analytics (2024), inúmeros são os benefícios ambientais e mesmo econômicos quando o sequestro de carbono é bem-planejado e bem-executado.

- Mitigação das mudanças climáticas. O sequestro natural de emissões de carbono é uma das estratégias mais práticas para combater as mudanças climáticas, ao reduzir de forma eficaz e sustentável as concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>, um GEE.
- Melhoria da fertilidade do solo e aumento da produtividade agrícola. O sequestro de carbono orgânico no solo (COS) atrai investimentos em práticas agrícolas regenerativas e inteligentes em relação ao clima. Como resultado, temos solos mais saudáveis, os rendimentos agrícolas aumentam e a resiliência da agricultura, às mudanças climáticas, cresce.
- Melhoria da saúde pública. Vertigens, dor de cabeça, problemas respiratórios e aceleração do batimento cardíaco são apenas alguns dos sintomas observados após exposição prolongada a altos níveis de CO<sub>2</sub>.

Todos esses impactos podem ser consideravelmente reduzidos, com melhora na saúde das pessoas, a longo prazo, por meio de um sequestro de carbono adequadamente implementado.

- Incentivos econômicos. Empresas e organizações envolvidas em iniciativas de sequestro, podem cobrir o investimento inicial e gerar fluxos de renda sustentáveis, através da venda de créditos de carbono (VCCs).

#### **1.4.5. Desafios do sequestro de carbono**

Apesar dos inúmeros benefícios relacionados ao sequestro de carbono, é de fundamental importância considerar os desafios que isso pode ocasionar.

Estudos apresentados pela EOS Data Analytics (2024) mostram que:

- Altos custos iniciais. Investimentos massivos deverão ser utilizados em pesquisa, infraestrutura e equipamentos, para que as iniciativas de sequestro de carbono alcancem seus objetivos. No entanto, como mencionado anteriormente, os créditos de sequestro de CO<sub>2</sub> podem compensar essas despesas.
- Lavagem verde (*Greenwashing*). Alguns setores poluentes podem usar o sequestro de CO<sub>2</sub> como desculpa para evitar buscar maneiras diretas de reduzir suas emissões, mesmo que essas soluções sejam possíveis. Felizmente, existem regulamentações em vigor para impedir que as empresas abusem dos créditos de carbono (CCs).

### **1.5. O diagnóstico territorial do sequestro de carbono**

No âmbito do plano territorial ar-energia climático, os EPCIs, com mais de 20.000 habitantes, devem realizar um diagnóstico do sequestro de carbono no seu território e apoiá-lo com um programa de ação. O trabalho de diagnóstico do sequestro de carbono é uma etapa essencial, devido que permite objetivar as questões específicas do território e identificar os setores nos quais se deve priorizar o plano de ação. Várias abordagens e ferramentas se apresentam disponíveis, como as desenvolvidas pelos observatórios regionais de GEE e emissões de poluentes atmosféricos, com base no guia metodológico para o desenvolvimento de inventários territoriais, ou a ferramenta ALDO proposta como uma abordagem simplificada. Estas abordagens já permitem obter as principais ordens de grandeza sobre os estoques existentes a preservar, os níveis de sequestro por setor a

comparar com as emissões do território, ainda que possam ser esclarecidos, melhorando o conhecimento da ocupação do solo e sua evolução. A identificação de potenciais adicionais de sequestro é mais complexa, devido que requer um conhecimento detalhado do território: qual é o estado das práticas agrícolas e como podem evoluir, que quantidades adicionais de biorresíduos podem ser devolvidas ao solo, qual é o estado atual da gestão florestal e até que ponto podemos desenvolver os usos da madeira nos edifícios, em que espaços urbanos devemos encorajar o armazenamento de carbono, tendo em conta a concorrência entre os usos do solo.

## 1.6. Contribuição do Brasil ao Acordo de Paris

Por ocupar o sexto lugar entre os maiores emissor de GEE do planeta (Fig.13) e ter sido um ator relevante na construção do Acordo de Paris, o Brasil surpreendeu o mundo, em dezembro de 2020, ao submeter uma nova Contribuição Nacionalmente Determinada (CNS) com menor ambição de redução de emissões de GEE para 2030, quando comparada à que já havia sido apresentada em 2015. O anúncio chegou em um momento no qual mais de 40 países, entre eles os 27 da União Europeia e o Reino Unido, além de vizinhos como Argentina, Chile e Colômbia, caminham na direção oposta, com compromissos mais sólidos e a visão clara de que terão vantagens competitivas em um futuro inevitavelmente de economias descarbonizadas.

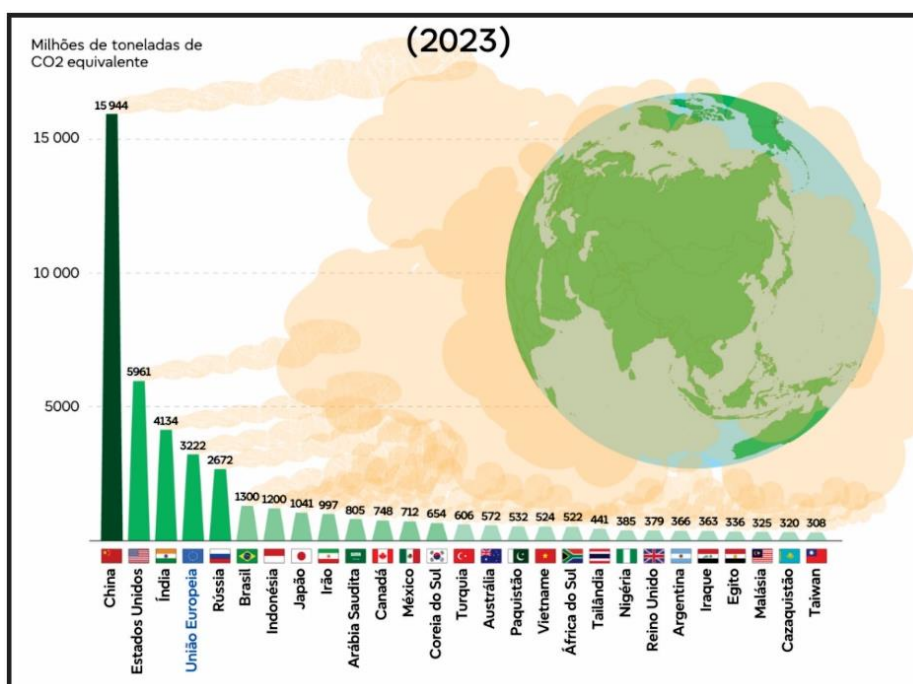


Figura 13. Maiores emissores de gás de efeito estufa à escala mundial em 2023.

(modificado: <https://www.europarl.europa.eu/resources/library/images/20241202PHT25799/20241202PHT25799-cl.png>)

Construído com base em confiança e cooperação, o Acordo de Paris provocou reflexões sobre o seu sucesso até o momento. O ano de 2020 marcou o prazo para que os países apresentassem atualizações ou novas metas climáticas, conhecidas como Contribuição Nacionalmente Determinada (CNS), mais ambiciosas do que as de 2015, quando a capital francesa presenciou a histórica assinatura do acordo. Os compromissos apresentados naquele ano não foram suficientes para limitar as mudanças climáticas e manter o aumento da temperatura média global em 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais. Para alcançar esse objetivo globalmente, a soma das metas das novas e atualizadas CNSs devem representar uma redução de cerca de 55% das emissões até 2030, em comparação ao que foi acordado em 2015.

Um número crescente de evidências mostra que aumentar a ambição significa uma economia mais limpa, justa e resiliente, com crescimento maior e geração de empregos superior ao modelo de desenvolvimento atual – inclusive no cenário de crise imposto pela pandemia da Covid-19. Mas por que a CNS do Brasil ficou aquém do esperado? Veja os motivos pelos quais o anúncio brasileiro não é suficiente para tornar o país um líder na agenda climática.

### **1.6.1. Redução do nível de ambição**

A primeira CNS submetida pelo governo brasileiro e ratificada em 2016, previa a meta de reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 e em 43% até 2030, ambas em comparação às emissões de 2005 (Fig.14). Ela usava, como linha de base para as metas, a quantidade de emissões de GEE do Brasil de 2005 de acordo com o Segundo Inventário Nacional, produzido pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Ao apresentar a nova CNS, em dezembro de 2020, o governo brasileiro assumiu como meta os mesmos índices previstos na primeira CNS.

Porém, entre a primeira e a nova CNS apresentada em 2020, a contabilização de GEE que o Brasil emitiu em 2005, foi atualizada com a publicação do Terceiro Inventário Nacional. Esse inventário aprimorou a metodologia de cálculo de emissões, algo natural para incorporar o processo científico, o que resultou no aumento da contabilização de emissões para aquele ano. Se no segundo inventário, a emissão em 2005, foi de 2,1 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO<sub>2e</sub>), no terceiro inventário subiu para 2,8 GtCO<sub>2e</sub>.

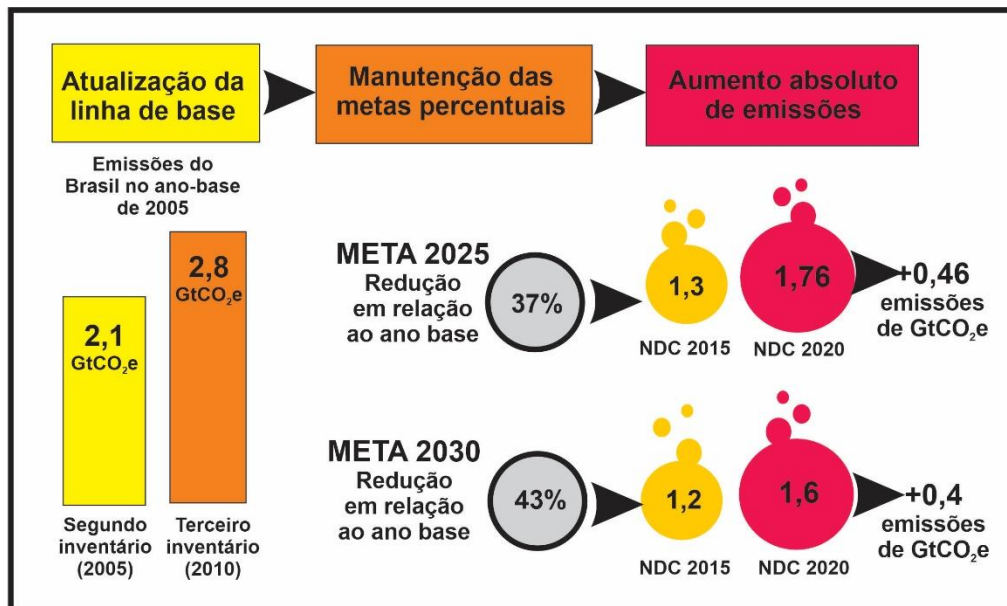


Figura 14. Meta da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil.  
(modificado: <https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/uploads/ndc-brasil.png>)

Na prática, a nova CND permite que o Brasil emita mais GEE do que anteriormente previsto, pois mantém a porcentagem na meta apesar do aumento no valor absoluto a que essa porcentagem se refere. Por esse motivo a meta se torna menos ambiciosa. A nova CND permite que o Brasil emita cerca de 0,4 GtCO<sub>2</sub>e a mais do que a meta submetida em 2015, como mostra a figura 14.

Apesar desse tipo de ajuste, na linha de base, ser justificável, devido ao progresso científico, as novas metas deveriam incorporar um ajuste proporcional em termos absolutos. Para refletir o mesmo nível de ambição de 2015, a nova meta de redução de emissões apresentada pelo Brasil, para 2030, deveria ser de 57% e não de 43%.

### 1.6.2. Metas setoriais

Em 2015, a CND brasileira submetida, continha um anexo com detalhes e esclarecimentos abrangentes sobre como e quais políticas o país estava planejando implementar, para atingir a meta desejada. Lá estavam sinalizações importantes para 2030, como zerar o desmatamento ilegal na Amazônia, restaurar 12 milhões de hectares de florestas até 2030 e atingir entre 28% e 33% de energias renováveis não-hidrelétricas na matriz nacional. A CND, apresentada em 2020, não apresentou detalhes de como serão alcançadas, e não ofereceu nenhum indicativo de medidas setoriais, a serem tomadas, para alcançar as metas propostas.

A nova CND apenas salienta que o governo estabeleceu uma política de pagamento por serviços ambientais e cita o programa Floresta +, fazendo referência aos

mercados voluntários de carbono. Embora não sejam obrigatórios, os anexos das CNDs fornecem detalhes adicionais e importantes sobre como o país planeja cumprir os compromissos propostos.

Comunicar claramente as políticas e medidas setoriais específicas a serem tomadas é muito relevante, não apenas pela transparência e por uma governança mais robusta, mas por permitir que os diferentes setores econômicos e partes envolvidas estejam engajados, contribuam para a implementação dos compromissos e cobrem do governo os incentivos e ações necessárias. Essa redução da transparência pode, inclusive, comprometer o potencial apoio financeiro de outros países para a implementação de ações no país.

Em 13/11/2024 o Governo Brasileiro encaminhou a ONU a sua nova CND, onde estabelece a meta de reduzir as emissões líquidas de GEE do país entre 59% e 67% até 2035, em comparação aos níveis de 2005, o que equivale a alcançar entre 0,85 e 1,05 GtCO<sub>2</sub>e em termos absolutos. Esse compromisso reflete o alinhamento do Brasil com as metas do Acordo de Paris. (Fig.15)

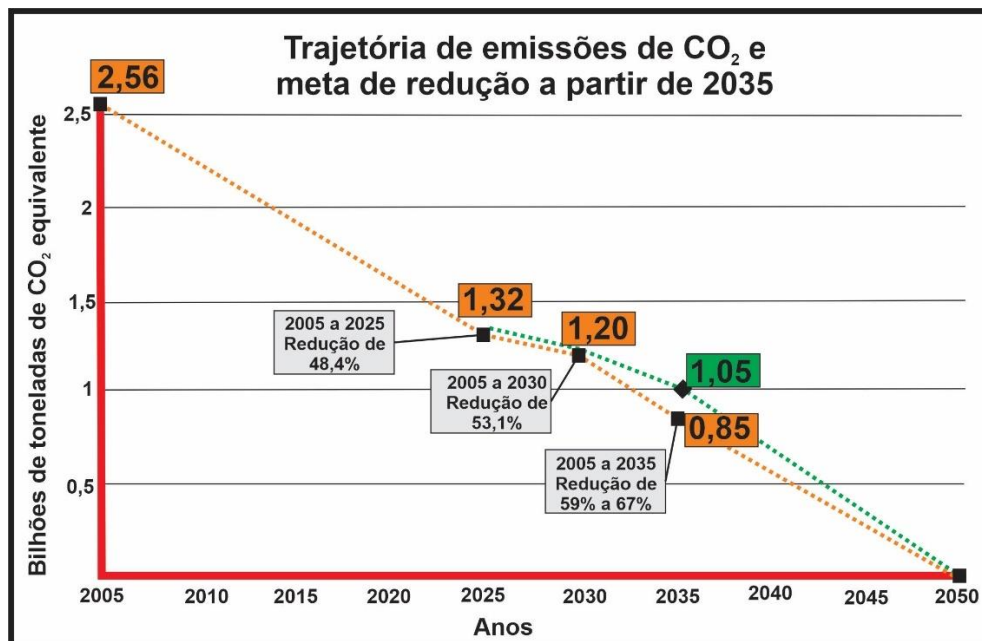


Figura 15. Trajetória de emissão de CO<sub>2</sub> no Brasil e meta de redução a partir de 2035. (modificado: MCTI 2024)

Com uma “meta em banda”, a CND brasileira define, como objetivo principal, envidar todos os esforços para obter uma ambiciosa redução de emissões líquidas de 67%, conforme explicitado acima, admitindo uma margem de variação, caso se verifiquem alterações significativas nos cenários econômicos de cooperação internacional e de

avanços tecnológicos adotados na sua definição e que, portanto, podem influenciar sua execução até 2035.

Com base nessa nova CND, os Planos Setoriais de Mitigação, em fase de elaboração e que deverão estar concluídos no segundo semestre de 2025, estabelecerão valores absolutos de redução de emissões de todos os GEE e metas para todos os setores da economia brasileira. Dessa forma, o Brasil estará alinhado ao objetivo de neutralidade climática até 2050, e ao compromisso global de limitar o aquecimento a 1,5°C em relação ao período pré-industrial, conforme o Balanço Global acordado na COP28, em Dubai, em 2023.

Com base no Pacto entre os Três Poderes pela Transformação Ecológica, firmado em agosto de 2024, o compromisso climático do Brasil demonstra a determinação do Estado brasileiro em inaugurar um novo paradigma de desenvolvimento. Esse modelo busca conciliar ambições de prosperidade socioeconômica, justiça climática e equilíbrio, refletindo uma visão integrada de sustentabilidade que promove o crescimento econômico, a preservação ambiental e valoriza a cultura e as contribuições das práticas e estilos de vida dos povos originários.

O documento também foi concebido como plataforma de investimentos para canalizar recursos internacionais para a transformação ecológica, baseada na inovação tecnológica, utilização consciente dos recursos naturais, elevação da produtividade econômica, geração de renda e emprego e redução das desigualdades. Ao cumprir o proposto em sua CND, o Brasil aproveitará suas vantagens comparativas de sustentabilidade para ampliar e modernizar a estrutura produtiva nacional.

Como parte de um modelo de desenvolvimento sustentável para o Brasil, a nova CND é orientada pelo Plano Clima. Em elaboração pelo Governo Federal desde 2023, o plano inclui eixos voltados à mitigação das emissões de GEE e à adaptação aos impactos das mudanças climáticas, com sete planos setoriais para mitigação e 16 para adaptação.

O Plano Clima é sustentado pelos mecanismos econômicos do Plano de Transformação Ecológica (PTE), incluindo a Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos e para a Transformação Ecológica (BIP), o Programa Eco Invest Brasil (PEIB), a Taxonomia Sustentável Brasileira (TSB), os Títulos Soberanos Sustentáveis (TSS), o Fundo Clima (FC), a reforma tributária, o mercado regulado de carbono, e o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE). Além disso, ações voltadas ao combate de desmatamento e à restauração florestal contarão com o apoio do Fundo Amazônia (FA), do Fundo Florestas Tropicais para Sempre (TFTS) e de iniciativas do Banco Nacional de

Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), como o Arco da Restauração na Amazônia (ARA).

As reduções significativas no desmatamento da Amazônia e do Cerrado são resultados diretos do compromisso climático do Brasil, impulsionados por planos estratégicos como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) e o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado (PPCerrado). Entre agosto de 2023 e julho de 2024, o desmatamento na Amazônia foi reduzido em 30,6%, a maior queda proporcional em 15 anos (Fig.16), enquanto no Cerrado (Fig.17), a redução foi de 25,7%, chegando ao menor nível desde 2019. Essas reduções evitaram a emissão de 400,8 Mt de CO<sub>2</sub> e reforçam o compromisso do país com a preservação dos biomas.

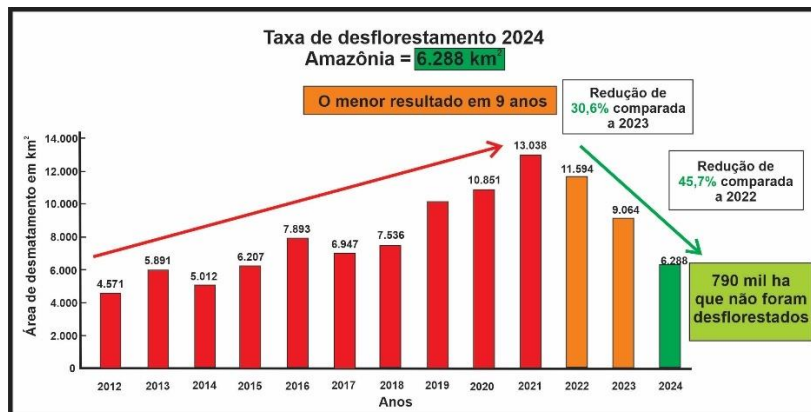


Figura 16. Área de desflorestamento da Amazônia entre 2012 e 2024.  
(modificado: Gov.br, 2024)

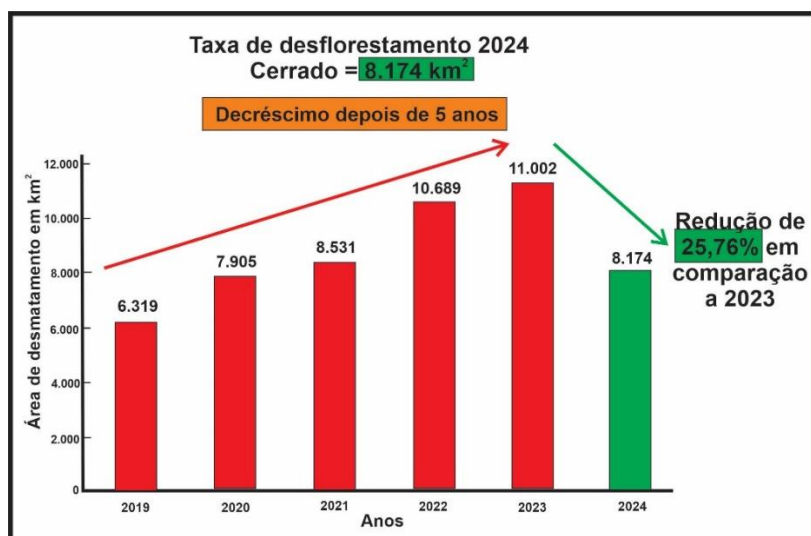


Figura 17. Área de desmatamento do Cerrado entre 2019 e 2024  
(modificado: Gov.br, 2024)

Elaborada com base na ciência mais atualizada, a nova CND considerou as diretrizes estabelecidas no Plano Clima, desenvolvido por meio de um processo de consulta envolvendo governo, sociedade, setor privado, academia, estados e municípios.

A nova CND marca o início de um ciclo de prosperidade econômica e social, lastreado em soluções de baixo carbono que promovem inovação tecnológica, uso consciente dos recursos naturais e geração de emprego. Com essas iniciativas, o Brasil visa não apenas cumprir seu compromisso climático, mas também se tornar um polo de referência global em prosperidade, sustentabilidade e desenvolvimento.

### **1.6.3. Objetivo de longo prazo**

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) convida os países, signatários do acordo, a apresentarem uma estratégia de longo prazo, com objetivos, até o meio do século, compatíveis com o objetivo de manter o aumento da temperatura global bem abaixo de 2°C. Embora o Brasil tenha anunciado a intenção de chegar à neutralidade climática até 2060, o texto é vago por não apresentar uma estratégia formal de longo prazo, nem detalhar planos ou medidas para alcançá-la.

Ao longo do texto, a nova CND utiliza tanto o termo "neutralidade de carbono" quanto "neutralidade climática", termos esses que são diferentes, sendo o primeiro relacionado apenas a emissões de CO<sub>2</sub> e o segundo a todos os GEE. A neutralidade climática, portanto, é mais ambiciosa e deveria ser o foco principal do país.

Outro aspecto relevante é o condicionamento das metas presentes na nova CND ao financiamento internacional. O texto do novo compromisso sugere que o aumento desses esforços de longo prazo – de 2060 para 2050 – dependeria de transferências financeiras de países desenvolvidos e que o Brasil requer US\$ 10 bilhões por ano para realizar esforços de descarbonização – começando em 2021. O texto também não deixa claro se as metas para 2025 e 2035 estariam também condicionadas aos mecanismos de mercado e ao financiamento internacional.

A condicionalidade é uma mudança de postura em relação à CND de 2015, a qual mencionava claramente que a sua implementação não dependia de apoio internacional, embora deixasse clara a importância desse tipo de suporte. O Brasil ganhou um status relevante no âmbito do Acordo de Paris, no ano da sua assinatura, ao mencionar que poderia alcançar as metas por conta própria.

## II. URBANISMO

### 2.1. Armazenar carbono nos ecossistemas: Desenvolver cidades com natureza

Juntamente com o clima, o uso do solo é um dos principais fatores que influenciam os estoques de carbono nos ecossistemas. Esses estoques de carbono estão presentes nos solos e na biomassa. Os estoques de carbono são maiores em zonas úmidas, florestas e pastagens permanentes.

Os espaços verdes, como as florestas urbanas, possuem estoques comparáveis a ambientes naturais semelhantes. Os menores estoques são encontrados em espaços impermeabilizados e edificados. Estas unidades populacionais evoluem de forma diferente dependendo da utilização do solo. Assim, as reservas são relativamente estáveis nos solos cultivados, enquanto aumentam nos prados e florestas permanentes.

Atualmente são as florestas e prados permanentes que sequestram anualmente a maior parte do carbono por hectare. É, portanto, essencial preservar o maior número possível de unidades populacionais existentes, sejam elas quais forem (Fig.18).

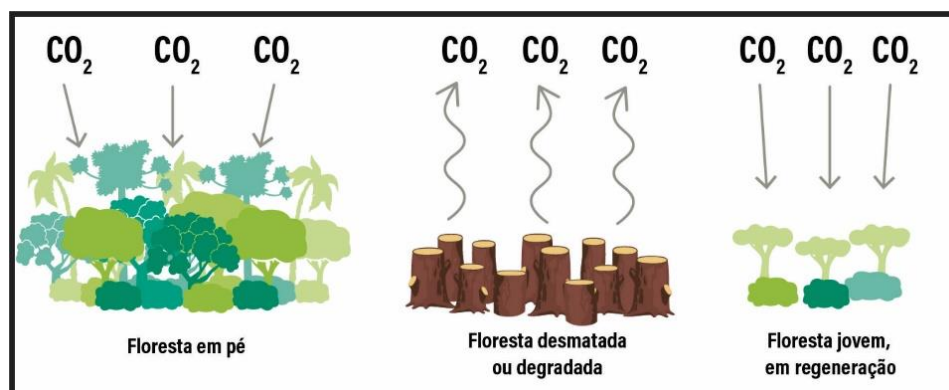


Figura 18. Florestas como fontes ou sumidouros de  $CO_2$ .

(modificado: [https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/uploads/20\\_01\\_21\\_carbon\\_flux\\_v4\\_graphic\\_1\\_0.jpg](https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/uploads/20_01_21_carbon_flux_v4_graphic_1_0.jpg))

Na maioria das vezes, isto se resume à preservação dos sumidouros de carbono mais importantes, como no caso das florestas. É a impermeabilização que apresenta mais problemas para o sequestro de carbono. Com efeito, se nos basearmos nas médias nacionais, o fato de desmatar um hectare para instalar um centro comercial, por exemplo, resulta numa perda de mais de 170 toneladas de Carbono (tC) inicialmente armazenados na floresta, ou mais de 600 t $CO_2$  (equivalente a cerca de 5.000 km por carro). A esta perda acrescenta-se a de um sumidouro anual de 5 t $CO_2$ , tanto carbono que não será sequestrado no futuro.

Por outro lado, a não impermeabilização do solo e o plantio de árvores permitem um restabelecimento rápido de uma área. Infelizmente, a criação de um estoque de carbono, equivalente ao de uma floresta madura, levará várias décadas. Atualmente vemos que a artificialização e, em particular, a impermeabilização dos solos, estão em constante progresso. Estima-se que vários milhões de hectares sejam artificializados no Brasil, incluindo áreas cobertas por edifícios ou betume. Todos os anos, essa artificialização progride no Brasil em pelo menos 70.000 ha, em detrimento dos solos agrícolas, arborizados e naturais.

As comunidades podem atuar a dois níveis. Em primeiro lugar, integrando esta questão no planejamento territorial através de documentos urbanísticos, mas também tornando estas orientações operacionais em projetos de desenvolvimento (por exemplo, minimizando superfícies impermeabilizadas).

Assim, durante o desenvolvimento do plano urbano local e desde a fase de diagnóstico do estado inicial do meio ambiente, é possível estabelecer um mapa dos estoques e sumidouros de carbono nos ecossistemas.

Este mapeamento permitirá identificar os espaços mais capazes de sequestrar mais carbono e aqueles que, se forem impermeabilizados, emitir mais CO<sub>2</sub>. Esses critérios são essenciais para identificar áreas a serem preservadas, como parte do projeto de planejamento e desenvolvimento sustentável.

Os regulamentos do plano de planejamento urbano local, podem definir o zoneamento de proteção e impor uma proporção mínima de superfícies não impermeáveis em projetos de desenvolvimento, por exemplo, através do biótopo e dos coeficientes de terreno aberto.

Preservar os estoques existentes antes de tentar reabastecê-los, faz parte da lógica da sequência ERC (Evitar-Reduzir-Compensar). Primeiro, evite impermeabilizar os solos, especialmente aqueles com maiores estoques de carbono. Quer protegendo-os, quer limitando a necessidade de novas construções, por exemplo reocupando habitações e instalações vagas. Em seguida, reduzir as superfícies impermeabilizadas, como as ligadas a novas construções, impondo proporções de superfícies com vegetação (Fig.19).



Figura 19. Área de condomínio com vegetação abundante.

(fonte: [https://img.freepik.com/fotos-premium/ilhas-de-calor-urbanas-sobrepostas-a-florestas-urbanas-enfatizam-a-necessidade-de-vegetacao-conceito-ilhas-de-temperatura-urbana-florestas-urbanas-espacos-verdes-planejamento-urbano-resiliencia-ao-calor\\_864588-156894.jpg](https://img.freepik.com/fotos-premium/ilhas-de-calor-urbanas-sobrepostas-a-florestas-urbanas-enfatizam-a-necessidade-de-vegetacao-conceito-ilhas-de-temperatura-urbana-florestas-urbanas-espacos-verdes-planejamento-urbano-resiliencia-ao-calor_864588-156894.jpg))

Por último, podemos considerar compensar ou mesmo ir mais longe, através da não impermeabilização e da revegetação, especialmente através do plantio de árvores. Esta lógica ERC é promovida pelo plano de biodiversidade, para a implementação do objetivo de Artificialização Líquida Zero (ALZ). Esta é uma oportunidade para implementar uma abordagem mais ecológica à gestão das águas pluviais, para limitar o escoamento. É também uma oportunidade para limitar as ilhas de calor no verão, aumentando a evapotranspiração das plantas. Esta lógica ERC promove a biodiversidade na cidade e, portanto, permite melhorar de forma geral o ambiente de vida.

A ideia não é nova, o sequestro deve ser integrado em abordagens mais globais destinadas a otimizar os numerosos cobenefícios ligados à natureza na cidade.

## **2.2. Como integrar as questões do sequestro de carbono nas estratégias urbanas?**

O sequestro de carbono, nas estratégias urbanas, exige a revisão dos métodos de trabalho e a garantia de que estes métodos sejam mais motivadores e produtivos, e que participem numa reflexão que vai desde o desenvolvimento de documentos de urbanização até todas as ações possíveis.

O documento de planejamento urbano existe para identificar, em última análise, todos os terrenos, todos os contextos e todos os métodos que darão uma oportunidade à instalação de sumidouros de carbono (Fig.20).



Figura 20. Planejamento urbano na promoção do desenvolvimento sustentável.  
(fonte: <https://www.arquiteta.com.br/blog/wp-content/uploads/2024/08/Planejamento-Urbano-04.jpg.webp>)

Isto vai, obviamente, desde a modificação da agricultura para a agrossilvicultura, até às questões de renaturalização dos espaços públicos da cidade, é todo um trabalho, inclusive em colaboração com os habitantes, que permite trabalhar no terreno a transformação de impermeáveis solo em solo permeável.

É verdade que os PLPU (Planos Locais de Planejamento Urbano) parecem ser o local mais adequado para abordar todas estas questões do sequestro de carbono e, claro, a questão da remediação que fornece soluções para os problemas do carbono. Mas não é só isso, ou seja, pode responder a problemas colaterais, responder à questão da evapotranspiração, do arrefecimento, do controlo da poluição atmosférica, da melhoria do conforto no verão através da sombra das árvores, mas também do abrandamento do escoamento da água, do risco de inundações, da estabilização de encostas, da limitação da erosão dos solos, do abrandamento da velocidade dos ventos, da criação de habitats de refúgio, auxiliares de cultivo, polinizadores e reservas de biodiversidade de fauna e flora.

Tudo isto constitui, em última análise, argumentos a favor de uma estratégia que vise não só o sequestro de carbono, mas também a possibilidade de envolver mais amplamente os moradores, através deste tema, em outras melhorias colaterais significativas.

É importante, para construirmos boas estratégias, conseguirmos elaborar, coletivamente, um diagnóstico com todos os moradores.

Este diagnóstico, tão partilhado quanto possível, que envolveria todos os componentes da sociedade civil, num diálogo simétrico, com especialistas técnicos que não estão nem abaixo nem acima, mas numa partilha. É uma oportunidade de partilhar os desafios das alterações climáticas com as populações. É uma questão de aculturação simétrica dos protagonistas.

Devemos ser capazes de auxiliar a associação dos moradores desde a construção do diagnóstico, fazendo com que eles acompanhem, participem na redação dos programas e regulamentos, para poder consultá-los sobre os projetos operacionais. Isto significa que devemos dotar-nos dos meios para um processo de produção de projetos a longo prazo, desde o início do projeto até à conclusão das operações baseadas na confiança.

Chegaremos a um acordo entre governantes eleitos, moradores, técnicos, gabinetes de design e especialistas, com uma melhor compreensão dos hábitos dos moradores e dos seus problemas. Não faremos a revolução ecológica se não envolvermos os moradores e se não compreendermos melhor quais são as suas reais preocupações, e quais têm sido os obstáculos sociais há vários anos. Devemos defender uma simplificação do panorama do sistema de contratos de estudo de apoio à decisão.

Também se sugere, tanto quanto possível, que as comunidades que queiram praticar a tomada de decisões de forma mais participativa com os moradores, saibam rodear-se de especialistas numa missão global que reúna todas as competências, a experiência que necessitamos num único contrato, talvez durante o mandato, no âmbito de um contrato que permita realizar a participação dos cidadãos sem delegá-la completamente. Mas, feito por esses especialistas, é necessário formular gradativamente um trabalho diagnóstico com as expectativas da população, portanto um contrato de assistência à decisão de longo prazo atribuído a uma equipe multidisciplinar.

Os paisagistas, os pedólogos, os engenheiros agrônomos, talvez os sociólogos, formando uma equipe unida dentro de um mesmo contrato, mobilizada no diálogo com a população, para avançar do diagnóstico à avaliação dos resultados, através da implementação do PUL (Plano de Urbanismo Local), escrevendo o PUL com a comunidade, a sua aprovação e posteriormente a sua gestão em todos os eventos que decorrerão ao longo da gestão do PUL. Também numa lógica de avaliação do trabalho dos especialistas, por um lado, mas também de avaliação do que foi dito, entendendo melhor o que deu errado. Assim, a ideia de desenvolver em conjunto estratégias que permitam

aos territórios avançarem para organizações mais virtuosas, parece ser o significado de um acordo-quadro que permita a estas equipes se desenvolverem de forma interativa e progressiva, num diálogo com todas as partes interessadas, trabalhando métodos que permitam mudar a situação e tornar o documento de planejamento urbano mais motivador.

Então, que interesse tem uma comunidade em dar este passo que consistiria em encontrar uma equipa, durante o mandato, para a ajudar a trabalhar na transformação ecológica do seu território com os habitantes? Se apenas pensarmos que o desafio é melhorar a criatividade dos documentos de planejamento urbano, o nível de ambição das comunidades num campo onde as comunidades não têm necessariamente uma experiência, um conhecimento preciso das questões, a capacidade de tornar o desafio número dois para as comunidades é garantir aceitabilidade muito elevada, por parte dos residentes, e melhor apropriação da estratégia do projeto.

A ideia é também pensar com a profissão de paisagista em particular, mas não apenas, em soluções que permitam melhorar significativamente o nível de serviço de todos os projetos: a renaturalização, através de um projeto paisagístico, sem gastar somas incriveis em termos de investimentos que temos absolutamente de conseguir limitar.

A incompreensão, a desconfiança, o recurso às populações devem estar associados, tanto quanto possível a estas estratégias, para que quando chegar a hora se sintam preparadas para mergulhar.

### **2.3. Armazenar carbono nos ecossistemas: Quais são as questões que envolvem o plantio de árvores?**

O plantio de árvores é um tema cada vez mais presente no debate sobre o combate às alterações climáticas. Certos trabalhos científicos, atualmente debatidos, estimam que a área florestal global poderia ser aumentada em 25% e sequestrar 25% do carbono atualmente contido na atmosfera (Fig.21). O grupo intergovernamental de especialistas em clima, IPCC, estima que a florestação de terras não florestadas, representa um potencial máximo de compensação global até 2050, equivalente a aproximadamente 10% das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> em 2019.

As políticas públicas mundial, através da estratégia a favor da biodiversidade, deveriam plantar pelo menos 3 bilhões de árvores até 2030. As comunidades deveriam se comprometerem com programas de plantio, como o plano *Árvore e Carbono Vivo* da região Sul da França, que propõe plantar 231 mil árvores por ano. A cidade de Paris

comprometeu-se, em 2014, a plantar 1% mais de árvores todos os anos até 2020, ou quase 20 mil árvores entre 2014 e 2020.



Figura 21. Plantio de árvores

(fonte: <https://diariodocomercio.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Muda-de-arvore-Credito-Adobe-Stock.jpg>)

Algumas empresas também tomam iniciativas a favor do plantio de árvores, doando parte dos seus lucros à plantação de árvores, através de programas de reflorestação.

Na verdade, as árvores e, de um modo mais geral, os ecossistemas terrestres, desempenham um papel importante na luta contra as alterações climáticas e na adaptação aos seus efeitos. A presença de árvores contribui para o sequestro de carbono, a preservação do solo e da biodiversidade, a produção de recursos renováveis e melhora a resiliência das cidades e dos sistemas agrícolas.

No Brasil existem diversas entidades e ONGs preocupadas com o reflorestamento de áreas degradadas. Entre elas temos a Associação de Preservação do Meio Ambiente e da Vida (Apremavi), com sede em Santa Catarina. Estima-se que a Apremavi tenha ajudado a plantar mais de 8,5 milhões de árvores nativas, recuperando ativamente uma região de Mata Atlântica severamente agredida. Tem-se o Projeto Onda Verde (POV), com sede no Rio de Janeiro e que tem mais de 2 milhões de mudas plantadas, o POV possui a meta de ajudar a recuperar a Mata Atlântica na região da Baixada Fluminense, local com perda significativa dos biomas originais. Outra instituição é o Instituto de Pesquisas Ecológicas (IPE), com sede em São Paulo. Esta ONG desenvolve diversos programas de educação ambiental e extensão agroecológica junto às comunidades vizinhas às áreas naturais. Atualmente o projeto está em expansão em número de hectares protegidos contra a ação destruidora humana. Temos ainda o SOS Amazônia, com sede no Amazonas

(Fig.22). O foco da SOS Amazônia é promover a conservação da biodiversidade do maior ecossistema do planeta, a Floresta Amazônica. Atuando em diferentes linhas, a SOS Amazônia é um dos projetos mais sólidos de proteção ambiental em prática no Brasil, com foco na proteção de habitats, resgate de animais em perigo e ampliação dos programas de reflorestamento.



Figura 22. Projeto SOS Amazonia

(fonte: [https://static.tildacdn.one/tild3135-6536-4335-a365-613632626563/Thumbnail\\_SOS.png](https://static.tildacdn.one/tild3135-6536-4335-a365-613632626563/Thumbnail_SOS.png))

Outro é o Instituto Terra que atua na região do Vale do Rio Doce, entre Minas Gerais e o Espírito Santo. É um projeto de recuperação ambiental com o desenvolvimento de mais de 2 milhões de mudas de árvores, utilizando mais de 290 espécies nativas da Mata Atlântica na recuperação de áreas degradadas, como a região entorno do vale do Rio Doce, bioma severamente atingido pelos vazamentos de barragens em Minas Gerais. Tem-se ainda a ONG TNC Brasil (The Nature Conservancy) que atua globalmente e possui diversos projetos de alta importância ambiental no Brasil. Hoje a TNC Brasil investe num dos maiores projetos conjuntos de reflorestamento do país. A meta é restaurar 1 bilhão de árvores em todo o Brasil até 2030, e contribuir para que o governo brasileiro atinja sua meta de mitigação às mudanças climáticas no Acordo de Paris. Outra ação que merece destaque é o programa de conservação da Mantiqueira, uma iniciativa que junta diversos colaboradores de 284 municípios da região sudeste, nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, para construir uma rede de restauração florestal.

Na França, as florestas, que crescem tanto em área como em volume, já são o principal sumidouro de carbono e a primeira fonte de energia renovável. Fora das florestas,

o plantio de árvores abrange uma diversidade de situações: florestação de terrenos agrícolas baldios, restauração de terras degradadas, desenvolvimento de sistemas agroflorestais em terras agrícolas, plantação de árvores em cidades etc.

Em todos os trabalhos prospectivos, se destaca a arborização com o intuito de atingir o objetivo da neutralidade carbônica e fazer a transição para emissões negativas até o final do século. No entanto, o plantio de árvores, não compensa todas as emissões dos cidadãos ou de um setor econômico. Ainda mais se incluirmos as emissões ligadas ao nosso consumo de produtos importados.

Considerando que plantar uma árvore em terras não florestadas permite, em média, sequestrar 0,3 tCO<sub>2</sub>, ou 10 kg CO<sub>2</sub> por ano, e sabendo que a pegada de carbono de uma pessoa é de aproximadamente 11,9 tCO<sub>2</sub>eq por ano, ou 357 tCO<sub>2</sub>eq ao longo de 30 anos, cada pessoa, para compensar 30 anos de emissões ligadas ao seu consumo, deveria plantar hoje cerca de 1.200 árvores, garantindo a sua boa gestão.

Com uma população de quase 216 milhões de brasileiros, a florestação de todas as áreas não florestadas do Brasil, não seria suficiente. Portanto, o plantio de árvores não deve ser utilizado como compensação para emissões que poderiam ter sido reduzidas ou evitadas, mas deve constituir um contributo adicional para a luta contra as alterações climáticas.

Além disso, após o plantio, os estoques de carbono aumentam gradualmente ao longo de várias décadas na biomassa, na madeira morta e nos solos, até atingirem um nível de equilíbrio. Preservar as reservas de carbono acumuladas é essencial para evitar a anulação dos benefícios para o clima. O sequestro de carbono é, portanto, limitado no tempo, enquanto a florestação deve ser sustentada.

Para ser benéfica, a plantação de árvores deve também respeitar as boas práticas, nomeadamente em termos de adaptação das espécies ao ambiente, e dos impactos na biodiversidade, no solo e nos recursos hídricos.

Mudanças futuras no clima, aumento da ocorrência de secas, aumento da intensidade dos incêndios, deve ser considerados desde o início, porque afetarão as árvores. Na cidade, os riscos dos alérgenos devem ser levados em consideração.

Em todos os casos, as ações de plantio de árvores devem ser geridas e monitorizadas ao longo do tempo, para garantir que as árvores atingem a maturidade.

É, portanto, importante contar com ferramentas de apoio à decisão e envolver especialistas e partes interessadas nos projetos, desde a sua concepção.

Se quisermos quantificar, comunicar ou mesmo avaliar financeiramente o carbono sequestrado, devemos comparar o impacto da ação com o de um cenário de referência, ou seja, com o cenário mais provável se a ação não tivesse ocorrido.

Esta é a abordagem utilizada nas metodologias de certificação de redução de emissões e sequestro de carbono, em escala de projeto. Como aqueles desenvolvidos pelo ministério responsável pela ecologia, como parte do Selo de Baixo Carbono (SBC).

## **2.4. Que ferramentas podemos utilizar para melhor integrar o sequestro de carbono nos projetos de desenvolvimento urbano?**

Nos últimos anos, o tema de descarbonização de edificações e cidades tem tido grande destaque no âmbito internacional e nacional. Entre os diferentes impulsionadores, se destaca o poder público, através de seus ministérios, como o Ministério de Minas e Energia (MME), o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Ministério das Cidades (MCID) e Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) que possuem diferentes políticas, programas e legislações. Instituições financeiras de desenvolvimento, como o Banco Mundial e o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), e organismos internacionais, como as Nações Unidas (ONU), também têm sido atores-chave para alavancar parte dos recursos necessários para possibilitar a redução das emissões de carbono, que precisam ser cada vez mais urgentes.

No centro desse processo existe toda a cadeia produtiva da indústria de construção, formada principalmente por fabricantes de materiais, projetistas, construtores, incorporadores, universidades/centros de pesquisa, centros de inovação, entre outros (Caldas, 2024)(Fig.23).

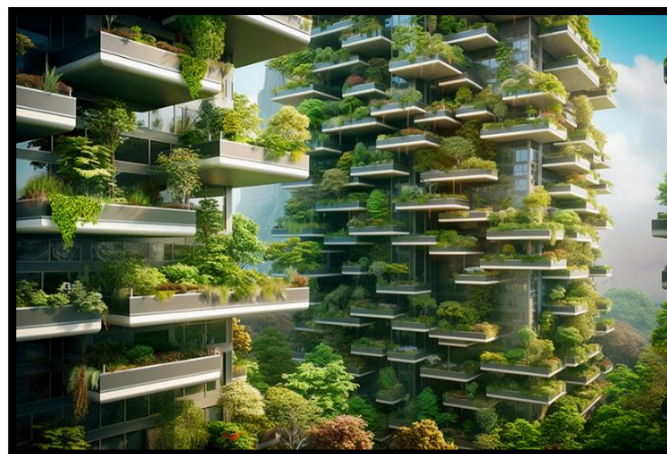


Figura 23. Arquitetura sustentável no sequestro de carbono.  
(fonte: <https://kleng.com.br/wp-content/uploads/2024/01/ARQUITETURA-SUSTENTAVEL.png>)

Para conseguirmos reduzir a pegada de carbono das construções, o primeiro passo é medir, e é imprescindível que essa medição seja feita de forma adequada e confiável. Em vários países e cidades já se discute a regulamentação de carbono para projetos de edificações, ou seja, estabelecer um valor limite, em “kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>” ou “kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.ano” de um dado projeto.

Não se tem aqui o objetivo de apontar qual ferramenta é certa ou errada, mas sim, quais os parâmetros e informações que devem ser observados durante a escolha, considerando principalmente o contexto brasileiro de aplicação.

Segundo Caldas (2024), temos algumas perguntas gerais que podem mostrar se a ferramenta que você escolheu é confiável:

- É baseada em sistemas normatizados (ex. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, ISO etc.)?
- Utiliza como dados de entrada e fatores de carbono oriundos de bancos de dados nacionais ou adaptados à realidade nacional?
- Apresenta de forma transparente os dados e a metodologia utilizada?
- A ferramenta foi especialmente desenvolvida para o setor da construção civil?
- É atualizada ou revisada de forma frequente, sempre em busca de uma melhoria contínua?
- Tem no seu comitê gestor/executor especialistas da área (com experiência comprovada), principalmente pesquisadores e acadêmicos?
- Os responsáveis destas ferramentas estão abertos para dialogar e ouvir os usuários, incorporando sugestões de melhorias?
- Recebe algum apoio institucional, como por exemplo algum órgão governamental (ex. MME, MCID, MCTI etc.)?
- Você sabia que os elementos (estrutura, vedações e revestimentos) que são os mais consumidos em massa de um edifício tendem a ser os mais impactantes?
- Qual o tipo de cimento que você vai escolher? O cimento CP V-ARI pode chegar a emitir 0,99kgCO<sub>2</sub>/kg, enquanto o cimento CPIII chega a 0,68 kgCO<sub>2</sub>/kg.
- O concreto tende a ser um dos materiais mais impactantes nas edificações brasileiras, devido a seu elevado consumo. Um concreto

dosado em central com fck de 20 MPa pode emitir em torno de 283,5kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, enquanto um concreto com fck de 40 MPa emite 395,5 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, uma diferença de quase 40% maior, que no final dos cálculos de um edifício será bastante considerável.

- O aço é outro material muito impactante no ciclo de vida de um edifício, devido ao seu elevado consumo. No entanto, existe uma diferença se for um aço proveniente de uma usina a alto forno e carvão mineral em relação a usinas de fornos elétricos, que usam sucata de aço como matéria-prima. A primeira rota tecnológica leva a uma emissão de carbono maior, e, portanto deve ser evitada.
- O alumínio é um material que emite muito carbono devido ao elevado consumo de energia na sua produção. Mas este valor pode ser ainda maior se for utilizado um banco de dados internacional. No Brasil, este valor fica em torno de 4 kgCO<sub>2</sub>eq/kg de alumínio, enquanto na média mundial esse valor vai para 10 kgCO<sub>2</sub>eq/kg, segundo estudo realizado pela Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), para a cadeia de valor do alumínio.
- Vai utilizar madeira em seu projeto? Verifique se na ferramenta está sendo diferenciado o tipo de madeira (ex. nativa x plantada).
- A eletricidade produzida no Brasil é muito diferente de muitos outros países, devido principalmente à grande participação de fontes renováveis (chegando a mais de 90%) em sua composição. Em 2021, as emissões na produção de energia elétrica do Brasil foram de 81,7 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh, enquanto a China foi de 691,1 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh, uma diferença oito vezes maior. Desta forma, é essencial ficar claro na metodologia/ferramenta qual eletricidade que está sendo considerada.
- O transporte no Brasil de materiais de construção é majoritariamente via modal rodoviário e, muitas vezes, longas distâncias precisam ser percorridas entre o local de fabricação do material e sua aplicação. Em ferramentas internacionais, principalmente europeias, podem estar sendo considerados outros modais, como o ferroviário e hidroviário, bastante diferentes do rodoviário.

- Edificações com características específicas, como fachadas de vidro e tipologias de escritório e/ou comerciais, podem resultar em pontos focais de carbono diferentes do concreto armado, como o próprio vidro, alumínio e algumas vezes instalações técnicas, como dutos para ar-condicionado, fiação e cabeamento. Desta forma, deve-se ter um bom entendimento de como é o seu projeto!

Por isto, dependendo do motivo e objetivo que se quer com um estudo sobre emissões de carbono, é interessante a empresa/instituição desenvolver uma ferramenta própria para sua mensuração, baseada em dados e metodologias já validadas (Caldas, 2024).

Foram introduzidos 2 eixos essenciais nos quadros regulamentares do planejamento urbano, que são:

- O Regime de Coerência Territorial (RCT).
- O Plano Urbano Local, seja municipal (PUL) ou intermunicipal (PULI)

Estes são:

- Acabar com a expansão urbana e residencial em terras agrícolas e naturais, hoje reforçada pelo objetivo governamental de “Artificialização Líquida Zero” (ALZ).
- Adensar áreas já urbanizadas, reconverter terrenos baldios urbanos, revitalizar os centros das cidades, preservando a qualidade de vida, a saúde, especialmente durante as ondas de calor, preservando recursos como a água e a biodiversidade nos espaços urbanos etc.

As escolhas de localização das edificações, forma urbana, alteração do uso do solo, organização da mobilidade, desenvolvimento de energias renováveis ou de recuperação, têm um impacto considerável e a longo prazo no consumo de energia e nas emissões GEE.

É por isso que desde 2010, foi lançado o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão que permite avaliar as emissões de GEE em diferentes cenários de desenvolvimento para todas as escalas de projeto, desde o grande território (RCT), por exemplo metropolitano, projetos urbanos ou mesmo intercomunitários (PUL/PULI) e operações de desenvolvimento. Esta ferramenta apoia a reflexão da comunidade e dos seus operadores durante o desenvolvimento do seu projeto, comparando diferentes cenários de desenvolvimento nas áreas do consumo de energia e das emissões de GEE.

Desde julho de 2020, as comunidades e os seus serviços técnicos dispõem de uma única ferramenta web GES URBA, para todos os documentos urbanísticos (RCT, PULI e PUL).

Se necessário, para zonas rurais e zonas com grandes desafios florestais, pode-se refinar os resultados sobre o sequestro de carbono, utilizando a ferramenta ALDO desenvolvida pela ADEME;

Se a escolha do layout for determinada, resta implementá-lo, particularmente nas zonas urbanas: densificar, reduzir a impermeabilização dos solos, arrefecer os espaços urbanos e promover o sequestro de carbono. Todos sabemos hoje que as plantas são essenciais em todos os lugares, mas com moderação e sabedoria.

É por isso que uma ferramenta ARBOClimat (disponível em site aberto) foi desenvolvida pela região de Hauts de France e pela gestão regional da ADEME, a qual permite realizar simulações prospectivas de plantação de árvores nas cidades e avaliar os impactos de acordo com vários indicadores, como a capacidade de armazenamento de carbono, o interesse pela biodiversidade, o impacto na qualidade do ar ou o potencial alergênico.

### **III. MANEJO FLORESTAL E USO DA MADEIRA**

#### **3.1 . Mitigação e adaptação das florestas às alterações climáticas**

Qual é a relação entre adaptação e mitigação? Podemos considerar que a adaptação é um meio de manter um elevado nível de mitigação pelas florestas.

A ligação entre adaptação e mitigação das alterações climáticas não é sistemática e requer certas precauções, dependendo dos níveis de vulnerabilidade atuais e esperados.

Podemos simultaneamente sequestrar carbono, preservar a biodiversidade e melhorar a resiliência às alterações climáticas nas florestas? Resiliência é a capacidade de um ecossistema se curar após uma perturbação.

A adaptação corresponde ao processo de ajustamento ao clima atual ou esperado, bem como às suas consequências, de forma a moderar ou evitar efeitos nocivos. Este ajustamento permite ao ecossistema superar as perturbações ligadas às alterações climáticas, seja tornando-o insensível, porque é resistente, ou melhorando a sua capacidade de cura, com espécies diversificadas, solos em boas condições, silvicultura menos perturbadora, biodiversidade rica etc.

Para isso, os compartimentos do ecossistema devem estar em boas condições: solo, biodiversidade, espécies saudáveis e com boa vitalidade.

Melhorar a resiliência das florestas significa, portanto, adaptar as populações às alterações climáticas e limitar os seus impactos negativos, em particular a redução do sequestro de carbono pelas florestas. Assim, se as secas causarem défices hídricos generalizados, tanto o crescimento das árvores como o sequestro de carbono serão reduzidos.

A Floresta Amazônica, frequentemente chamada de "pulmão do mundo", desempenha um papel crucial na regulação do clima global, absorvendo e armazenando grandes quantidades de carbono. Esse processo de sequestro de carbono é fundamental para mitigar os impactos das mudanças climáticas, tornando a manutenção da floresta vital para o planeta.

Segundo Feldpausch *et al.* (2016), ao investigarem o impacto das secas no crescimento das árvores e no armazenamento de carbono por toda a bacia do Amazonas, descobriram que a seca de 2010, que atingiu toda a bacia amazônica, afetou significativamente o armazenamento de carbono no local, matando muitas árvores e desacelerando o crescimento daquelas que sobreviveram (Fig.24). Antes desta seca a floresta Amazônica havia ganhado biomassa, mas a seca de 2010 parou por completo o funcionamento do sequestro de biomassa para a bacia. Os estudos apontam que a atual seca, em conjunto com as futuras fortes secas, pode causar efeitos similares.



Figura 24. Fortes secas podem atrasar o crescimento de árvores podendo até matá-las.  
(fonte: <https://imgs.mongabay.com/wp-content/uploads/sites/20/2016/07/01195748/Extreme-drought-can-stall-tree-growth-and-cause-tree-death-Photo-by-Rhett-A.-Butler.jpg>)

Para agir, o diagnóstico é um pré-requisito essencial. Permite escolher espécies e silvicultura que serão adaptadas às condições futuras: déficit hídrico de verão, altas temperaturas, hidromorfismo de inverno etc.

A incerteza quanto ao futuro deve também encorajar os silvicultores a diversificarem as suas escolhas silviculturais e a promoverem a resiliência dos ecossistemas, por exemplo, promovendo a proteção da qualidade do solo, dos povoamentos espalhados por vários estratos, uma diversidade de espécies e dentro das próprias espécies, escolhendo diferentes características genéticas e origens. Essa diversificação é favorável à biodiversidade, pois proporciona habitats variados. O bom estado das florestas é uma garantia de um bom crescimento das árvores e, portanto, do sequestro de carbono.

Que gestão é possível articular essas questões? Quais pontos devem ser observados?

Pode haver situações diferentes, que exigem respostas diferentes. No caso em que as florestas são compostas por espécies que não estão ameaçadas a médio e longo prazo, e em que as silviculturas praticadas permitem uma certa flexibilidade, é possível permitir que as florestas envelheçam, sem risco de emissões de carbono através de mortalidade precoce.

Nos casos em que a espécie não será mais adequada, devido a um déficit hídrico recorrente, por exemplo, é necessário modificar a silvicultura, a fim de reduzir a demanda hídrica, reduzindo a densidade das árvores, e resultar em suportes mais leves.

Finalmente, se as espécies já não forem adequadas, como as coníferas nas planícies, é necessária a substituição das espécies. A escolha das espécies pode ser baseada nas origens genéticas da mesma espécie ou de outra espécie.

Nos dois últimos, será necessário colher mais madeira, seja para reduzir a densidade de árvores, seja para substituir espécies. No curto prazo, haverá portanto um período de desestocagem de carbono durante alguns anos, o que é chamado de “dívida de carbono”. No entanto, a médio e longo prazo, estas ações promoverão um melhor crescimento das árvores e a reconstituição de populações maiores do que numa situação de mortalidade massiva, associada às alterações climáticas.

Além disso, não devemos negligenciar o efeito positivo da utilização da madeira, em substituição de produtos que emitem GEE. A quantificação do efeito de substituição pode ser melhorada através de esforços de investigação.

Durante a renovação das populações e a escolha das espécies, deve ser dada especial atenção à diversidade das espécies, mas também aos impactos no solo, de forma a otimizar a sua fertilidade e garantir o bom estado do ecossistema.

Finalmente, as florestas e a silvicultura estão no centro dos debates sociais através do seu impacto nas paisagens, com os seus métodos de colheita de madeira. Os cidadãos querem ser envolvidos nas escolhas de gestão dos proprietários florestais, sejam eles privados ou públicos. Os silvicultores devem prestar especial atenção ao diálogo e condições de implementação das diretrizes silviculturais, para evitar a radicalização de posições.

Como adaptar as diretrizes de manejo ao seu território? Que recursos devem ser mobilizados (atores, conhecimentos, abordagens/ferramentas etc.)?

Vários países europeus e em especial a França, têm a sorte de terem uma grande variedade de estações florestais e condições pedoclimáticas. Cada ambiente tem sua especificidade e por isso requer um diagnóstico do seu futuro.

A Rede Tecnológica Mista “Adaptação das Florestas às Alterações Climáticas” (AFORCE) tem contribuído para o desenvolvimento de ferramentas de diagnóstico de campo, para orientar a escolha das espécies, com a evolução das suas áreas de distribuição à escala regional, mas também para avaliar a sua vulnerabilidade à morte, dependendo da estação.

Estas diretrizes silviculturais serão em breve validadas nas regiões com a adoção de Planos Regionais de Gestão Silvicultura (PRGS) em florestas privadas. Os PRGS servem de enquadramento para a elaboração de planos de gestão simples, para a sua aprovação ou recusa pelo Centro Regional de Propriedade Florestal (CRPF). Os planos regionais descrevem, para uma região florestal, as principais categorias de povoamentos florestais, com seus tratamentos recomendados ou silvicultura e definem as espécies autorizadas para aprovação de Planos de Manejo Simples (PMS). Estes PRGS mencionam os diâmetros mínimos exploráveis das árvores colhidas, mas também as espécies proibidas ou a silvicultura, considerada insustentável, especialmente tendo em conta as alterações climáticas.

Conciliar adaptação e mitigação não é trivial; deve ser feito um diagnóstico para cada situação, para poder propor a solução mais eficaz.

A mitigação das alterações climáticas deve ser um grande objetivo da adaptação, na medida em que garante também o abastecimento do setor e a produção de serviços ecossistêmicos, incluindo a preservação da biodiversidade.

## **3.2. Como integrar melhor a floresta nas estratégias das autoridades locais para combater as alterações climáticas.**

Uma Federação Nacional das Comunidades Florestais deveria ser criada pelo governo, a qual representaria os municípios proprietários de florestas e, de forma mais ampla, as comunidades envolvidas na gestão sustentável e no desenvolvimento de florestas e produtos de madeira.

O Brasil possui a Comissão Nacional de Florestas (Conaflor), criada pelo Decreto nº 3.420, de 20 de abril de 2000. Esta comissão possui caráter consultivo e é composta por setenta e seis membros, os quais são provenientes de entes do governo federal, estadual, distrital e municipal; de indústrias, de empresas, de sindicatos, de associações estudantis, de confederações de trabalhadores, de entidades indígenas e de ONGs. A Conaflor possui atribuições estreitamente ligadas aos objetivos do Plano Nacional de Florestas (PNF), as quais são:

- propor recomendações ao planejamento das ações do PNF;
- propor medidas de articulação entre programas, projetos e atividades de implementação dos objetivos do PNF, bem como promover a integração de políticas setoriais;
- propor, apoiar e acompanhar a execução dos objetivos previstos no PNF e identificar demandas e fontes de recursos financeiros;
- sugerir critérios gerais de seleção de projetos no âmbito do PNF, relacionados à proteção e ao uso sustentável das florestas.

Os trabalhos florestais têm sido consistentes, desde o início, com o respeito pela gestão florestal sustentável e multifuncional, pelos princípios dos curtos-circuitos e por uma política florestal territorial, uma visão da área florestal como todo o desenvolvimento local.

### **3.2.1. Agir como proprietário da floresta.**

Como proprietários florestais, os municípios podem desempenhar um papel direto na manutenção e no desenvolvimento do sequestro de carbono nas florestas. Assim, os municípios florestais decidem os rumos do manejo de suas florestas. As florestas comunais, assim como as florestas públicas, farão parte do regime florestal, garantindo, durante anos, práticas de gestão sustentáveis e multifuncionais.

Através das suas competências e gestão do território, podem também promover ações de reestruturação de terrenos florestais, de forma a integrar lotes abandonados ou

mal geridos (propriedades devolutas sem proprietários, propriedades não demarcadas etc.). Esta reestruturação fundiária contribui para o combate à artificialização do solo (estas parcelas serão tidas em conta nos planos urbanos e o seu estatuto de “floresta” será perpetuado), e permitirá posteriormente garantir uma gestão sustentável das florestas no trabalho dos órgãos responsáveis, para aplicação do regime florestal. Na verdade, proteger a superfície florestal e garantir a sua gestão sustentável, são as primeiras alavancas a serem ativadas.

Para além deste papel de decisores florestais, as comunidades podem realizar ações de comunicação e sensibilização do público em geral, a fim de promover a compreensão dos mecanismos de gestão florestal sustentável e dos seus efeitos virtuosos na preservação da biodiversidade e no combate às alterações climáticas.

### **3.2.2. Atuar como um prescritor público**

Os membros eleitos e as comunidades também têm um papel de prescrição. Ao favorecerem a utilização de madeira local na construção pública, promovem um compromisso ambiental e social, movido pela vontade de fazer da contratação pública uma alavanca de revitalização do seu território.

Além de participarem no desenvolvimento local da economia, estes critérios promovem a transformação da madeira para usos de longa duração e complementam o efeito do sequestro de carbono na floresta.

Para as comunidades que não possuem florestas, existem outras soluções para a integração da madeira local em projetos públicos, especificamente a utilização de marcas de certificação nas especificações de encargos em concorrências públicas.

### **3.2.3. Construir e liderar uma estratégia territorial**

Para além das abordagens setoriais, os efeitos positivos do setor florestal e da madeira, a favor do sequestro de carbono, serão ainda mais eficazes quando considerados no âmbito de uma estratégia territorial global. A definição de uma visão comum para a floresta e o seu setor, por parte de todos os autores envolvidos, permitirá assim considerar melhor a complementaridade e articulação das ações de desenvolvimento propostas, e combinar efeitos virtuosos para o ambiente.

As Cartas Florestais Territoriais (CFT) são ferramentas incluídas no planeamento e desenvolvimento sustentável dos territórios rurais, permitindo a integração das questões florestais no ambiente económico, ecológico, social e cultural (Fig.25). A execução de uma

carta permite assegurar a consulta de todos os intervenientes do setor florestal e madeireiro, para a coconstrução de uma verdadeira política florestal territorial. Permite abordar a questão do sequestro de carbono de forma integrada, desde a gestão florestal até à utilização da madeira.

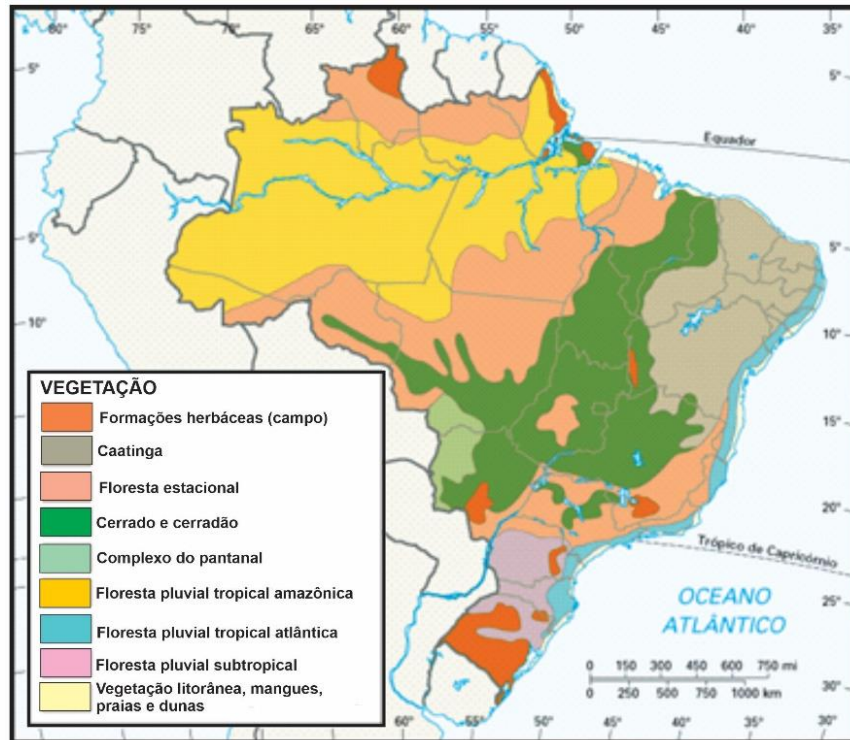


Figura 25. Mapa da cobertura vegetal do Brasil e sua classificação.  
(modificado: <https://pensamentoverde.com.br/wp-content/uploads/2013/03/mapa-vegetacao-brasil.gif>)

## IV. AGRICULTURA: O CAMPO DAS POSSIBILIDADES

### 4.1. Agricultura de conservação, agricultura biológica e metanização, quais os efeitos nas reservas de carbono?

As práticas agrícolas e os sistemas de cultivo podem aumentar as reservas de carbono no solo através de duas alavancas: a primeira aumentando o sequestro de carbono (captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>) e a segunda através da redução da sua oxidação (liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera). As práticas e os sistemas também podem aumentar ou reduzir as emissões de N<sub>2</sub>O e, portanto, o equilíbrio de GEE.

Três práticas/sistemas de cultivo merecem atenção devido estarem relacionados com a agroecologia e são identificados em várias previsões e na estratégia de baixo carbono. Estes incluem a agricultura de conservação do solo, a agricultura biológica e setores que incluem a metanização.

#### 4.1.1. Agricultura de conservação do solo, armazenamento de C e equilíbrio de GEE.

A agricultura de conservação é definida por três princípios: perturbação mínima do solo, ou seja, redução ou eliminação da aragem, manutenção da cobertura permanente do solo, cobertura morta ou plantas vivas, e diversificação das rotações.

Vejamos a grade de análise: entradas e saídas de carbono: a eliminação da aragem tende a reduzir a velocidade de mineralização da matéria orgânica. O efeito que isto tem sobre os estoques de C é, de fato, muito variável, dependendo do clima e menos significativo do que pensávamos há dez anos. Contudo, a presença de cobertura morta e plantas de cobertura, reduz a erosão e, portanto, preserva os estoques de carbono (Fig.26). Finalmente, quando são plantadas plantas de cobertura, isso aumenta a entrada de C no solo e se observa um aumento nos estoques de carbono. A agricultura de conservação (com os seus três princípios) tem, portanto, frequentemente efeitos positivos nas reservas de carbono do solo.



Figura 26. Agricultura de conservação do solo.

(fonte: <https://cptstatic.s3.amazonaws.com/imagens/enviadas/materias/materia26979/conservacao-do-solo-cpt.jpeg>)

No entanto, a presença de cobertura morta na superfície do solo e a porosidade por vezes mais baixa dos solos de plantio direto, incentivam as emissões de  $N_2O$ . Isto pode neutralizar, pelo menos parcialmente, o armazenamento de carbono. Uma avaliação completa dos GEE também deve incluir a redução no consumo de combustível (fóssil C) que caracteriza a agricultura de conservação. Mesmo que o efeito do plantio direto sobre os estoques de carbono seja baixo ou até nulo, esta forma de agricultura é interessante em termos de equilíbrio de GEE e preservação do solo, desde que o consumo de produtos fitossanitários seja reduzido.

#### 4.1.2. Agricultura orgânica, armazenamento de C e equilíbrio de GEE.

Tal como na agricultura de conservação, observa-se na literatura uma variabilidade muito grande no efeito sobre os estoques de carbono orgânico no solo. Voltemos à análise de entrada-saída. Dado que os rendimentos são equivalentes ou inferiores aos da agricultura convencional, as contribuições de carbono para o solo serão equivalentes ou inferiores. Por outro lado, na agricultura biológica a fertilização é orgânica: o agricultor adiciona quantidades significativas de estrume e composto ao solo, o que terá o efeito de aumentar os estoques de carbono nas parcelas fertilizadas (Fig.27). Porém, devemos pensar na escala da fazenda, ou mesmo do território: de onde vêm os fertilizantes orgânicos fornecidos?



Figura 27. Agricultura orgânica com equilíbrio ambiental, econômico e social.  
(fonte: <https://homeopatiabrasil.com.br/wp-content/uploads/2020/03/homeopatia7-1024x683.jpg>)

Os trabalhos mostram que as explorações agrícolas biológicas concentram a matéria orgânica fertilizante produzida num território mais vasto: na escala deste território não há aumento nas contribuições de matéria orgânica para o solo, elas estão simplesmente concentradas numa parte da superfície. Além disso, na agricultura biológica, as operações de mobilização do solo são frequentes. A velocidade de mineralização da matéria orgânica é, portanto, mantida a priori. Assim, em última análise, a agricultura biológica não é particularmente favorável ao armazenamento de carbono nos solos. No entanto, em determinadas situações, observa-se que os estoques de C se mantêm ou aumentam, enquanto os rendimentos diminuem: existem efeitos devidos às diferentes comunidades de organismos do solo, à frequência das leguminosas nas rotações. Isso

ainda precisa ser explorado. Agora, o equilíbrio de GEE: a ausência de fertilização com azoto mineral é inteiramente benéfica para o equilíbrio de GEE da agricultura biológica, devido haver menos emissões de N<sub>2</sub>O, mas também porque, a montante, consumimos menos C fóssil para fazer fertilizantes de azoto mineral.

#### **4.1.3. Digestão anaeróbica, armazenamento de C e equilíbrio de GEE.**

Durante a metanização, parte do carbono da biomassa inicial (resíduos de colheitas, efluentes pecuários etc.) não retornará ao solo, uma vez que se transformou em metano. No entanto, os digeridos de metanização são menos decompostos do que os resíduos de culturas ou efluentes de gado. Uma grande fração do seu carbono persistirá no solo. Então, qual é a avaliação comparativa entre um setor que devolve resíduos de culturas ou efluentes pecuários ao solo versus devolver o que resta após a metanização? Bem, há uma grande falta de dados sobre esse assunto. O único estudo conhecido não mostra resultados: o armazenamento de C no solo é o mesmo, quer adicionando-se resíduos de culturas ou efluentes de gado ou seus digeridos, após a metanização. Mas um único estudo não é suficiente: precisamos realmente não só estabelecer o balanço de carbono, mas também de nitrogênio e de fósforo, dependendo se incorporarmos ao solo mais ou menos biomassa transformada: compostagem, metanização. E é à escala dos setores que devemos estabelecer o equilíbrio de GEE: certamente emitimos metano, mas este é utilizado para produzir energia e há portanto substituição de carbono fóssil.

As práticas agrícolas e os sistemas de cultivo podem levar ao armazenamento ou libertação de carbono do solo, afetando a quantidade de biomassa de carbono que chega ao solo, bem como as taxas de mineralização da matéria orgânica.

É à escala da parcela agrícola que medimos o armazenamento de carbono, mas é à escala dos setores (transformação da biomassa) e à escala dos territórios que devemos fazer uma avaliação de carbono e uma avaliação de GEE.

## **4.2. Apresentação do método ABC'Terre e a abordagem participativa para serviço territorial.**

O que exatamente é ABC'Terre?

Este é um método espacial, desenvolvido na França, que permite quantificar os impactos das práticas agrícolas nas variações dos estoques de carbono, a longo prazo, e

integrar essas variações dos estoques numa avaliação dos GEE dos sistemas de cultivo de um território.

Como funciona esse método?

Este é composto por 5 etapas: A primeira consiste em reconstituir o conjunto de rotações por tipo de solo e por tipo de uso do solo. Para isso é utilizada a ferramenta RPG-Explorer (criada pela UMR INRAE AgroParisTech SADAPT). Esta permite cruzar, espacialmente, dados do Registro Gráfico de Parcelas e tipos de solo, através das Referências Pedológicas Regionais (à escala de 1:250.000).

A segunda etapa consiste em atribuir a cada tipo de solo do Referencial Pedológico Regional, o seu conteúdo de C orgânico específico. Estes conteúdos de C orgânico provêm de análises realizadas no território e listadas na Base de Dados de Análise de Terras, gerida pela unidade de serviço INRAE Infosol. Esta atribuição de conteúdos de C orgânico aos tipos de solo, é possível graças ao método de alocação desenvolvido no âmbito do projeto ABC'Terre-2A pela InfoSol, baseado em classes de argila e calcário.

A terceira etapa permite reconstruir as práticas culturais para cada combinação, “rotação por tipo de solo e por tipo de exploração”, através de regras de decisão precisas mas facilmente configuráveis, através de um arquivo, listando todos os dados em formato Excel.

Uma vez coletados os dados de entrada, após a implementação dessas 3 primeiras etapas, o arquivo de coleta de dados é importado para a interface de cálculo do ABC'Terre. É então possível alimentar a ferramenta Simeos-AMG, versão Large Numbers, para simular a evolução dos estoques de C orgânico, a longo prazo, na camada superficial dos solos agrícolas da região.

Finalmente, o cálculo do balanço de GEE dos sistemas de cultivo é realizado usando (1) dados coletados durante as 3 primeiras etapas, (2) variações nos estoques de C calculadas usando Simeos-AMG Large Number, e (3) de um banco de dados de referência (principalmente fatores de emissão IPCC e AgriBalyse), reconstituído para construir um método para calcular o balanço de GEE de sistemas de cultivo específicos para ABC'Terre e fornecer os resultados esperados em diferentes escalas.

### **4.3. Apresentação da abordagem participativa ABC'Terre.**

Concluída a implementação das 5 etapas do método ABC'Terre, os membros agrícolas da região são mobilizados para participar na interpretação dos resultados e

destacar as práticas culturais que podem ser modificadas para armazenar mais C nos solos e emitir menos GEE.

O primeiro passo consiste, portanto, em realizar o diagnóstico inicial do território. Após uma fase de caracterização detalhada do território, é possível interpretar as alterações, a longo prazo, nos estoques de C, bem como nas emissões de GEE provenientes dos sistemas de cultivo do território. Os resultados podem ser apresentados em forma de gráficos como é o caso para descrever, por exemplo, emissões de GEE.

Também podem ser mapeados, sendo essa uma das grandes vantagens do método ABC'Terre, principalmente para a comunicação com os intervenientes locais. Assim, o mapeamento que ilustra as variações de longo prazo dos estoques de C no território, pode ser comparado ao mapeamento dos estoques iniciais; o mapeamento que localiza as emissões de GEE dos sistemas de cultivo pode ser colocado em paralelo com o mapeamento que representa as emissões compensadas pelo armazenamento de C ou induzidas pela desestocagem de C. O desafio do diagnóstico inicial é localizar os sistemas de produção, tipos de solo e locais práticas para interpretar esses resultados, identificar fontes de emissões e destacar áreas com alto potencial de armazenamento de C ou áreas onde o desafio será estabilizar estoques, por exemplo.

Os intervenientes agrícolas da região são então convidados a participar na interpretação deste diagnóstico inicial. Para isso, são mobilizados em forma de oficinas participativas. Estas oficinas podem assumir a forma de formação, na gestão da matéria orgânica ou na multifuncionalidade dos grupos consorciados, por exemplo; na forma de trabalho prático em torno de ferramentas de apoio à decisão, como o Simeos-AMG; sob a forma de um workshop de mapeamento participativo onde os participantes representam as características, questões e oportunidades do seu território num mapa em branco; ou na forma de oficinas de codesign que trabalham em torno de um tabuleiro de jogo sobre alguns sistemas culturais representativos do território, por exemplo.

Cenários para modificações nas práticas culturais deverão ser propostos no final destas oficinas. A sua simulação permite evidenciar cenários alternativos que vão ao encontro dos desafios e objetivos do território em termos de armazenamento de C e GEE. Estas simulações também fornecem uma visão geral do impacto de determinadas práticas nestes temas de armazenamento de C e emissões de GEE, a fim de alimentar as reflexões do grupo. Estes cenários dizem respeito, principalmente, a mudanças nas práticas culturais, como a otimização da gestão da cobertura consorciada, a restituição da palha ou a adição de resíduos orgânicos ou mesmo a redução da dose mineral fornecida. Estes

cenários de modificação também podem ajudar a responder às perguntas dos agricultores relativamente aos projetos territoriais e aos seus potenciais impactos no armazenamento de C a longo prazo ou nas emissões de GEE: por exemplo, cenários que simulam o desenvolvimento da produção de biomassa de C para os setores de metanização ou de construção de palha. Também é possível simular pequenas alterações na rotação de culturas, por exemplo, aumentando as áreas plantadas com leguminosas.

Uma vez estabelecidos os cenários de mudanças nas práticas agrícolas com as partes interessadas e depois simulados com ABC'Terre, eles são comparados entre si para analisar o impacto dessas mudanças na evolução dos estoques de C e nas emissões de GEE dos sistemas de cultivo, o território. Aqui, por exemplo, comparamos o diagnóstico inicial, ligeiramente despovoamento, com um cenário alternativo onde otimizamos a gestão da cobertura consorciada, trabalhando nas datas de sementeira e destruição, nas quantidades de biomassa produzida, no tipo de cobertura instalada de acordo com o tipo de solo da área. Passamos assim de uma variação negativa nos estoques de C orgânico no solo para uma variação positiva, compensando cerca de 7500 tCO<sub>2</sub>eq/ano em todo o território, através da simples implementação deste cenário alternativo.

Os resultados são então discutidos com as partes interessadas envolvidas, novamente num workshop, a fim de determinar os cenários mais relevantes a implementar para construir um plano de ação que possa então alimentar o projeto.

#### **4.4. Que ações as comunidades podem tomar para apoiar o sequestro de carbono na agricultura**

##### **4.4.1. O que está em jogo para as comunidades?**

A agricultura representa grandes desafios para as zonas rurais, por razões econômicas, sociais e ambientais.

No domínio econômico, a agricultura e os seus setores ocupam mais de 10% dos empregos em muitos países do mundo. Preservar um setor agrícola dinâmico é, portanto, essencial para manter as atividades econômicas nos setores agroalimentar e alimentar, sendo também uma questão importante por razões sociais. O mundo agrícola é um importante ator histórico na vida das zonas rurais. No entanto, o atual período de crise sanitária, que destaca a importância da autonomia alimentar territorial, mostra como o mundo agrícola desempenha um papel essencial na resiliência dos nossos sistemas alimentares.

É um setor importante também por razões ambientais. Todas as análises prospectivas mostram o papel essencial da agricultura na transição ecológica do país e de cada território. A orientação dos sistemas agrícolas é essencial para a preservação da qualidade do solo, da água, da qualidade do ar, da biodiversidade, ou mesmo para o combate às alterações climáticas. Nas zonas rurais, as análises mostram que a participação da agricultura pode representar 40 a 50% das emissões de GEE do território, com um potencial muito amplo de soluções em sequestro de carbono, produção de bioenergias alternativas aos recursos fósseis e, muito simplesmente, a redução das emissões de GEE.

#### **4.4.2. Quais são os principais obstáculos e alavancas à evolução das práticas agrícolas?**

Na agricultura, a redução das emissões de GEE e do sequestro de carbono, exige uma evolução das práticas agrícolas, ou mesmo dos sistemas de produção como um todo. As dificuldades e alavancas de ação encontradas no terreno podem ser técnicas, econômicas, organizacionais ou mesmo sociológicas. Por exemplo, o desenvolvimento da agrossilvicultura, ou seja, a plantação de árvores nos campos (Fig.28), requer tanto investimento inicial como novas competências. Este desenvolvimento exige também o estabelecimento da valorização econômica, especialmente porque a madeira só pode ser valorizada a médio prazo enquanto a perda de terras cultivadas é imediata.

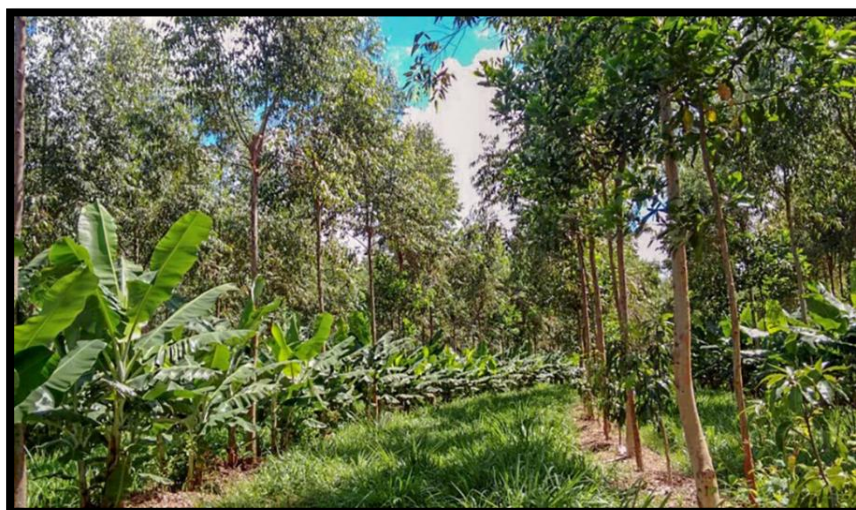


Figura 28. Agrossilvicultura, ramo da ciência que se ocupa do cultivo de árvores em conjunto com culturas agrícolas.

(fonte: <https://ruraltecv.com.br/wp-content/uploads/2021/06/AGROFLORESTA-16-1024x597.jpeg>)

Ou a interrupção da lavoura, permitindo a redução do consumo de energia, que é acompanhada por um período de aprendizagem de vários anos, especialmente no controle de ervas daninhas.

Estes desenvolvimentos técnicos não dizem respeito apenas aos agricultores e não podem ser realizados sem apoio ao sistema agrícola e alimentar como um todo. A transição da agricultura é, portanto, um projeto global que diz respeito também às cooperativas e às empresas agroalimentares, às comunidades e até ao consumidor.

#### **4.4.3. Qual poderia ser o papel das autoridades locais? Em que contexto?**

As comunidades têm um papel importante a desempenhar na evolução do mundo agrícola e, em particular, nas suas práticas. Parecem-nos possíveis vários tipos de ações. Em primeiro lugar, mobilizar os intervenientes agrícolas, partilhando as questões através de diagnósticos e envolvendo-os na coconstrução de estratégias locais.

O desenvolvimento de cenários de transição para a agricultura do território, permite, por exemplo, construir um projeto comum, traçar um rumo, tendo em conta as especificidades locais e identificar melhor o lugar da agricultura no plano climático do território.

Depois, para encorajar a ação, as comunidades podem ajudar a integrar as questões ambientais da agricultura nas políticas locais. O âmbito de atuação é amplo. Pode se relacionar com a preservação de terras agrícolas em políticas de planeamento, políticas agrícolas locais ou com a inovação através da criação, por exemplo, de pagamentos por serviços ambientais. A comunidade ou as empresas locais podem assim ajudar a financiar a agricultura para ações ambientais, como a instalação de sebes favoráveis ao sequestro de carbono, a preservação do solo, da água e da biodiversidade. Com o rótulo para baixo carbono, existe um quadro metodológico oficial sobre o armazenamento de carbono.

É também necessário envolver toda a cadeia alimentar na transição agroecológica, do produtor ao consumidor, incluindo empresas e distribuidores. As contribuições podem ser diversas: por exemplo, os projetos alimentares territoriais proporcionam um quadro adaptado para dar coerência às ações locais na terra, à instalação de jovens agricultores ao apoio aos agricultores, ao mesmo tempo que envolvem consumidores e cantinas num projeto coletivo e local. O desenvolvimento de energias renováveis, como a energia da madeira ou a metanização, também contribui para a transição dos setores agroalimentares como um todo.

#### 4.4.4. O que lembrar em poucas palavras?

O sequestro de carbono é uma componente da transição ecológica dos territórios e implicará uma evolução da nossa agricultura e até dos nossos pratos. Além disso, a agricultura é um dos desafios estratégicos na luta contra as alterações climáticas.

Este desenvolvimento não pode ser alcançado sem o envolvimento de todos, não só dos agricultores, mas também dos setores, das autoridades locais, de cada cidadão e de cada consumidor.

As comunidades podem apoiar eficazmente este desenvolvimento, mobilizando as partes interessadas num projeto agrícola comum e promovendo a emergência de novos sistemas alimentares, mais locais e mais resilientes.

#### 4.4.5. Nova teoria sobre o sequestro de carbono pelas árvores.

Trabalhos mostram que o carbono sequestrado pelas florestas boreais (Fig.29) é em grande parte enviado para as raízes das árvores, e seu armazenamento é auxiliado por fungos que vivem no solo.

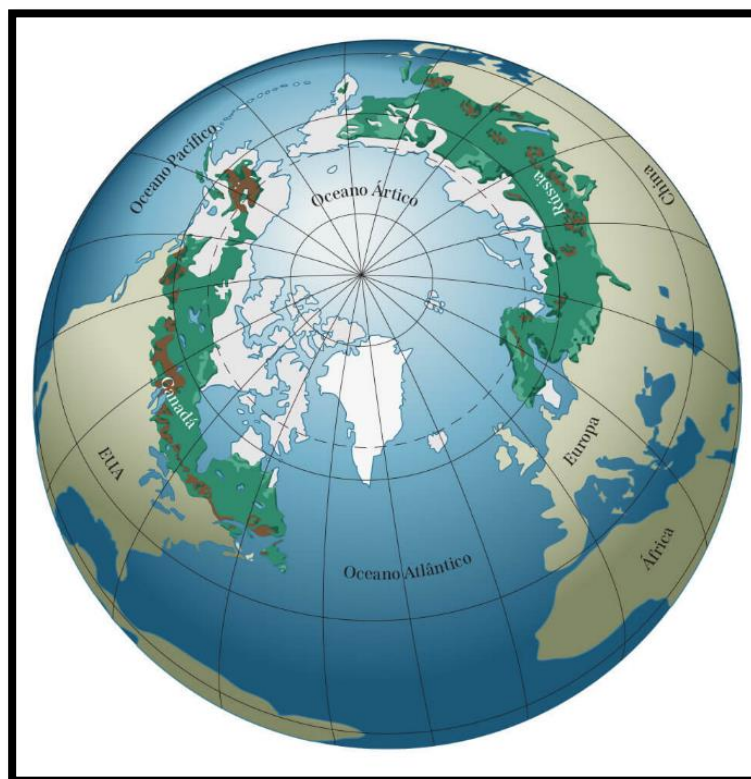


Figura 29. Área de floresta boreal.

(fonte: [https://florestas.pt/wp-content/uploads/2023/12/Interior\\_Ilustracao-1.jpg](https://florestas.pt/wp-content/uploads/2023/12/Interior_Ilustracao-1.jpg))

Sabe-se que as florestas são um dos principais sumidouros de carbono do planeta, e contribuem muito na tentativa de compensar o aumento das emissões antropogênicas dos últimos séculos.

Sabe-se que grande parte do carbono sequestrado pelas árvores vai para o solo através das folhas e ramos que caem, e que com o passar do tempo se transformam em húmus. Estudos tem demonstrado que o carbono vai parar no solo através das raízes das árvores e dos fungos que as habitam.

As florestas boreais, que cobrem 11% da superfície de nosso planeta, são um dos maiores sumidouros de carbono da Terra, sendo responsáveis pela absorção de 16% do carbono que vai parar nos solos.

Acreditava-se que o carbono encontrado nas raízes das florestas pudesse ser um carbono mais antigo, transportado para elas e para o solo à medida que o carbono mais novo ia sendo absorvido pelas árvores. Entretanto, descobriu-se grandes quantidades de carbono novo nas raízes das árvores. Os fungos absorvem o carbono das raízes em forma de açúcares, enviando-os, posteriormente, para o solo, o que explica porque encontramos carbono novo no solo.

Novas pesquisas analisaram as florestas boreais localizadas em ilhas de lagos na Suécia. Essas pesquisas mostraram que nas ilhas com mais de 1 hectare de área, cerca de 47% do carbono no solo foi armazenado através das raízes e dos fungos, enquanto nas ilhas com até 0,1 hectare, aproximadamente 70% do carbono foi para o solo através das raízes e dos fungos. Não se tem explicação por que as ilhas menores apresentam uma taxa maior de carbono no solo proveniente das raízes e dos fungos, mas especula-se que isso pode estar relacionado a taxas mais lentas de decomposição nos solos das ilhas pequenas.

A partir desses estudos acredita-se que um aumento nas temperaturas provavelmente vai estimular as taxas de atividades microbiológicas no solo, o que por sua vez aumentaria a decomposição e a perda de carbono no solo, já que o CO<sub>2</sub> seria liberado para a atmosfera.

O clima mais quente pode levar a um maior crescimento das árvores e arbustos das florestas boreais, fazendo com que suas raízes sejam maiores e haja mais fungos, desencadeando, dessa forma, mais sequestro de carbono.

## V. POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO EM DIFERENTES BIOMAS BRASILEIROS

O território brasileiro compreende 8,5 milhões de km<sup>2</sup> e segundo Bernoux & Volkoff (2006), estima-se que o estoque de C no solo esteja na ordem de 39, 52, 72 e 105 Pg (Petagrama), respectivamente para as camadas de 0-30, 0-50, 0-100 e 0-200 cm de solo. Isso corresponde a aproximadamente 40 % de todo o C armazenado nos solos da América Latina.

Entretanto, alguns sistemas de uso e manejo da terra em diferentes biomas brasileiros (Fig.30), podem ocasionar alterações consideráveis nos estoques de C e na emissão de GEE do solo para a atmosfera e, conseqüentemente, ser importante no que se refere à mitigação do aquecimento global do planeta.



Figura 30. Divisão atual dos biomas brasileiros.  
(fonte: [https://www.ihuonline.unisinos.br/images/revistaihu/edicao\\_500/Mapa-brasil-biomas.jpg](https://www.ihuonline.unisinos.br/images/revistaihu/edicao_500/Mapa-brasil-biomas.jpg))

### 5.1. Bioma Amazônia

Estudos realizados por Cerri *et al.* (2007), indicam que a taxa de desmatamento na Amazônia brasileira está entre 1,1 e 2,9 Mha/ano (Milhões de hectares por ano) (Fig.31). Mesmo com esta elevada taxa de desmatamento, a Amazônia brasileira possui em torno de 40 % de área remanescente de florestas tropicais no mundo (Laurance *et al.*, 2001).

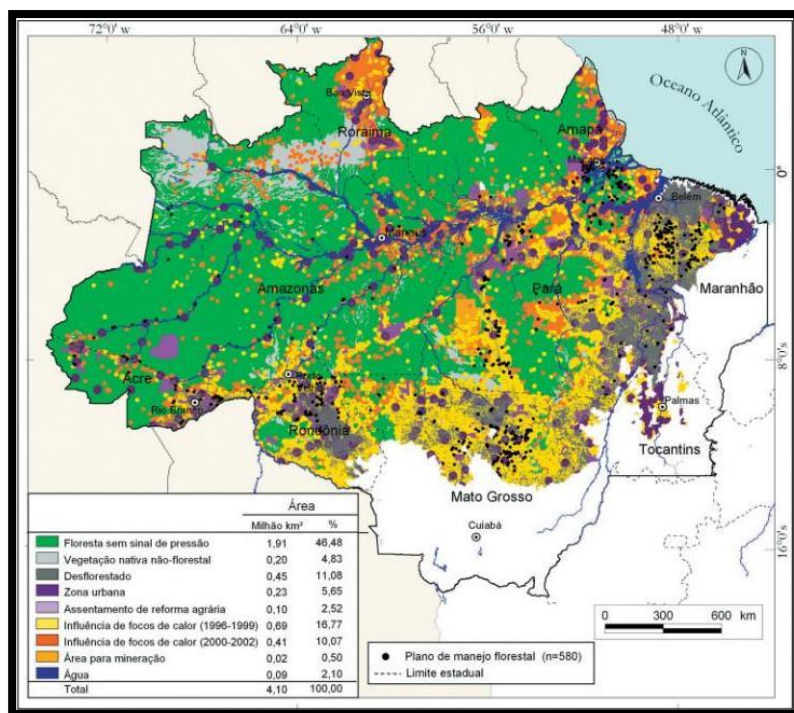


Figura 31. Pressão antrópica na Amazônia brasileira.  
(fonte: <https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2015/09/11.jpg>)

Um dos fatores apontados como responsável pela emissão de GEE, no Brasil, são as queimadas realizadas na Amazônia. Por sua vez, Cerri *et al.* (2006) compilaram vários estudos disponíveis na literatura, mostrando alguns sistemas de uso e manejo da terra na Amazônia que podem atuar no sequestro de C na vegetação e no solo.

Estudos têm demonstrado que 45% das áreas desmatadas da Amazônia foram utilizadas para plantio de pastagens, o que corresponderia a uma área de aproximadamente 24,7 Mha (Fearnside & Barbosa, 1998). Se as pastagens são bem manejadas, essas podem sequestrar C no solo, ou emitir C para a atmosfera se estas pastagens forem degradadas, dependendo do manejo adotado. Segundo estudos de Paustian *et al.* (2000), o uso de gramíneas forrageiras apresenta uma alta capacidade de aumentar o estoque e distribuir o C na subsuperfície do solo. A elevada entrada de biomassa e a ausência de revolvimento do solo são as principais razões para essa maior quantidade de C acumulada no solo.

Segundo dados de Cerri *et al.* (2006), a floresta amazônica brasileira tem um potencial de sequestro de C da ordem de 450 Tg/ano (Teragrama por ano); do qual, cerca de 30 % (135 Tg/ano de C) seria acumulado pelo solo, e os 70 % restantes (315 Tg/ano de C), seriam oriundos da biomassa aérea. Essa estimativa evidencia a grande importância de se evitar o desmatamento e, conseqüentemente, mitigar as emissões de GEE para a

atmosfera. Estudos têm demonstrado que a maior contribuição do setor florestal brasileiro na mitigação do efeito estufa não está relacionada somente no sequestro de C, mas também na manutenção dos estoques atuais de C, ou seja, deve-se evitar a emissão de CO<sub>2</sub> por meio da degradação acelerada ou queima do material orgânico.

## 5.2. Bioma Cerrado

O Cerrado compreende uma área de aproximadamente 200 Mha e que se encontra em expansão na área agrícola no Brasil, correspondendo a aproximadamente 23% do território brasileiro (Bustamante *et al.*, 2006). Estudos têm demonstrado que o Cerrado vem tendo uma taxa de conversão de vegetação nativa, ao redor de 1,1 % ao ano, o que equivale a 2,2 Mha/ano. Segundo Machado *et al.* (2004), apenas 34 % da região do Cerrado se encontra em estado natural, e estimativas indicam que até 2030 esta área será de apenas 2,0 Mha (Fig.32).

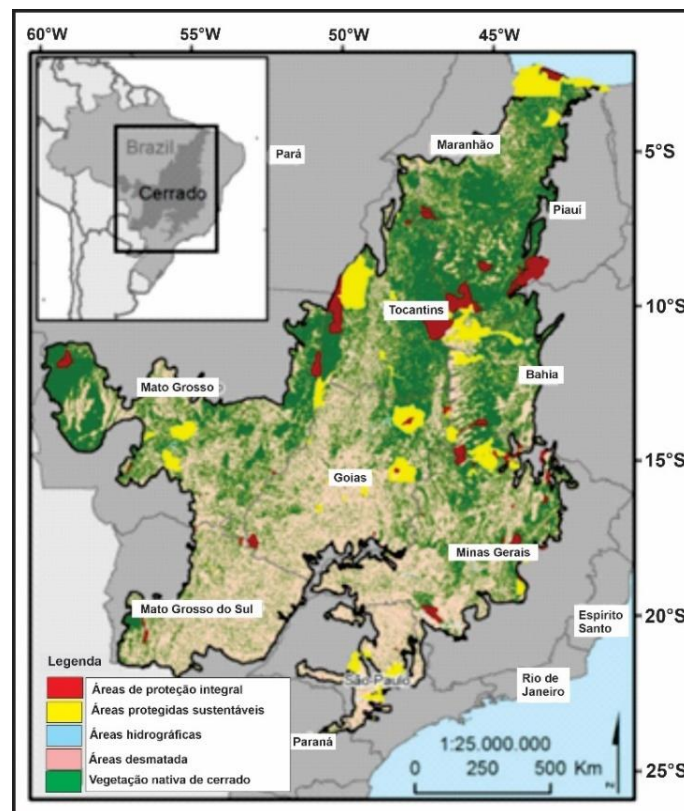


Figura 32. Mapa da região do Cerrado mostrando a quantidade de vegetação natural intacta (verde), a localização e o tamanho das áreas de proteção ambiental (amarelo e vermelho) e o total de área desmatada (rosa).

(fonte: [https://parajovens.unesp.br/wp-content/uploads/2023/06/O-bioma-do-Cerrado\\_-um-hotspot-de-biodiversidade-esquecido\\_imagem1-860x1024.jpg](https://parajovens.unesp.br/wp-content/uploads/2023/06/O-bioma-do-Cerrado_-um-hotspot-de-biodiversidade-esquecido_imagem1-860x1024.jpg))

Estudos de Bayer *et al.* (2004) demonstram que o bioma Cerrado apresenta mais de 12 Mha cultivados com lavouras anuais; destes, mais de 7 Mha são cultivados no sistema de plantio direto (SPD). A manutenção da palha na superfície do solo, associada à ausência de revolvimento do solo, ocasionam a redução da emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, e atua no aumento do estoque de C no solo, ocasionando benefícios às culturas, como: aumento da diversidade microbiana, melhoria da fertilidade e dos atributos físicos do solo (Six *et al.*, 2002; Foley *et al.*, 2005) e, ainda, uma expressiva redução na erosão hídrica.

### 5.3. Bioma Mata Atlântica

O bioma Mata Atlântica ocupa uma grande área do território brasileiro, encontrando-se presente em 15 Estados da federação. Essa área, ao longo do tempo, passou por grandes desmatamentos para a implantação da agricultura, pecuária e industrialização brasileira (Fig.33). Atualmente, esse bioma apresenta-se como: floresta remanescente, floresta plantada, pastagens, culturas permanentes e culturas anuais (Boddey *et al.*, 2006).

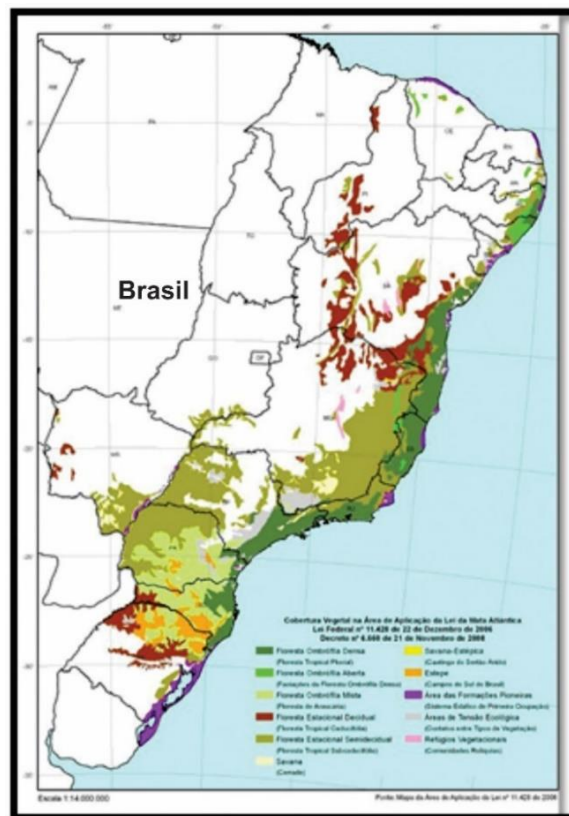


Figura 33. Cobertura vegetal do bioma Mata Atlântica.  
(fonte: <https://canoadetolda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/Area-Atlas-614x906.jpg>)

O sequestro de C por meio do reflorestamento é uma opção para mitigar as emissões de GEE no bioma Mata Atlântica. Segundo estudos de Ciesla *et al.* (1995), a proporção de C imobilizado pelas florestas está relacionada ao seu crescimento e sua idade. As florestas removem C, na forma de CO<sub>2</sub>, em maiores proporções na fase juvenil e em fase de crescimento. À medida que atingem a maturidade e o crescimento se estabiliza, a absorção de CO<sub>2</sub> é reduzida e a vegetação entra em estágio de equilíbrio dinâmico.

Segundo Jacovine *et al.* (2006), o cultivo da seringueira é uma atividade que traz benefícios para o sistema climático global, por se tratar de espécie arbórea que armazena C pelo processo da fotossíntese; seu produto, a borracha, também é um grande armazenador de C e, ainda, substitui a utilização de derivados de petróleo.

Atividades silviculturais, além de sequestrarem C da atmosfera, ainda reduzem a erosão do solo e a perda do C do sistema, o qual seria carregado no escoamento superficial da água no solo.

Estimativa realizada por Mello *et al.* (2006), avaliando o potencial de sequestro de C na região da Mata Atlântica, na camada de 0 a 20 cm de solo, mostrou um aumento médio de 150 Tg/ano de C, chegando a um potencial de sequestro de C de 3 Pg C (Petagrama de carbono), após 20 anos. Esses dados mostram a importância de melhorar as práticas de manejo atuais nesse bioma, principalmente por meio da implantação de práticas de reflorestamento, recuperação de pastagens degradadas e eliminação do fogo em cultivos.

#### **5.4. Bioma Caatinga**

O Bioma Caatinga é a vegetação nativa dominante do semiárido brasileiro, que cobre uma área de aproximadamente 860 mil km<sup>2</sup> de floresta sazonalmente seca, com ocorrência de mais de 3 mil espécies, das quais mais ou menos 500 são endêmicas, sendo hoje, considerada a área de maior biodiversidade nos neotrópicos e, reconhecida como uma das áreas de vida selvagem mais importantes do planeta (Fig.34).

Estudos têm demonstrado, ao contrário do que se pensava, que a Caatinga atua como excelente sequestradora de CO<sub>2</sub>, mesmo em períodos de seca extrema. Em áreas de Caatinga hipoxerófilas (mais úmidas), a Caatinga sequestra até 5 tCO<sub>2</sub>/ha/ano. Em áreas de Caatinga hiperxerófilas (mais secas) o sequestro varia entre 1,5 e 2,5 tCO<sub>2</sub>/ha/ano.



Figura 34. Mapa do bioma Caatinga, contendo a distribuição espacial das áreas com vegetação (verde), desmatamento acumulado até 2008 (laranja) e corpos d'água (azul).

(fonte: <https://www.researchgate.net/publication/282086035/figure/fig3/AS:614017932468230@1523404691095/Figura-5-Mapa-do-bioma-Caatinga-contendo-a-distribuicao-espacial-das-areas-com.png>)

Os resultados ainda mostram que a Caatinga apresenta uma elevada eficiência de uso do C, conferindo a condição de floresta mais eficiente no uso do C do que todos os demais tipos de florestas mundialmente estudadas até agora. Tal eficiência é em média de 45%, ou seja, de cada 100 t de CO<sub>2</sub> absorvido, ela retém 45 t. A eficiência no uso da água também é bastante elevada, variando de 5,2 a 2,7 kg de CO<sub>2</sub> fixado por metro cúbico de água transpirada. O pico de fixação de CO<sub>2</sub> ocorre principalmente durante os períodos em que há alta radiação fotossinteticamente ativa disponível, atingindo valores que variam entre 1,90 e 1072 kgCO<sub>2</sub>/ha/dia.

Estes estudos mostram que a Caatinga desempenha um papel relevante na absorção de quantidades significativas de CO<sub>2</sub> atmosférico. Ou seja, ela é uma aliada importante na mitigação dos efeitos dessas mudanças causadas pelas ações antrópicas.

Nos últimos 30 anos ocorreu um aumento de quase 200 mil km<sup>2</sup> na área classificada climatologicamente como semiárida no Brasil e houve uma redução de 21% da área florestal do bioma Caatinga. Atualmente cerca de quatro milhões de hectares

encontram-se severamente degradados, provocando mudanças nos padrões geográficos da riqueza de espécies vegetais e animais, na diversidade Beta e padrões de lenhosidade e generalismo ecológico de comunidades vegetais da Caatinga.

O Brasil não despertou, ainda, para as riquezas e para o milagre do desabrochar de vida na Caatinga.

## 5.5. Bioma Pantanal

O Pantanal é um bioma com uma área de aproximadamente 179.300 km<sup>2</sup>, com 78% em território brasileiro, 18% em território boliviano e 4% em território paraguaio. No Brasil, ocorre nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, sendo que este último concentra 65% da área brasileira.

Em 2021 o Bioma Pantanal armazenava 0,6 Gt (gigatoneladas) de carbono orgânico no solo (COS). A maioria desse total (0,5 Gt COS) estava armazenada em áreas naturais e apenas 0,1 Gt COS estava armazenado em áreas antrópicas (Fig.35).

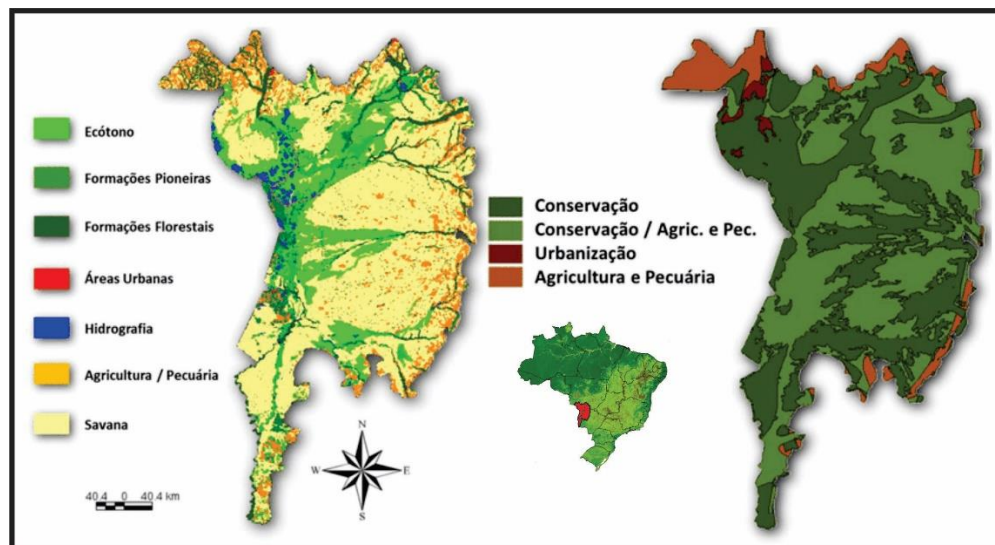


Figura 35. Mapa de uso e cobertura da área do Bioma Pantanal  
(modificado: EMBRAPA, 2004)

Apesar da importância dos solos para o ciclo global do carbono e o destino do CO<sub>2</sub> antropogênico, o carbono orgânico no solo (COS) permanece pouco compreendido. Os solos armazenam na matéria orgânica aproximadamente duas vezes a quantidade de carbono presente na atmosfera como CO<sub>2</sub>, sendo que quase um terço desse carbono é constituído de formas lábeis, com ciclagem bastante rápida (Schimel, 1995). Em função disso qualquer alteração nas condições climáticas ou produção primária pode acarretar

alterações significativas no CO<sub>2</sub> atmosférico, com influência em escala global. Segundo Diaz-Filho *et al.* (2001), cerca de 100 a 200 tC/ha são perdidas para atmosfera como CO<sub>2</sub>, quando áreas de florestas são convertidas em pastagens.

Os ecossistemas no Pantanal são conectados e usualmente moldados por efeitos antropogênicos e ações naturais. Uma característica marcante deste bioma são as estações bem definidas e caracterizadas por seca e chuva, sendo marcado pelo pulso de enchentes, o que influencia as comunidades do ecossistema e a ciclagem de nutrientes. Recentemente, o Bioma Pantanal tem sido destaque devido aos frequentes incêndios de grandes proporções, associados às mudanças climáticas, como a redução das chuvas, da umidade relativa e as altas temperaturas, além de também sofrer com ações relacionadas à prática da pecuária.

Estudos têm demonstrado que o estoque médio de COS, no Bioma Pantanal, é de cerca de 38 t/ha, entretanto nas áreas de pastagem, o estoque médio é de cerca de 28 t/ha. Isso significa que o Pantanal possui uma quantidade significativa de carbono orgânico armazenado em seu solo, principalmente em áreas naturais. A preservação dessas áreas é importante para manter esse estoque de carbono e evitar a liberação de GEE na atmosfera.

Em termos absolutos, o Bioma Pantanal possui um estoque de COS menor que outros biomas brasileiros, entanto, é importante considerar que o Bioma Pantanal é menor em área do que os outros biomas.

## **5.6. Bioma Pampa**

O bioma Pampa cobre áreas territoriais de quatro países: Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai.

No Brasil, o bioma Pampa ocupa cerca de 2,07% do território nacional, sendo encontrado exclusivamente no Rio Grande do Sul, onde ocupa uma área de 176.496 km<sup>2</sup>, correspondendo a 63% do território estadual (IBGE, 2004). Atualmente, 36,03% dessa área ainda se encontra preservada e o restante já perdeu espaço para lavouras, áreas de pastagens cultivadas e silvicultura.

O bioma Pampa foi o bioma que mais perdeu vegetação nativa entre 1985 e 2021, em termos proporcionais. No período, 3,4 Mha de diferentes tipos de campos deram lugar para a agricultura e silvicultura, o que representa uma perda de 29,5% de vegetação.

Segundo o levantamento, em 1985, as áreas de vegetação nativa ocupavam 61,3% do Pampa. Em 2021, essa participação foi de 43,2%. Por outro lado, a ação do homem avança sobre o bioma: as áreas antropizadas somam 46,7%, sendo que 41,6% são somente para a agricultura (Fig.36).

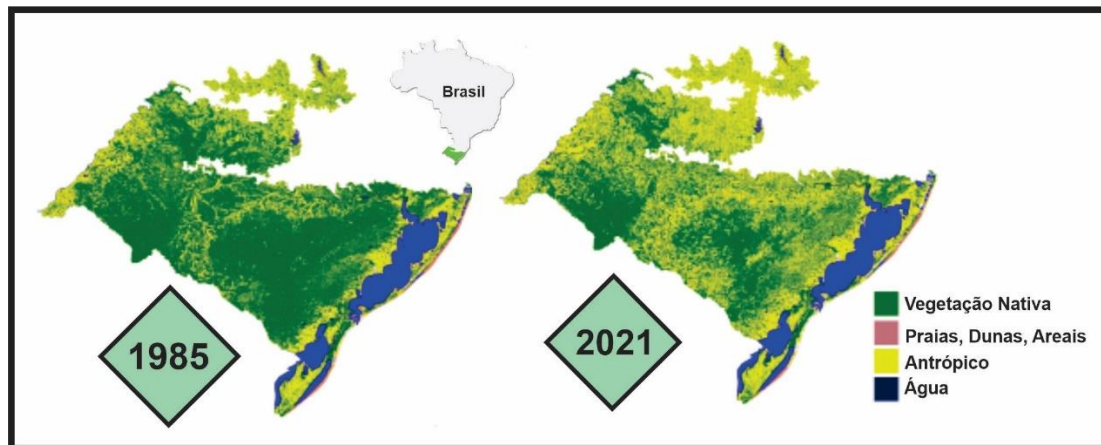


Figura 36. Área natural e antropica do bioma Pampa entre 1985 e 2021.  
(modificado: <https://i0.wp.com/oeco.org.br/wp-content/uploads/2022/10/mapa.png?resize=640%2C337&ssl=1>)

O sequestro de carbono orgânico no solo pelas pastagens permanentes do mundo pode potencialmente compensar mais de 4% das emissões globais de GEE (Soussana, 2009).

Schirmann (2006), avaliou a taxa de sequestro de carbono das pastagens nativas do bioma Pampa e apresentou uma tendência da oferta de forragem de 8% apresentar maior taxa (0,66 MgC/ha/ano)(Megagrama de C/ha/ano) em relação as ofertas de 12% (0,27 MgC/ha/ano) e 16% (0,18 MgC/ha/ano). Os resultados demonstraram que a utilização das ofertas de forragem de 8%, 12% e 16% apresentaram potenciais de sequestrar carbono no solo em relação à oferta de forragem de 4% .

Esses resultados podem ser em função de que as ofertas mais altas apresentam uma relação estrato aéreo e raízes maior, o qual está atribuído à maior produção primária líquida das pastagens, e que implica em maiores insumos de carbono para o solo (Pillar *et al.*, 2012).

A presença de touceiras aumenta a quantidade de matéria orgânica no solo, o que contribui para melhorias em suas características, como aumento dos estoques de matéria orgânica e estabilidade dos microrganismos biológicos do solo. Schirmann (2016) observou que o teor de carbono orgânico encontrado na camada de 0-10 cm embaixo das

touceiras foi maior que do estrato inferior, e os fatores citados acima são os grandes responsáveis por isso.

Outro fator que é a favor das pastagens nativas do bioma Pampa é a presença de espécies com metabolismos C4. Estas conseguem estocar maior quantidade de carbono no solo quando pastejadas em relação as plantas C3, isso porque elas possuem maior relação raiz/parte aérea e liberação de exsudatos radiculares no solo (McSherry & Ritchie, 2013).

O sequestro de carbono pode minimizar as emissões de GEE pelos ruminantes e ainda contribuir com vários benefícios ambientais, aumentando a fertilidade do solo, aumentando capacidade de retenção de água, agregação do solo e redução da erosão (Conant & Paustian, 2002). O sequestro de carbono no solo tem sido apontado como o principal fator que contribui para que o potencial de aquecimento global seja negativo.

Como visto, além de fatores de manejo, as pastagens nativas do bioma Pampa possuem características particulares que contribuem para tornar esses ambientes um sumidouro natural de carbono.

## **VI - SEQUESTRO DE CARBONO PELOS OCEANOS**

Os oceanos são responsáveis por um importante serviço ambiental como a regulação do carbono no planeta. Muito se fala sobre o oceano ser um sequestrador de carbono, mas poucos compreendem como funciona os processos que possibilitam o sequestro.

De início necessita-se entender que permanentemente ocorre uma troca gasosa na interface oceano-atmosfera, onde os gases saem do ambiente mais concentrado para o menos concentrado. Por conta disso o oceano pode ser tanto um sumidouro como também uma fonte de carbono. De forma geral, no período pré-industrial, o oceano era uma fonte líquida de carbono para a atmosfera, entretanto, nos dias de hoje, o oceano atua como um sumidouro de carbono da atmosfera por conta da elevada carga antropogênica de CO<sub>2</sub>. Essa dualidade pode ser estimada através do fluxo de CO<sub>2</sub>.

Além da interface atmosfera-oceano existem inúmeros outros processos que ocorrem no corpo d'água oceânico e que promovem a fixação do carbono nas águas oceânicas. A assimilação do carbono pelos oceanos pode ocorrer de duas maneiras: Bomba Físico-Química e Bomba Biológica (Libes, 2011) (Fig.37).

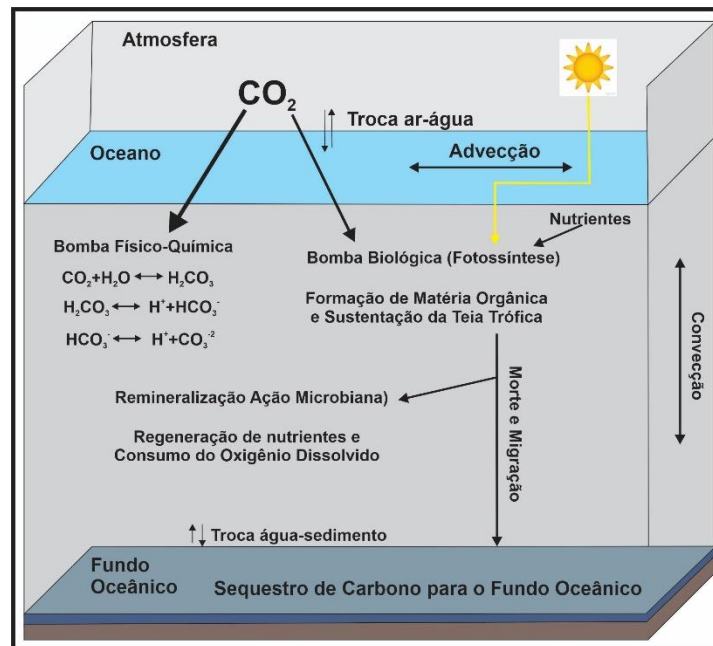


Figura 37. Sequestro de carbono pelos oceanos.

(modificado: <https://olharoceanografico.com/entendendo-o-sequestro-de-carbono-pelos-oceanos/>)

A primeira delas, é caracterizada pela ação de três processos; primeiro: o movimento físico da água do mar determina a troca entre águas superficiais com diferentes densidades; segundo: o efeito da temperatura na solubilidade do CO<sub>2</sub>, os gases são mais solúveis em temperaturas mais baixas, como consequência o CO<sub>2</sub> é duas vezes mais solúvel nas águas superficiais frias encontradas nas altas latitudes em comparação ao equador; e terceiro: as reações químicas que o CO<sub>2</sub> sofre na água do mar, a solubilidade do CO<sub>2</sub> é aumentada pela reação com o carbonato, quando a água (H<sub>2</sub>O) e o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) se encontram, formam o ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), reação essa que promove a acidificação dos oceanos por conta da dissociação do H<sup>+</sup>.

Já a segunda, a Bomba Biológica tem início quando o CO<sub>2</sub> dissolvido na água do mar é absorvido, juntamente com nutrientes e luz, por fitoplâncton, para realizar a fotossíntese. Esse carbono orgânico flui na cadeia trófica e, durante este processo, parte do carbono é perdido em forma de detritos e transportado para o fundo do mar. Uma vez no fundo e fora da presença de luz, os detritos se degradam através da remineralização microbiana e o CO<sub>2</sub> é liberado. Contudo mantêm-se dissolvido nas profundezas sob as altas pressões e baixas temperaturas e o material orgânico remanescente, que não foi consumido em nenhum dos processos, chega ao fundo dos oceanos e se acumula nos sedimentos.

O plâncton e outros organismos marinhos extraem o CO<sub>2</sub> da água do oceano e convertem-no em carbonato de cálcio, para construir seus esqueletos e escudos. Quando

o fitoplâncton é consumido por bactérias ou pelo zooplâncton, nutrientes e CO<sub>2</sub> são liberados para a água, podendo ser outra vez absorvido pelo fitoplâncton ou ser liberado para a atmosfera. Porém, quando o fitoplâncton morre, parte do carbono orgânico e, principalmente, o carbono inorgânico, são depositados no fundo do oceano, formando depósitos sedimentares, e posteriormente petróleo e carvão.

Ambos os processos retiram milhares de toneladas de carbono da atmosfera, contribuindo, por exemplo, para a desaceleração do aquecimento global e a amenização das mudanças climáticas.

Portanto na imensidão do corpo oceânico um enorme serviço ambiental de captura do carbono gasoso da atmosfera é realizado continuamente e em silêncio. Os oceanos prestam uma contribuição inestimável para equilibrar o carbono em excesso, liberado pelo homem na sua conduta egoísta para apossar da energia dos combustíveis fósseis. No mínimo devemos ajudar a preservar a qualidade das águas dos oceanos de modo que essa possa nos ajudar de forma mais efetiva no sequestro de carbono.

## **6.1. Sequestro de carbono artificial no ecossistema oceânico.**

O sequestro artificial de carbono, no ecossistema oceânico, refere-se a métodos que visam acelerar o processo natural de absorção de CO<sub>2</sub> pela água do mar, promovendo a captura e armazenamento de carbono no oceano de forma artificial. Atualmente, a tecnologia está sendo explorada para injeção direta de CO<sub>2</sub> no oceano profundo, utilizando a pressão e a baixa temperatura para dissolver ou formar hidratos de carbono. Outros métodos incluem a fertilização oceânica, que busca estimular o crescimento de fitoplâncton para aumentar a absorção de CO<sub>2</sub>, e a ressurgência artificial, que busca manipular a circulação oceânica para promover o afundamento de água rica em carbono.

Embora o sequestro de carbono artificial no oceano seja um potencial meio de combate às mudanças climáticas, é crucial considerar os possíveis impactos nos ecossistemas marinhos.

É fundamental realizar pesquisas aprofundadas para avaliar os riscos e os benefícios de cada método, bem como os custos e a viabilidade a longo prazo.

Apesar de o oceano já ser um importante sumidouro de carbono, a interferência artificial deve ser realizada com cautela e com base em dados científicos robustos.

O oceano é o maior reservatório de carbono da Terra, contendo cerca de 50 vezes mais carbono que a atmosfera.

## VII – SEQUESTRO DE CARBONO PELOS MANGUEZAIS

### 7.1. Distribuição e formação dos manguezais

Os manguezais se formam em substratos não-consolidados nas regiões entre marés em zonas costeiras tropicais, subtropicais e temperadas, distribuídos em todos os continentes (Fig.38). A vegetação dos manguezais suporta um amplo gradiente de sal, variando desde água doce até hipersalina.

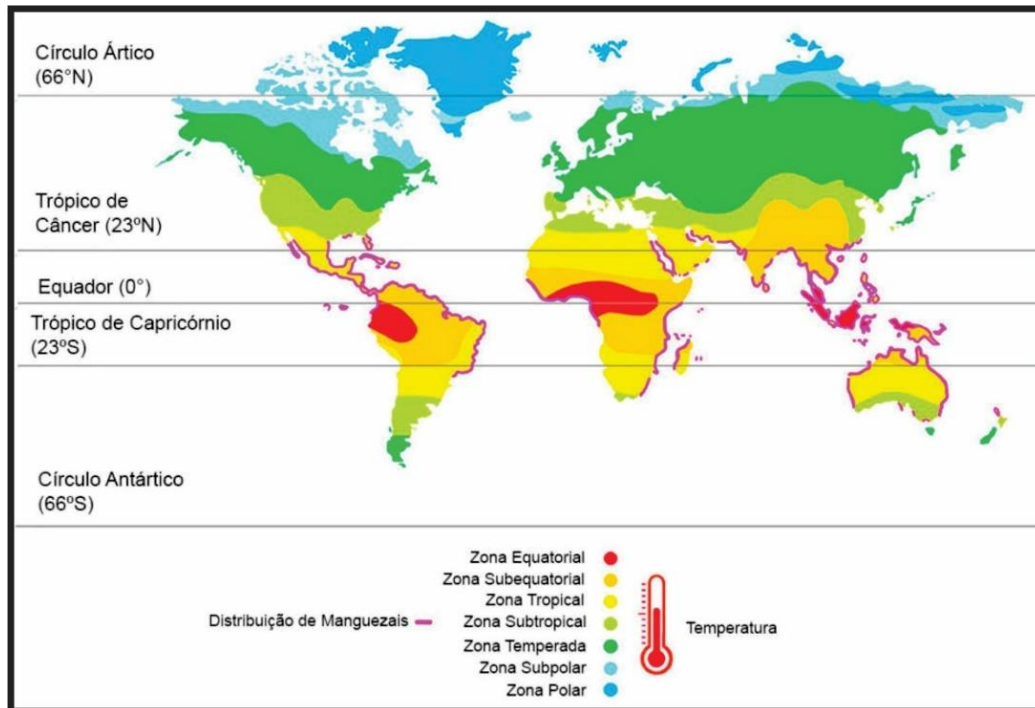


Figura 38. Distribuição dos manguezais no globo terrestre.  
(fonte: Cadena & Ochoa-Gómez, 2023)

Os manguezais constituem um ecossistema mundialmente reconhecido devido a ampla diversidade de serviços ofertados. Desempenha funções ecológicas, econômicas, culturais e sociais.

Os manguezais também são responsáveis pelo controle do avanço de processos erosivos em zonas costeiras, protegendo a faixa litorânea da energia das ondas e dos ventos. Possibilita um grande acúmulo de carbono de modo a reduzir a concentração de GEE na atmosfera.

Friess *et al.* (2020), observaram à grande contribuição dos manguezais na regulação do clima global, isso decorrente da alta produtividade e das condições anóxicas do solo, as quais reduzem a taxa de decomposição da matéria orgânica, resultando assim

em uma alta capacidade de sequestro e armazenamento de carbono, podendo alcançar até cinco vezes mais a quantidade de outros ecossistemas vegetados.

Os manguezais ocupam uma área de aproximadamente 8,4 Mha em todo o planeta. Entretanto, segundo Yu *et al.* (2020), 67% da vegetação de mangues do mundo, foi perdida nos últimos anos. O Brasil possui a segunda maior reserva de mangue do planeta, com uma área total de 1,4 Mha, com um percentual de supressão de 40% (ICMBio,2018).

As perdas de áreas de mangues estão associadas à expansão das atividades humanas nas zonas costeiras, como a urbanização, a agricultura, a carcinicultura, as modificações hidrodinâmicas dos rios e a exploração da madeira (Eddy *et al.*2021).

A remoção da vegetação dos mangues libera grandes quantidades de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, o que contribui para o agravamento das condições climáticas do planeta.

O estoque médio de carbono, em escala global, considerando-se as frações presentes no solo e na biomassa, é de aproximadamente 5,34 Pg. A estimativa média de carbono em escala nacional, é de 709 tC/ha, enquanto às reservas de carbono por setor; o solo apresenta os maiores estoques quando comparado com o valor médio da biomassa, que é de 147 tC/ha.

Os fatores que condicionam os estoques de carbono no ecossistema manguezal, podem ser agrupados em bióticos, abióticos e antrópicos.

O fator biótico diz respeito a estrutura da vegetação, o compartimento vegetal (raiz, parte lenhosa e parte verde), a diversidade das espécies, as características fisiográficas e as condições de manejo. O fator abiótico está relacionado a salinidade do manguezal, o gradiente topográfico, a granulometria dos sedimentos, a profundidade do solo, a concentração de nutrientes e o clima. O fator antrópico diz respeito a mudança de uso e ocupação do solo e a poluição.

Os manguezais ocupam apenas 0,5% das áreas costeiras tropicais e subtropicais do mundo, mas são os maiores fornecedores do carbono terrestre que é enviado ao oceano. Isso tem grande valor porque o carbono orgânico (tanto dissolvido quanto particulado), se transforma em alimento para organismos como o fitoplâncton ou é incorporado ao balanço do carbono costeiro dos oceanos ou ecossistemas adjacentes aos manguezais. Tal como outras plantas, os manguezais engendram raízes, folhas e caules utilizando luz solar, água e CO<sub>2</sub>, que é um gás do efeito estufa (Fig.39).

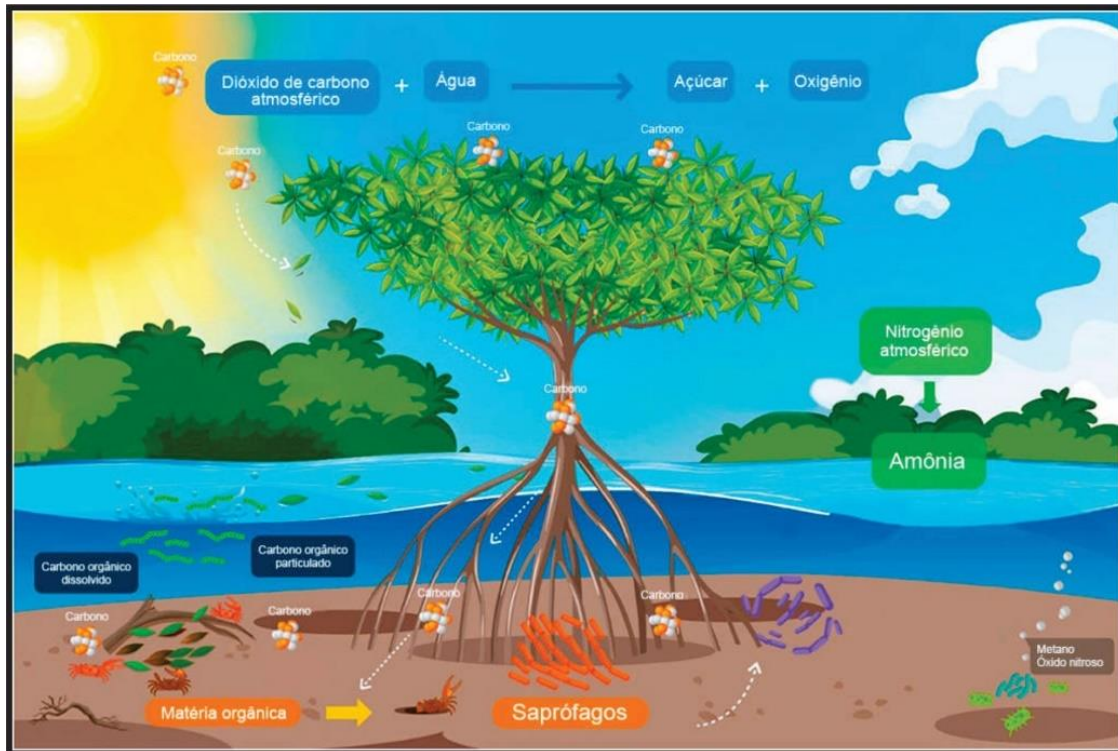


Figura 39. Esquema do ciclo do carbono nos manguezais: fotossíntese (azul), fixação do nitrogênio (verde) e degradação de materiais orgânicos por saprófagos (laranja). O carbono se movimenta da atmosfera para os manguezais e posteriormente para dentro de outros organismos no ecossistema (setas brancas).  
(fonte: Cadena & Ochoa-Gómez, 2023)

No entanto, os manguezais removem o CO<sub>2</sub> da atmosfera de forma que é cerca de quatro vezes mais eficiente do que as outras plantas (Alongi, 2014). Desta maneira os manguezais são essenciais para a redução do CO<sub>2</sub> na atmosfera devido que esses podem retê-lo no solo adjacente por longos períodos. Devido à importância dos manguezais, a União Internacional para a Conservação da Natureza considera esses ecossistemas como super-heróis no retardamento das alterações climáticas e na redução dos seus efeitos negativos no planeta.

O crescimento populacional nas zonas costeiras é inevitável, entretanto a sociedade e a indústria precisam gerenciar os manguezais com mais cuidado. Muitas pessoas sequer têm consciência da importância ecológica dos manguezais e dos perigos que os ameaçam. Por isso, devemos promover campanhas educativas e de informação ao público, a fim de chamar a atenção para esse problema. Salvar os manguezais trará benefícios para todo o planeta, ajudando até a conter as alterações climáticas.

## 7.2. Estoque de carbono no solo dos manguezais

A capacidade dos solos dos manguezais estocarem grandes quantidades de carbono já era de conhecimento prévio da ciência. Entretanto, poucos dos países que comportam a presença de manguezais, possuem uma estimativa real desse potencial e de como ele pode ser usado no mercado de compra e venda de carbono.

De acordo com os dados conhecidos, os manguezais da costa brasileira, distribuídos desde o Amapá até Santa Catarina, detêm 8,5% dos estoques globais de carbono desses ecossistemas. Quando comparados a outros biomas vegetados do Brasil, os solos dos manguezais armazenam em torno de 4,3 vezes mais carbono no primeiro metro de solo (Fig.40). Se levarmos em relação à biomassa (aéreas e raízes), esse ecossistema encontra-se em segundo lugar em estoques, atrás apenas da floresta Amazônica.

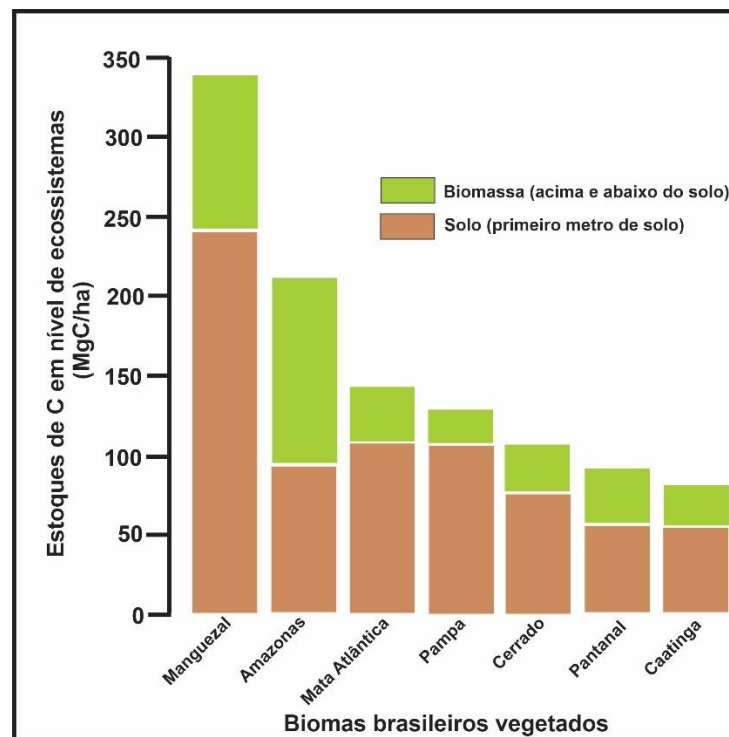


Figura 40. Gráfico comparativo da quantidade de estoque de carbono nos manguezais e nos diversos biomas brasileiros.  
(modificado:

A alta capacidade de sequestro de carbono, pelos manguezais, é decorrente do armazenamento oriundo do carbono do próprio ambiente, como as plantas características do ecossistema, quanto os provenientes de áreas florestais próximas, como os presentes nas restingas, montantes dos rios, na Mata Atlântica e na Floresta Amazônica, além do carbono proveniente das águas dos estuários, oriundos dos fitoplâncton e zooplâncton.

Para que esse ecossistema continue sendo preservado, o qual é um ecossistema de transição entre o ambiente terrestre e o marinho, e que se comporta como um berçário importantíssimo para diversas espécies (Fig.41), sendo ainda, uma fonte de renda para as comunidades locais, necessitam não somente serem mais fiscalizados, mas também mais estudados e preservados.

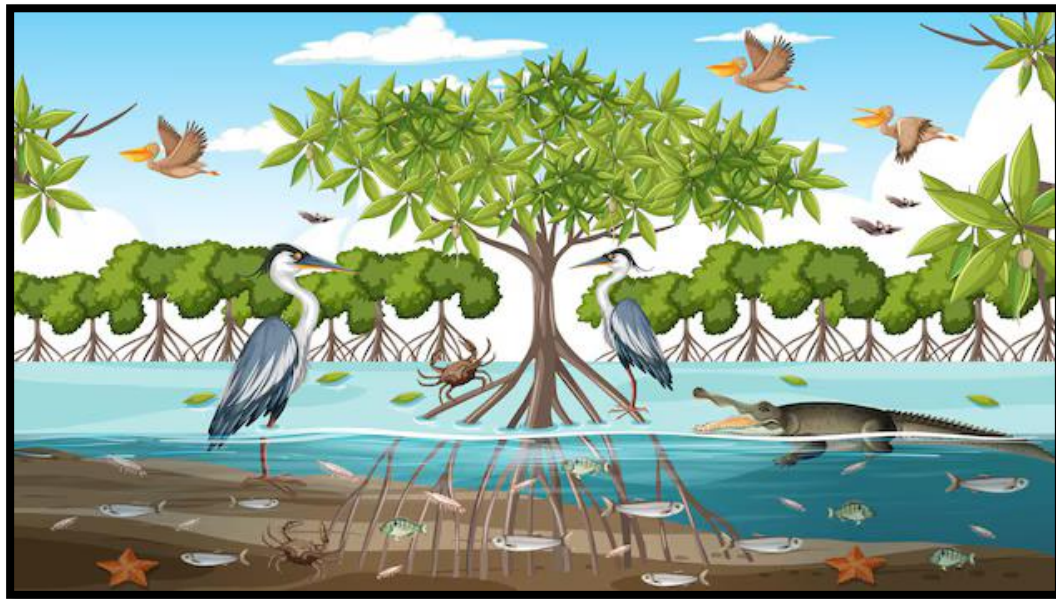


Figura 41. Floresta de mangue com abundante fauna e flora.

(fonte: [https://img.freepik.com/vetores-gratis/cena-de-paisagem-de-floresta-de-mangue-durante-o-dia-com-muitos-animais-diferentes\\_1308-56939.jpg](https://img.freepik.com/vetores-gratis/cena-de-paisagem-de-floresta-de-mangue-durante-o-dia-com-muitos-animais-diferentes_1308-56939.jpg))

### 7.3. Estoques de carbono nas marismas

As marismas são típicas formações que se desenvolvem em áreas entre marés, as quais são inundadas de modo regular ou irregular. São áreas típicas de latitudes médias, sendo pouco desenvolvidas em latitudes tropicais e equatoriais (Fig.42), onde os manguezais dominam (Strong & Ayres, 2013).

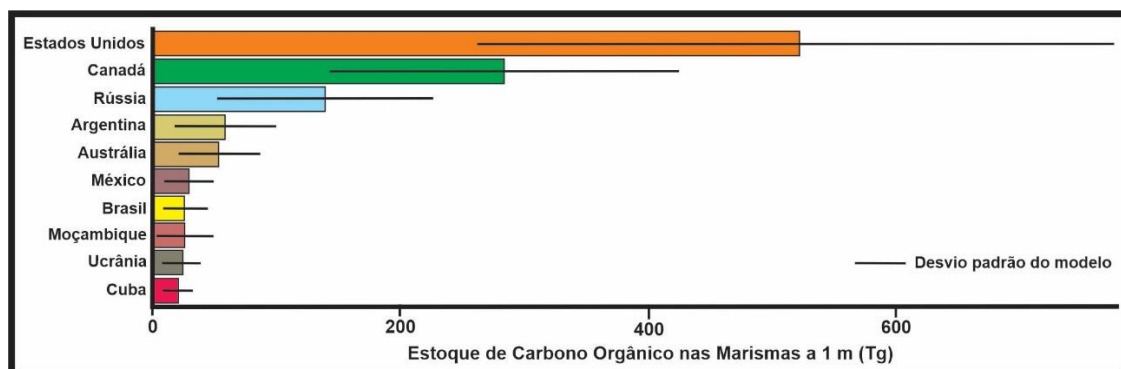


Figura 42. Os dez países com maior estoque de carbono orgânico no solo em marismas.

(modificado: Maxwell et al, 2024)

As marismas são formadas por espécies halófitas pertencentes, em grande parte, a família Poaceae e se caracterizam pelo metabolismo fotossintético C4, de alta eficiência hídrica por carbono assimilado (Adams *et al.*, 2012) (Fig.43).



Figura 43. Marisma com plantas halófitas da família da *Spartina alterniflora*.  
(fonte: <https://www.gardenia.net/plant/spartina-alterniflora>)

As marismas apresentam ampla importância por prover serviços ecossistêmicos, como o de contribuir para a adaptação e resiliência ao clima, protegendo a zona costeira da erosão provocada por tempestades e aumento do nível do mar

Apresenta grande destaque na capacidade em sequestrar e armazenar o carbono da atmosfera no seu substrato, o qual pode permanecer em seus sedimentos, por séculos (Miller *et al.*, 2022).

A função desse ecossistema, como sumidouro de carbono, vem sendo reconhecida exponencialmente durante os anos, pelo motivo da decomposição da matéria orgânica ocorrer de forma lenta e apresentar altas taxas de entrada de matéria orgânica (Mueller *et al.*, 2019).

A longo prazo as marismas conseguem ter taxas altas de acumulação de carbono, sendo que a perturbação desses sistemas pode causar danos aos inventários de carbono sedimentar, o que pode ocasionar a liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera (Fig.44). Por esse motivo, a proteção desse ecossistema deve ser considerada como parte dos esforços para atenuar os processos de mudanças climáticas (Ruiz-Fernández *et al.*, 2018).



Figura 44. Localização das principais marismas no mundo.  
(modificado: <https://static.significados.com.br/foto/mapa-mundi-continentes.jpg?width=1024>)

Segundo Pereira *et al.* (2022), esforços têm sido feitos para a conservação dos sumidouros e, em uma escala mundial, as zonas úmidas oferecem em torno de 14% das oportunidades de mitigação das mudanças climáticas através do estoque de carbono, sendo seu sequestro 55 vezes mais rápido do que as florestas tropicais.

A restauração das marismas pode ser considerada abordagem de gestão costeira adequada, podendo transformar áreas degradadas em sumidouros de carbono. Entretanto, vários obstáculos devem ser superados sendo necessário a incorporação de objetivos sociais e econômicos concomitantemente com os ambientais.

#### 7.4. O carbono azul

O carbono azul, nada mais é do que o carbono sequestrado pelos ecossistemas costeiros e marinhos, que compreende os pântanos salgados, as ervas marinhas e os manguezais, e que captam o CO<sub>2</sub> da atmosfera e dos oceanos, armazenando-o em suas plantas e no solo.

A maior parte desse carbono fica estocada no solo lamoso do manguezal, onde a ausência de oxigênio retarda, ou até impede completamente, a decomposição da matéria orgânica que está soterrada ali. O resultado é um reservatório natural de longo prazo que pode ser encarado tanto como um tesouro enterrado quanto uma bomba-relógio prestes a ser detonada, dependendo do que acontecer com esses ecossistemas daqui para frente. Se os manguezais forem protegidos e esse carbono permanecer no solo, ótimo! Se eles forem destruídos e esse carbono for parar na atmosfera, será como borrifar gasolina no fogo do aquecimento global.

Para ter uma ideia, os manguezais e pântanos salgados conseguem sequestrar entre 6 e 8 toneladas de carbono equivalente por hectare anualmente, e as ervas marinhas sequestram em torno de 10% de todo o carbono dos sedimentos oceânicos todos os anos, cerca de duas vezes mais do que as florestas terrestres.

O carbono azul é de extrema importância para mitigar as mudanças climáticas, uma vez que os ecossistemas costeiros e marinhos conseguem sequestrar e armazenar quantidades significativas dos GEE, que são os grandes vilões na aceleração dessas mudanças.

A preservação desses ecossistemas é essencial para as metas globais de desenvolvimento sustentável, conjuntamente com outras medidas socioambientais, como a erradicação da pobreza, a transição energética para o uso de fontes de energia renováveis e limpas, crescimento econômico baseado no trabalho decente, redução das desigualdades, entre outros.

## **VIII - MERCADO DE CARBONO**

### **8.1. Conceito de mercado de carbono**

O conceito mercado de carbono surgiu no ano de 1992, durante a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (ECO-92), no Rio de Janeiro. Essa iniciativa visa reduzir as emissões globais de GEE, promovendo um desenvolvimento sustentável para os países.

Para se entender o que é o mercado de carbono, é necessário conhecer o que são créditos de carbono. Um crédito de carbono corresponde a uma tonelada de CO<sub>2</sub> que deixou de ser emitida para a atmosfera ou sequestrada da atmosfera. Como é sabido, o CO<sub>2</sub> é um dos principais GEE, liberado por práticas como o desmatamento, que liberam o carbono armazenado nas árvores.

O mercado de créditos de carbono, portanto, é um sistema de negociação de créditos de carbono, que são certificados emitidos para quantificar a redução ou a remoção de GEE da atmosfera (Fig.45). Um crédito de carbono representa a compensação de uma tonelada de CO<sub>2</sub> ou seu equivalente em outros GEE, como o óxido nitroso, que tem potencial de poluição 300 vezes maior que o CO<sub>2</sub> e pode ser emitido em decorrência da utilização de fertilizantes nitrogenados sintéticos.

Diante da necessidade de políticas climáticas mais eficientes, os créditos de carbono podem ser negociados tanto no mercado nacional quanto internacional. Empresas

ou países, que emitem mais CO<sub>2</sub> do que o permitido, precisam adquirir créditos de projetos ou organizações que reduziram ou capturaram essas emissões.

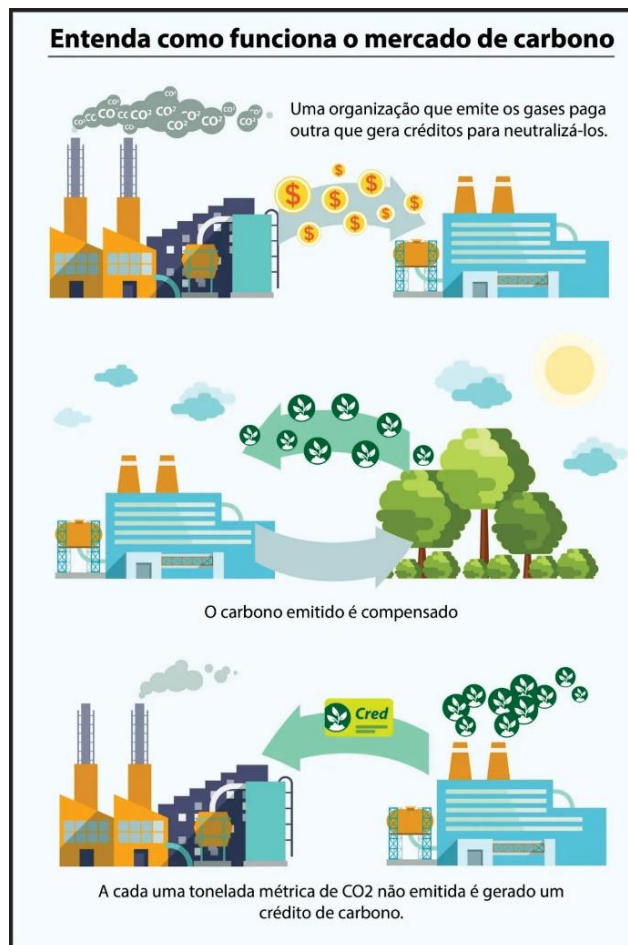


Figura 45. Funcionamento do Mercado de Carbono.

(modificado: [https://s2-g1.glbimg.com/SqK-pRZNIbIsLG7IiEpPqW6bmA=/0x0:2732x4310/984x0/smart/filters:strip\\_icc\(\)/1.s3.glbimg.com/v1/AUTH\\_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal\\_photos/bs/2021/A/M/J27E3CRiARRWJQvBaPlw/infografico-mercado-carbono-03.png](https://s2-g1.glbimg.com/SqK-pRZNIbIsLG7IiEpPqW6bmA=/0x0:2732x4310/984x0/smart/filters:strip_icc()/1.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2021/A/M/J27E3CRiARRWJQvBaPlw/infografico-mercado-carbono-03.png))

Atualmente, os créditos de carbono podem ser comercializados e estão se tornando um potencial commodities do agronegócio. Instituições como Indigo e Imaflora (Instituto de Manejo de Certificação Florestal) são capazes de mensurar a quantidade de carbono sequestrado nas propriedades (Souza, 2024).

A Indigo gera créditos de carbono através do programa *Carbon by Indigo*, que realiza a amostragem de solo e modelagem das propriedades rurais, para medir o sequestro de carbono. Os agricultores que adotam práticas mais sustentáveis como plantio direto, utilização de bioinsumos, rotação de culturas, podem gerar créditos (Souza, 2024).

Os créditos da Indigo são validados com uma entidade externa, como por exemplo a *Climate Action Reserve* e vendidos para empresas comprometidas com práticas ESG (Ambiental, Social e Governança), beneficiando os produtores e o meio ambiente.

O Imaflora comercializa créditos gerados a partir de projetos de preservação florestal e de práticas agrícolas sustentáveis. A mensuração acontece na plataforma *Carbon on Track*, que permite estimar a redução das emissões e a captura do carbono da atmosfera.

Após a mensuração ocorre as certificações por órgãos internacionais, como o caso a VCS (*Verified Carbon Standard*), no qual os créditos gerados são vendidos para empresas ou pessoas, e o valor arrecado pelo Imaflora é reinvestido para comunidades locais e na conservação ambiental.

Durante a COP 26 (Conferência das Nações Unidas sobre o Clima), que foi realizada na Escócia, um dos temas discutido foi a monetização dos créditos de carbono.

A *ABCcarbon* exemplifica a verificação e mensuração de carbono em áreas florestais, onde uma mata fechada pode gerar entre 200 e 210 créditos por hectare, enquanto floresta pode render até 140 créditos de carbono por hectare. A média de valor se dá por volta de R\$25 por crédito de carbono.

## **8.2. Mercado de carbono no Brasil.**

A União Europeia saiu na frente com seu Regime de Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), em 2003, enquanto outros países levaram um tempo maior para estabelecer suas normas de limite de emissão de GEE e consolidar um mercado de carbono.

Durante um bom tempo, participamos apenas na forma de proponente de projetos através do Mecanismo do Desenvolvimento Limpo (CND), sem termos estabelecido metas definidas.

A partir da assinatura do Acordo de Paris, o cenário mundial mudou e o Brasil passou a estabelecer metas, as chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND), bem como o estabelecimento e a regulamentação de leis.

Em 2015, o Brasil apresentou a CND com metas de redução em 37% de suas emissões até 2025, tendo como base as emissões de 2005 e 43% de redução de emissões até 2030. A atualização da CND brasileira em 2020 manteve as metas, mas não considerou a atualização do cálculo base de 2005, que após aprimoramento da metodologia, resultou no aumento de emissões líquidas usadas de 2,1 GtCO<sub>2</sub>e para 2,8 GtCO<sub>2</sub>e. Em 2022, o governo brasileiro enviou um novo documento com atualização da CND no qual se compromete em reduzir suas emissões, em 2025, em 37% em

comparação com 2005, além de um compromisso de alcançar a neutralidade climática até 2050. No entanto, os compromissos assumidos na COP 26, para acabar com o desmatamento ilegal antes de 2030 e reduzir a emissão de metano, não foram incluídos. Enquanto outros países contam com acordos que definem uma série de propostas e estratégias econômicas para o combate às mudanças climáticas, como o Green New Deal, o Brasil fica aquém dessas estratégias, levando as empresas brasileiras a despenderem bastante energia por um mercado regulado de carbono.

No Brasil as ações vieram um pouco mais tarde, mas não de menor importância. Sancionada em 11 de dezembro de 2024, a Lei 15.042 instaura o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), dando um passo importante para gerar novas oportunidades de investimento, aliadas a práticas sustentáveis.

O mercado de carbono no Brasil é dividido em dois tipos principais: o mercado voluntário de carbono e o mercado regulado de carbono. Ambos os mercados possuem características bem distintas, entretanto são extremamente importantes para a promoção de práticas mais sustentáveis.

#### **a. Mercado Voluntário de Carbono:**

Empresas, instituições e cidadãos decidem voluntariamente reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, com menor burocracia. Os créditos de carbono podem ser gerados em qualquer lugar e não há metas específicas de redução.

Neste mercado uma das formas para geração de créditos pode incluir projetos de Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), onde o objetivo é recompensar financeiramente os países/organizações que preservam e mantêm a floresta em pé, muitos destes projetos acontecem na região da Amazônia(Fig.46).

Os princípios do mercado de carbono voluntário estabelecem que os projetos só podem gerar créditos de carbono se provarem que a redução de emissões não pode ocorrer sem o financiamento dos créditos e que as reduções de emissões de GEE devem ter efeitos duradouros, com impacto a médio e longo prazo.

A integridade deste mercado voluntário é garantida por meio de padrões de certificação, com processos de verificação e princípios. Os créditos de carbono também podem ser comercializados em mercados regulados. O preço das cotas vai depender da demanda dos atores que operam no Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) ou também denominado *cap and trade*.

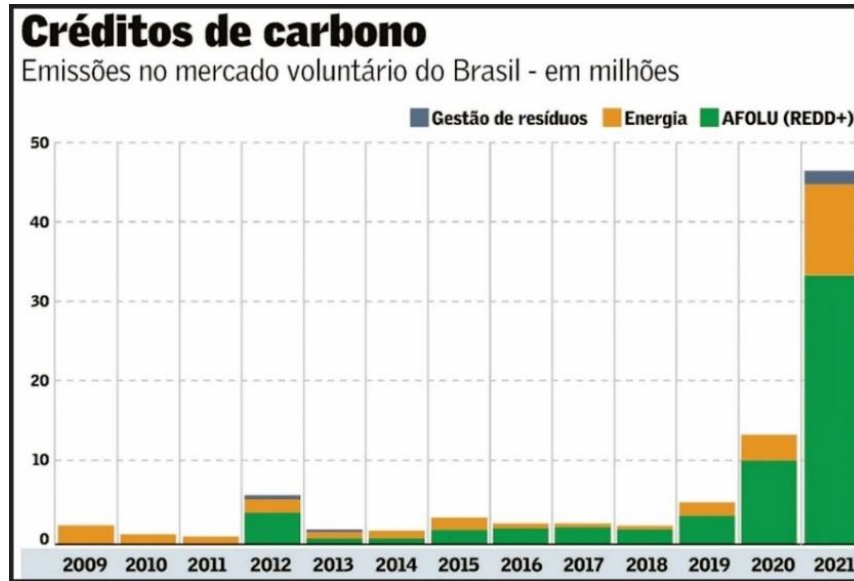


Figura 46. Crédito de carbono no mercado voluntário do Brasil.

(fonte: [https://s2-valor.glbimg.com/eIWldCmBN5lQeurhKx8yjEEvxRU=/984x0/smart/filters:strip\\_icc\(\)/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH\\_63b422c2caee4269b8b34177e8876b93/internal\\_photos/bs/2022/L/x/7sUbFSSHqFzEkPtnWPRg/arte19agr-201-carbono-b8.jpg](https://s2-valor.glbimg.com/eIWldCmBN5lQeurhKx8yjEEvxRU=/984x0/smart/filters:strip_icc()/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_63b422c2caee4269b8b34177e8876b93/internal_photos/bs/2022/L/x/7sUbFSSHqFzEkPtnWPRg/arte19agr-201-carbono-b8.jpg))

### b. Mercado Regulado de Carbono:

Esse é caracterizado pelo governo estabelecendo metas de emissões para as empresas. O objetivo é estimular o setor privado a reduzir as emissões de carbono e colaborar com as metas nacionais.

Este mercado possui maior burocracia e regras, de modo que as organizações podem comprar créditos de carbonos de outras, que reduziram as suas emissões, ajudando a equilibrar o compromisso ambiental.

O mercado de carbono no Brasil representa uma oportunidade crucial para o desenvolvimento sustentável. Com a implementação de políticas adequadas e o incentivo à inovação, ele pode contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (Fig.47).

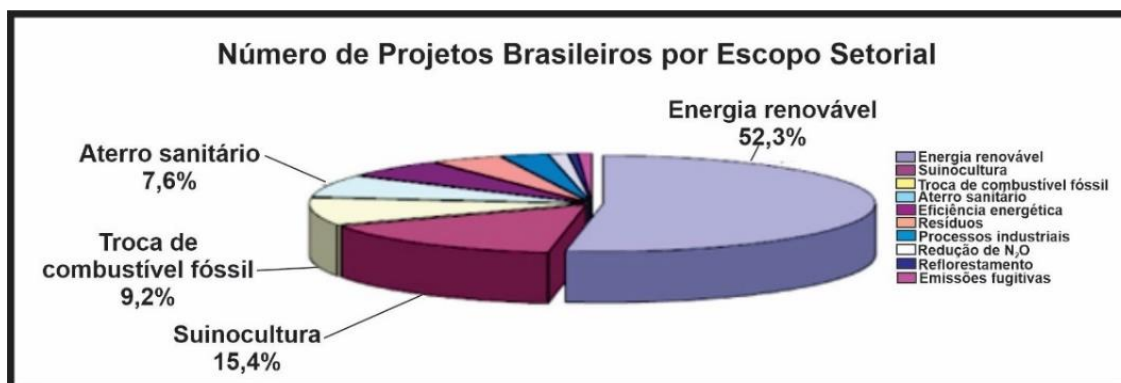


Figura 47. Número de projetos brasileiros do mercado regulado de carbono por escopo setorial.

(modificado: <https://minio.scielo.br/documentstore/1984-9230/DWXT3BmCyyXRtk7yDwdrPpG/ecfbbfca324d45cdd23d6bdd618bf65b72671b78.jpg>)

A Câmara dos Deputados aprovou em 19/11/2024 o projeto de lei (Lei 15.042/2024) que cria um mercado de carbono regulado no Brasil, colocando um “preço” nas emissões dos GEE. O objetivo é ajudar o país a cumprir sua meta climática de redução de emissões de gases.

O projeto de lei institui um sistema, supervisionado pelo governo, no qual empresas e indústrias terão cotas máximas de emissão – como se fossem licenças para emitir até determinado volume dos GEE. Aquelas que emitirem menos poderão vender a diferença, enquanto as que emitirem mais terão que comprar essas sobras ou adquirir ativos representativos de remoção de gases.

O setor de energia, assim como outros setores da economia, será impactado pela criação do mercado regulado de carbono. A penalização financeira sobre atividades mais poluentes aumentará a pressão pela descarbonização do consumo energético, especialmente em setores de difícil abatimento como a indústria. Isso pode levar a um aumento no custo de produtos e serviços em cadeias produtivas que dependem de combustíveis fósseis. Por outro lado, as fontes renováveis de energia, poderão ser impulsionadas por sua capacidade de gerar receitas adicionais por meio da comercialização de créditos de carbono. No entanto, é importante notar que o valor esperado dessa receita ainda é limitado, o que pode restringir seu impacto positivo.

O novo Sistema Brasileiro de Comercialização de Emissões (SBCE) deve contribuir para a diminuição das emissões poluentes do país ao incentivar a descarbonização da economia, ou seja, a substituição, por fontes limpas, de práticas industriais e processos de geração de energia que utilizam combustíveis fósseis.



Mercado Global de Carbono

[https://static.portaldaindustria.com.br/portaldaindustria/noticias/media/imagem\\_plugin/ilustracaomercadodecarbono.jpg](https://static.portaldaindustria.com.br/portaldaindustria/noticias/media/imagem_plugin/ilustracaomercadodecarbono.jpg)

## IX - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

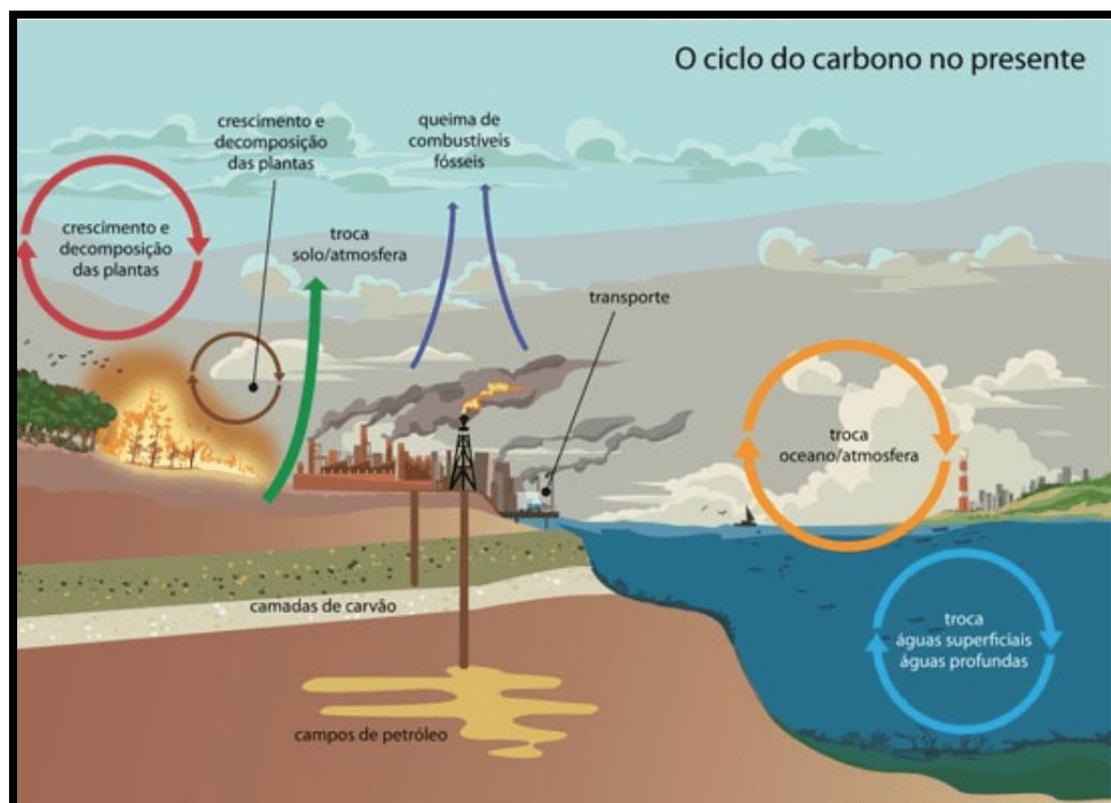
- Adams, J., Grobler, A., Rowe, C., Riddin, T., Bornman, T., & Ayres, D. 2012. Plants traits and spread of the invasive salt marsh grass, *Spartina alterniflora* Loisel. In : the Great Brak Estuary, South Africa. *African Journal of Marine Science*. 34(3): 313–322. DOI: 10.2989/1814232x.2012.725279.
- Alongi, D.M. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 6:19 –219. DOI: 10.1146/annurev-marine-010213-135020.
- Bayer, C.; Martin Neto, L.; Mielniczuk, J. & Pavinato, A. 2004. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:677-683.  
<https://www.scielo.br/j/pab/a/Yjx6VpKBbYcHtZ57ywF5HJg/>
- Bernoux, M. & Volkoff, B. 2006. Soil carbon stock in soil ecoregions of Latin America. In: Lal, R.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Etchevers, J. & Cerri, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, p.65-75.  
[https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers21-02/010041692.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-02/010041692.pdf)
- Boddey, R.M.; Jantalia, C.P.; Macedo, M.O.; Oliveira, O.C.; Resende, A.S.; Alves, B.J.R. & Urquiaga, S. 2006. Potential of carbon sequestration in soils of the Atlantic Region of Brazil. In: Lal, R.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Etchevers, J. & Cerri, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, p.305-347.  
<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/QKJZTHq3WhVSXHgVMyskHCL/>
- Bustamante, M.M.C.; Corbeels, M.; Scopel, E.; Roscoe, R. 2006. Soil carbon and sequestration potential in the Cerrado Region of Brazil. In: Lal, R.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Etchevers, J.; Cerri, C.E.P., Eds. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth. p.285-304.
- Cadena, S. & Ochoa-Gómez, J. 2023. Mangroves: ‘superhero’ ecosystems. *Front. Young Minds*. 11:812948. DOI: 10.3389/frym.2022.812948.  
<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2022.812948>
- Caldas, R.L. 2024. Ferramentas de quantificação das emissões de carbono aplicadas a edificações: um guia para auxiliar na escolha. *ArchDaily Brasil*. ISSN 07 19-8906.  
<https://www.archdaily.com.br/br/1019174/ferramentas-de-quantificacao-das-emissoes-de-carbono-aplicadas-a-edificacoes-um-guia-para-auxiliar-na-escolha>.
- Cerri, C.E.P. 2023. Sequestro de carbono no solo. *ABREFEN*.  
<https://abrefen.org.br/2023/06/26/sequestro-de-carbono-no-solo/>.
- Cerri, C.E.P.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Volkoff, B. & Rondón, M.A. 2006. Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: Lal, R.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Etchevers, J. & Cerri, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, p.245-266. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers21-02/010041694.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-02/010041694.pdf)
- Cerri, C.E.P.; Easter, M.; Paustian, K.; Killian, K.; Coleman, K.; Bernoux, M.; Powlson, D.S.; Batjes, N.H.; Milne, E. & Cerri, C.C. 2007. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 122:58-72. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880907000370>

- Ciesla, W.M.; Mbugua, D.K. & Ward, J.D. 1995. Ensuring forest health and productivity: A perspective from Kenya. *J. For.*, 93:36-39.
- Conant, R.T. & Paustian, K. 2002. Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems. *Global Biogeochem. Cycles* 16 :1143. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2001GB001661>
- Conant, R.T. ; Paustian, K. & Elliott, E.T. 2001. Grassland management and conversion into grassland: effects of soil carbon. *Ecological Application*, 11:343-355. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[0343:GMACIG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[0343:GMACIG]2.0.CO;2)
- Diaz-Filho, M.B.; Davidison, E.A.; Carvalho, C.R.J. 2001. Linking biogeochemical cycles to cattle pasture management and sustainability in the Amazon basin. In: McClain, M.E.; Victoira, R.L.; Richey, J.E. (Ed.). *The biogeochemistry of Amazon basin*. New York: Oxford University Press, 84-105.
- Dino, R. & Gallo, Y.Le. 2009. CCS Project in Recôncavo Basin. *Energy Procedia*, 1(1) :2005-2011. ISSN 1876-6102. <https://www.sciencedirect.com/journal/energy-procedia/vol/1/issue/1?page=3>
- Eddy, S. ; Milantara, N. ; Sasmito, S.D.; Kajita,T. & Basyuni, M. 2021. Anthropogenic Drivers of Mangrove Loss & Associated Carbon Emissions in South Sumatra, Indonesia. *Forestes* 12(2) :187. <https://doi.org/10.3390/F12020187>.
- EMBRAPA. 2004. Levantamento e mapeamento dos remanescentes da cobertura vegetal do bioma Pantanal, período de 2002, na escala de 1:250.000. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária. 43 p.
- EOS Data Analytics, 2024. Sequestro de Carbono: Como Funciona e Exemplos. <https://eos.com/pt/blog/sequestro-de-carbono/>
- Fearnside, P.M. & Barbosa, R.I. 1998. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *For. Ecol. Manag.*, 108:147-166. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112798002229>
- Feldpausch, T.R., Phillips, O.L., Brien, R.J.W., Gloor, E., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Alarcón, A., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragao, L.E.O.C, Arroyo, L., Aymard C.A., Baker, T.R., Baraloto, C., Barroso, J., Bonal, D., Castro, W., Chama, V., Chave, J., Domingues, T.F., Fauset, S., Groot, N., Honorio Coronado, E., Laurance, S., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Licona, J.C., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Mendoza Bautista, C., Neill, D.A., Oliveira, E.A., Oliveira dos Santos, C., Pallqui Camacho, N.C., Pardo-Molina, G., Prieto, A., Quesada, C.A., Ramírez, F., Ramírez-Angulo, H., Réjou-Méchain, M., Rudas, A., Saiz, G., Salomão, R.P., Silva-Espejo, J.E., Silveira, M., ter Steege, H., Stropp, J., Terborgh, J., Thomas-Caesar, R., van der Heijden, G.M.F., Vásquez Martinez, R., Vilanova, E. & Vos, V.A. 2016. Amazon forest response to repeated droughts. *Global Biogeochemical Cycles*; DOI: 10.1002/2015GB005133. <https://brasil.mongabay.com/2016/12/estudo-seca-impede-o-crescimento-de-arvores-e-prejudica-o-sequestro-de-carbono-da-amazonia/>.
- Foley, J.A.; Defries, R.; Asner, G.P.; Barford, C.; Bonan, G.; Carpenter, S.R.; Chapin, F.S.; Coe, M.T.; Daily, G.C.; Gibbs, H.K.; Helkowski, J.H.; Holloway, T.; Howard, E.A.; Kucharik, C.J.; Monfreda, C.; Patz, J.A.; Prentice, I.C.; Ramankutty, N. & Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309:570-574.

- Friess, D.A. ; Yando, E.S.; Alemu, I.J.B.; Wong, L.W. ; Soto, S.D. & Bhatia, N. 2020. Ecosystem services and disservices of mangrove forests and salt marshes. *Oceanography and Marine Biology*, 58. <https://doi.org/10.1201/9780429351495-3>.
- Gob.br, 2024. Federal Government announces Amazon, Cerrado deforestation drop; concludes prevention pact. Notícias. <https://www.gov.br/planalto/en/latest-news/2024/11/federal-government-announces-amazon-cerrado-deforestation-drop-concludes-prevention-pact>.
- IBGE, 2004. <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?coduf=43>.
- ICMBio. 2018. Atlas dos Manguezais do Brasil. In: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Investment and Operational Decision-Making Based on Bibliometrics. *Energies*, 12, 23; doi:10.3390/en12010023. [https://www.researchgate.net/publication/361931789\\_Atlas\\_dos\\_manguezais\\_do\\_Brasil\\_ICMBio\\_2018](https://www.researchgate.net/publication/361931789_Atlas_dos_manguezais_do_Brasil_ICMBio_2018)
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2005. Safeguarding the ozone layer and the global climate system. <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. Climate Change and Land. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>.
- Jacovine, L.A.G.; Nishi, M.H.; Silva, M.L.; Valverde, S.R. & Alvarenga, A.P. 2006. A seringueira no contexto das negociações sobre mudanças climáticas globais. In: ALVARENGA, A.P. & CARMO, C.A.F.S. Sequestro de carbono: Quantificação em seringais de cultivo e na vegetação natural. Viçosa, MG, EPAMIG, p.1-41. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/338847>
- Ketzer, J.M.M., Machado, C.X., Rockett, G.C. & Iglesias, R.S. 2016. Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>. Editora Universitária PUCRS. Porto Alegre.95p. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/202033/atlas-brasileiro.pdf>
- Laurance, W.F.; Cochrane, M.A.; Bergen, S.; Fearnside, P.M.; Delamônica, P.; Barber, C.; D'Angelo, S. & Fernandes. T. 2001. The future of Brazilian Amazon. *Science*, 291:438-439.
- Li, R.; Hou, H.; Wang, P. & Yang, B. 2019. A Review of Carbon Capture and Storage Project Investment and Operational Decision-Making Based on Bibliometrics. *Energies*. 2019; 12(1):23. <https://doi.org/10.3390/en12010023>.
- Libes, S. 2011. Introduction to Marine Biogeochemistry. Países Baixos, Elsevier Science. ISBN-10: 9780120885305. 928 p.
- Machado, R.B.; Ramos Neto, M.B.; Pereira, P.G.P.; Caldas, E.F.; Gonçalves, D.A.; Santos, N.S.; Tabor, K. & Steininger, M. 2004. Estimativa de perda de área no Cerrado brasileiro. Relatório técnico não publicado. Brasília, Conservação Internacional.
- Maxwell, T.L., Spalding, M.D., Friess, D.A., Murray, M.J., Rogers, K., Rovai, A.S., Smart, L.S., Weiliguny, L., Adame, M.F., Adams, J.B., Austin, W.E.N., Copertino, M.S., Cott, G.M., Costa, M.D.P., Holmquist, J.R., Ladd, C.J.T., Lovelock, C.E., Ludwig, M., Moritsch, M.M., Navarro, A., Raw, J.L., Ruiz-Fernández, A.C., Serrano, O., Smeaton, C., Van de Broek, M., Windham-Myers, L., Landis, E. & Worthington, T.A. 2024. Soil

- carbon in the world's tidal marshes. *Nat Commun* 15, 10265. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54572-9>
- McSherry, M.E. & Ritchie, M.E. 2013. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, Oxford, 19(5) :1347-1357. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12144>
- MCTI, 2024. Meta da NDC brasileira para 2035 acelera velocidade de redução de emissões. Notícias. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/11/meta-da-ndc-brasileira-para-2035-acelera-velocidade-de-reducao-de-emissoes>.
- Mello, F.F.C.; Cerri, C.E.P.; Bernoux, M.; Volkoff, B. & Cerri, C.C. 2006. Potential of soil carbon sequestration for the Brazilian Atlantic Region. In: Lal, R.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Etchevers, J. & Cerri, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth. p.349-368. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers21-02/010041695.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-02/010041695.pdf)
- Miller, C.B., Rodriguez, A.B., Bost, M.C., McKee, B.A., & McTigue, N.D. 2022. Carbon accumulation rates are highest at young and expanding salt marsh edges. *Communications Earth and Environment*. 3(1). DOI: 10.1038/s43247-022-00501-x. <https://www.nature.com/articles/s43247-022-00501-x>
- Mueller, P., Ladiges, N., Jack, A., Schmiedl, G., Kutzbach, L., Jensen, K., & Nolte, S. 2019. Assessing the long-term carbon-sequestration potential of the semi-natural salt marshes in the European Wadden Sea. *Ecosphere*. 10(1). DOI: 10.1002/ecs2.2556. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecs2.2556>
- Paustian, K.; Six, J.; Elliott, E.T. & Hunt, H.W. 2000. Management options for reducing CO2 emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 48:147-163.
- Perera, N., Lokupitiya, E., Halwatura, D., & Udagedara, S. 2022. Quantification of blue carbon in tropical salt marshes and their role in climate change mitigation. *Science of the Total Environment*. 820: 153313. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153313
- Pillar, V.D., Tornquist, C.G. & Bayer, C. 2012. The southern Brazilian grassland biome: soil carbon stocks, fluxes of greenhouse gases and some options for mitigation. *Brazilian Journal Biologic*. 72(3)supl:673-681. <https://www.scielo.br/j/bjb/a/k7LXkN9YByZj4VpGX57ZQQm/>
- Rodrigues, P. 2018. Plantio direto tem potencial para sequestrar carbono na produção de hortaliças. EMBRAPA. <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/34126519/plantio-direto-tem-potencial-para-sequestrar-carbono-na-producao-de-hortalicas>.
- Ruiz-Fernández, A.C., Carnero-Bravo, V., Sanchez-Cabeza, J.A., Pérez-Bernal, L.H., Amaya-Monterrosa, O.A., Bojórquez-Sánchez, S., López-Mendoza, P.G., Cardoso-Mohedano, J.G., Dunbar, R.B., Mucciarone, D.A., & Marmolejo-Rodríguez, A. J. 2018. Carbon burial and storage in tropical salt marshes under the influence of sea level rise. *Science of the Total Environment*. 630: 1628–1640. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.246.
- Schimel, D. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, Oxford, 1 : 77-91.
- Schirmann, J. 2016. Balanço de carbono e emissão de gases de efeito estufa em campo nativo do bioma Pampa. 138f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em

- Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/144318>
- Six, J.; Feller, C.; Deneff, K.; Ogle, S.M.; Moraes, J.C. & Albrecht, A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22:755-775. <https://hal.science/hal-00885974v1/document>
- Soussana, J.F. 2009. Os desafios da ciência das pastagens europeias são relevantes para os Campos Sulinos? In: Pillar, V.D., Müller, S.C., Castilhos, Z.M.S. & Jacques, A.V.A. (Eds.). *Campos Sulinos: Conservação e Uso Sustentável da Biodiversidade*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. p. 331-344.
- Souza, R.C. 2024. Regulamentação do mercado de Carbono no Brasil: o que você precisa saber. *Agroadvance*. <https://agroadvance.com.br/blog-mercado-de-carbono-no-brasil/>.
- Strong, D.R., & Ayres, D. R. 2013. Ecological and evolutionary misadventures of *Spartina*. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 44(1): 389-410. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-110512-135803.
- Yu, C.; Feng, J.; Liu, K. ; Wang, G. ; Zhu, Y. ; Chen, H. & Guan, D. 2020. Changes of ecosystem carbon stocks following the plantation of exotic mangrove *Sonneratia apetala* in Qi'ao Island, China. *Science of the Total Environment*, 717, 137142. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137142>.



Ciclo do carbono no presente.  
(fonte: <https://sustentavel.com.br/wp-content/uploads/2019/12/Sequestro-de-carbono-1.png>)

## X - LEITURAS RECOMENDADAS

- Azevedo, A. D.; Francelino, M.R.; Camara, R.; Pereira, M.G. & Lelis, P.S.S. 2018. Estoque de Carbono em Áreas de Restauração Florestal da Mata Atlântica. *Floresta*, Curitiba, PR, 48(2): 183-194. ISSN eletrônico 1982-4688. DOI: 10.5380/rf.v48 i2.54447. <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/54447>
- Barreto, L.V.; Freitas, A.C.S. & Paiva, L.C. 2009. Sequestro de Carbono. Centro Científico Conhecer, Goiânia, Enciclopédia Biosfera nº7. ISSN 1809-058351. <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2009/sequestro.pdf>.
- Dziejarski, B.; Krzyżyńska, R. & Andersson, K. 2023. Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel* 342 (2023) 127776. <https://www.elsevier.com/locate/fuel>.
- IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf).
- Mariano Neto, M. & Silva, J.B. 2023. Estimativas dos Estoque de Carbono em Ecossistema de Manguezal no Brasil: Uma Revisão. *Geoambiente On-line*, 45. <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/75044/39787>
- Monteiro, C.P. 2023. Estoque de Carbono em Marismas: Panorama atual. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*. 27(2): 8-12. ISSN 1983-9057. DOI: 10.14210/bjast.v27n2.19332. <https://periodicos.univali.br/index.php/bjast/article/view/19332>
- Oliveira, E.S.; Realto, A. & Roig, H.L. 2015. Estoques de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, Brasília. 32(1/2):71-93. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1036784/1/Estoquesdecarbonodosolo.pdf>
- Sha, Z. ; Bai, Y. ; Li, R. ; Lan, H. ; Zhang, X. ; Li, J. ; Liu, X. ; Chang, S. & Xie, L. 2022. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. *Commun Earth Environ* 3, 8. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00333-1>

## XI - ABREVIATURAS

°C – Graus centígrados

**ABAL** – Associação Brasileira do Alumínio

**ABC'Terre** - é um método robusto e inovador para calcular o armazenamento de carbono em solos agrícolas e as emissões de GEE provenientes de sistemas de cultivo.

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ADEME** – Agence de la Transition Écologique (Agência de Transição Ecológica)

**AFORCE** – Rede de Adaptação das Florestas às Alterações Climáticas

**AGRIBALYSE** - é uma base de dados de referência de indicadores de impacto ambiental para produtos agrícolas produzidos na França e produtos alimentares consumidos na França.

**ALDO** - é uma ferramenta ADEME, fácil de usar, de código aberto e acessível online, está disponível gratuitamente e sem download.

**ALZ** – Artificialização Líquida Zero

**Apremavi** – Associação de Prevenção do meio Ambiente e da Vida

**ARA** – Arco da Restauração na Amazônia

**ARBOClimat** – Ferramenta para facilitar o estabelecimento de árvores com ativos máximos, tendo em conta o clima atual e futuro.

**BID** – Banco Interamericano de Desenvolvimento

**BIP** – Plano Brasil de Investimentos Climáticos e para a Transformação Ecológica

**BNDE** – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

**C** – Carbono

**CCS** – Captura e Armazenamento de CO<sub>2</sub>

**CCs** – Créditos de Carbono

**CDA** – Captura Direta do Ar

**CELE** – Regime de Comércio Europeu de Licenças de Emissão

**CFT** – Carta Florestal Territorial

**CND** – Contribuição Nacionalmente Determinada

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de carbono

**Conaflor** – Comissão Nacional de Florestas

**COP** - Conferência das Nações Unidas sobre o Clima

**COS** – Carbono Orgânico do Solo

**CRPF** – Centro Regional de Propriedade Florestal

**ECS** – Estoque de Carbono no Solo

**EOS Data Analytics** - empresa que fornece análises de imagens de satélite para a agricultura e silvicultura.

**EPCI** – Estabelecimentos Públicos de cooperação Intermunicipais

**ERC** – Evitar-Realizar-Compensar

**ESG** – Indicativo Ambiental, Social e Governança.

**FA** – Fundo Amazônia

**FC** – Fundo Clima

**fck** - Resistência Característica do Concreto à Compressão

**g** – Grama (unidade de medida de massa do Sistema Internacional, equivalente a 0,001 kg)

**GEE** – Gases de Efeito Estufa

**GEEe** – Gases de Efeito Estufa Equivalente

**GES URBA** - Aplicativo de apoio à decisão para integrar as questões de energia-clima em projetos territoriais.

- Gt** – Gigatoneladas (unidade de medida de massa do Sistema Internacional, equivale a um bilhão de toneladas).
- GtCO<sub>2e</sub>** – Gigatoneladas de Carbono equivalente
- H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** – Ácido carbônico.
- ha** – Hectare (medida de área que equivale a 10.000 metros quadrados).
- HNL** – Higt-Nurient Low-Chorophyll
- Imaflora** – Instituto de Manejo de Certificação Florestal.
- Indigo** – Empresa que emite créditos de carbono a partir de práticas agrícolas sustentáveis.
- Infosol** - Unidade do INRAE (Institut National de Recherche en Agriculture, Alimentation et Environnement) que se dedica a estudar e gerir os solos da França
- INRAE** - Institut National de la Recherche Agronomique
- IPCC** – Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas
- IPE** – Instituto de Pesquisas Ecológicas
- kg** – Quilograma (unidade de medida de massa do Sistema Internacional, equivalente a 10<sup>3</sup> gramas)
- kgCO<sub>2</sub>/kg** – Quilograma de dióxido de carbono por quilo
- kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>** – Quilograma de dióxido de carbono equivalente por metro quadrado
- MCID** – Ministério das Cidades
- MCTI** – Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações
- Mha** – Milhões de hectares
- Mha/ano** – Milhões de hectares por ano
- MMA** – Ministério do meio Ambiente e Mudanças do Clima
- MME** – Ministério de Minas e Energia
- MPa** – Megapascal (unidade de medida de pressão, tensão ou resistência de materiais).
- Mt** – Milhões de toneladas
- MWh** – Mega watt-hora (unidade de medida que quantifica a quantidade de energia elétrica gerada ou consumida em um determinado período).
- N<sub>2</sub>O** – Óxido nitroso
- NC** – Neutralidade de Carbono
- ONG** – Organização Não-Governamental
- ONU** – Organização das Nações Unidas
- PEIB** – Programa Eco Invest Brasil
- Pg** – Petagrama (unidade de medida de massa do Sistema Internacional, equivalente a 10<sup>15</sup> gramas).
- PLPU** – Planos Local de Planejamento Urbano
- PLU** – Plano Locais de Planejamento Urbano
- PMS** – Plano de Manejo Simples
- PNF** – Plano Nacional de Florestas
- POV** – Projeto Onda Verde
- PPCDAm** – Plano de Ação para Prevenção e Controle de Desmatamento na Amazônia Legal
- PPCerrado** – Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado
- PRGS** – Plano Regional de Gestão Silvicultura
- PTE** – Plano de Transformação Ecológico
- PUL** – Plano Urbano Local
- PULI** – Plano Urbano Local Intermunicipal

**RCT** – Regime de Coerência Territorial

**REDD+** - Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal

**RPG Explorer** - é um software gratuito que permite a valoração de declarações anuais de áreas agrícolas (RPG). Esse fornece suporte científico e técnico para a implementação de políticas públicas relativas aos territórios agrícolas, seja para um melhor diagnóstico da situação inicial ou para monitorar os efeitos das políticas na dinâmica do uso da terra. Foi especialmente desenvolvido para facilitar o processamento para pessoas que não são especialistas em GIS.

**SADAPT** - Desenvolvimento de Ações Científicas - Atividades Produtos Territórios UMR INRAE Agroparistech

**SBC** – Selo de Baixo Carbono

**SBCE** – Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões

**SIMEOS-AMG** - é uma ferramenta de simulação da evolução do estado orgânico dos solos (teores e estoques de carbono orgânico) baseada no modelo de balanço húmico AMG\* e disponibilizada online pela primeira vez em 2012.

**SPD** – Sistema de Plantio Direto

**t** – Tonelada (unidade de medida de massa, do Sistema Internacional, equivalente a 10<sup>6</sup> gramas).

**tC** – Toneladas de carbono

**tC/h/ano** – Tonelada de carbono por hectare por ano

**tCO<sub>2</sub>** – Tonelada de dióxido de carbono

**tCO<sub>2</sub>eq** – Tonelada de dióxido de carbono equivalente

**TFTS** – Fundo Florestas Tropicais para Sempre

**Tg** – Teragrama (unidade de medida de massa do Sistema Internacional, equivalente a 10<sup>12</sup> gramas).

**Tg/ano** – Teragrama por ano

**TNC** – The Nature Conservancy

**TSB** – Taxonomia Sustentável Brasileira

**TSS** – Títulos Soberanos Sustentáveis

**UNFCCC** – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

**UPGN** – Unidade de Produção de Gás Natural

**VCCs** – Venda de Créditos de Carbono

**VCS** – Verified Carbon Standard

## XII - ALGUNS SITES DE INTERESSE

**ABC'Terre** - <https://www.agro-transfert-rt.org/abcterre/>

**ADEME** - <https://www.ademe.fr/>

**ALDO** - <https://www.territoires-climat.ademe.fr/actualite/loutil-aldopourune->

**ARBOClimat** - <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/arboclimat-base-de-donnees-de-simulation-simple/#/resources>  
premiere-estimation-de-la-sequestration-carbone-dans-les-sols-et-la-biomasse

## **XIII - GLOSSÁRIO**

- ABC'Terre** - é um método robusto e inovador para calcular o armazenamento de carbono em solos agrícolas e as emissões de GEE provenientes de sistemas de cultivo.
- Abiótica** - quando um fator ambiental vem a exercer influência sobre o meio, mas não tem sua origem em um organismo.
- Acordo-quadro** - contrato entre uma ou mais entidades (geralmente públicas) e uma ou mais entidades (fornecedores, prestadores de serviços etc.) que define os termos e condições gerais para futuras relações contratuais.
- Adsorvido** - processo pelo qual átomos, moléculas ou íons são retidos na superfície de sólidos através de interações de natureza química ou física.
- Aflorestamento** - plantio de novas florestas em áreas que anteriormente não tinham cobertura florestal.
- Agribalyse** - é uma base de dados que avalia impacto ambiental de alimentos. É destinada a profissionais da área agrícola e alimentar, pesquisa e ONGs.
- Agroalimentar** - adjetivo que se refere à alimentação e à agricultura, ou seja, à produção, transformação e armazenamento de alimentos de origem agrícola.
- Agroecologia** - modelo de produção agrícola que visa a sustentabilidade, sem o uso de agrotóxicos.
- Agrossilvicultura** - prática de combinar árvores ou outras espécies lenhosas com culturas agrícolas ou pecuárias.
- Alérgenos** - são substâncias que podem causar reações alérgicas em pessoas suscetíveis. Essas reações podem ser graves e podem ocorrer após contato dérmico, inalação ou ingestão.
- Anóxica** - adjetivo que significa relativo à anoxia, ou seja, à falta de oxigênio.
- Antrópico** - relativo ao ser humano ou às suas ações.
- Antropizado** - em geografia e ecologia, refere-se a áreas ou paisagens que foram alteradas por atividades humanas, como urbanização, agricultura, mineração, construção de infraestruturas, entre outras.
- Arrefecimento** - ato de baixar a temperatura ou de eliminar o excesso de calor.
- Azoto** - também conhecido como nitrogênio, é um elemento químico que compõe 78% da atmosfera terrestre.
- Betume** - substância mineral natural ou artificial, derivada do petróleo, que é usada em pavimentos e para impermeabilizar.
- Bioassimilação** - processo que consiste na modificação física ou química, causada pela ação de microrganismos, sob determinadas condições de calor, umidade, luz, oxigênio e nutrientes orgânicos e minerais adequados.
- Biodiversidade** - variedade de vida existente no planeta, incluindo todos os seres vivos, os ecossistemas que os abrigam e a diversidade genética entre eles.
- Bioinsumo** - produto de origem biológica, como microrganismos, plantas ou animais, usado na agricultura, aquicultura e silvicultura.
- Bioma** - conjunto de vida vegetal e animal que compartilha características geográficas e climáticas. É uma unidade biológica que abriga diferentes tipos de fauna e flora.

- Biomassa** - matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, que pode ser usada para produzir energia.
- Biorresíduo** - resíduo orgânico que se degrada naturalmente por micro-organismos do meio ambiente.
- Biótica** - adjetivo que significa relativo à vida. É um termo usado em biologia e ecologia.
- Biótopo** - conjunto de condições físicas e químicas que caracterizam um ecossistema ou bioma.
- Caatinga** - bioma exclusivamente brasileiro, localizado na região Nordeste do país. É caracterizada por um clima semiárido e uma vegetação que perde as folhas na estação seca.
- Cap and trade** - é um sistema de gestão ambiental que estabelece um limite para as emissões de gases de efeito estufa (ou outras substâncias poluentes) e permite que as empresas negociem permissões para poluir, com o objetivo de reduzir a emissão de forma mais eficiente e econômica
- Carcinicultura** - atividade de criação de camarões em cativeiro, com o objetivo de produção comercial.
- Cobenefício** - termo que se refere a uma situação em que alguém beneficia de algo em conjunto com outra pessoa.
- Coconstrução** - processo no qual há interações entre professor e estudante(s), ou entre os próprios estudantes, que resulta em construção de conhecimento.
- Codesign** - abordagem de design que envolve a participação de usuários-alvo no processo de criação de soluções.
- Contributo** - aquilo com que se contribui; contribuição.
- Descarbonizar** - processo de reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), na atmosfera.
- Desestocagem** – ação de desestocar.
- Ecossistema** - conjunto de seres vivos e não vivos que interagem entre si e com o meio ambiente.
- Evapotranspiração** - quantidade de água que evapora e transpira da superfície terrestre, indo para a atmosfera.
- Exploração** - ação de explorar, de tirar proveito financeiro de uma terra ou área, buscando seus recursos naturais.
- Exsudato** - saída de líquidos orgânicos através das paredes e membranas celulares, tanto de animais quanto de plantas, por lesão ou por inflamação.
- Feedback** - comunicação de uma opinião ou avaliação sobre uma pessoa, um produto, um serviço ou uma empresa.
- Fitoplâncton** - importante produtor primário em ecossistemas aquáticos, representando a base da cadeia alimentar.
- Fitossanitário** – processos, produtos e tecnologias destinados à sanidade vegetal, ou seja, ao controle de pragas e doenças.
- Forrageira** - gramínea anual que apresenta alta produção e qualidade de forragem.
- Fotossíntese** - processo realizado por plantas e outros organismos para converter a energia luminosa em energia química.

- Grafeno** - material formado por uma folha de átomos de carbono, que é muito forte, leve, flexível, transparente e condutor de eletricidade e calor.
- Halófitas** - plantas terrestres que estão adaptadas a viverem no mar ou próximo dele, sendo tolerantes à salinidade.
- Hidromorfismo** - em termos de pedologia, refere-se às alterações no solo causadas pelo encharcamento permanente ou semipermanente, ou seja, pela saturação do solo com água.
- Hipersalina** - corpo de água que contém concentrações altas de cloreto de sódio ou outros sais, com níveis salinos que ultrapassam os da água do mar.
- Hiperxerófila** - refere-se a um tipo de vegetação que ocorre em áreas muito secas, com condições climáticas extremas.
- Hipoxerófila** - vegetação adaptada a regiões semiáridas com solos mais profundos e um índice pluviométrico relativamente maior.
- Lábeis** - pode ser usado para descrever coisas que são voláteis, transitórias ou instáveis, ou seja, que mudam ou desaparecem rapidamente.
- Layout** – disposição e organização dos elementos visuais em uma página, tela ou espaço físico.
- Metanização** - processo biológico, baseado na degradação por bactérias (ou micro-organismos) da matéria orgânica. Essa reação ocasiona a produção de biogás, uma mistura gasosa saturada em água com grande poder energético.
- Microbiana** - adjetivo que significa relativo a micróbio, ou seja, que contém micróbios ou é causado por eles.
- Mitigação** - intervenção humana para reduzir as emissões por fontes de gases de efeito estufa e fortalecer as remoções por sumidouros de carbono, tais como florestas e oceanos.
- Neotrópico** - região biogeográfica que abrange a América Central e do Sul, e parte dos Estados Unidos e México. É uma região de grande biodiversidade, com climas tropical, temperado e de altitude.
- Pastejada** - sistema em que os animais permanecem na mesma área de pasto durante o ano inteiro.
- Pedoclimática** - interação entre a disponibilidade de água no solo e a evapotranspiração.
- Pedológico** – termo relativo ao estudo do solo.
- Pedólogo** – indivíduo especializado no estudo dos solos no seu ambiente natural.
- Poaceae** - é uma família de plantas das angiospermas da classe Liliopsida, subclasse Commelinidae, também conhecidas como capins, gramas ou relvas.
- Reflorestamento** - técnica de recuperar áreas desmatadas, plantando árvores e vegetação nativa.
- Resiliência** - capacidade de uma pessoa ou ambiente lidar com adversidades, superar problemas e se adaptar a mudanças.
- Saprófagos** - são organismos, como certos tipos de fungos e bactérias, que obtêm seu alimento decompondo matéria orgânica morta.
- Sebes** - são cercas vivas formadas por plantas lenhosas, como arbustos e árvores, plantadas de forma densa.

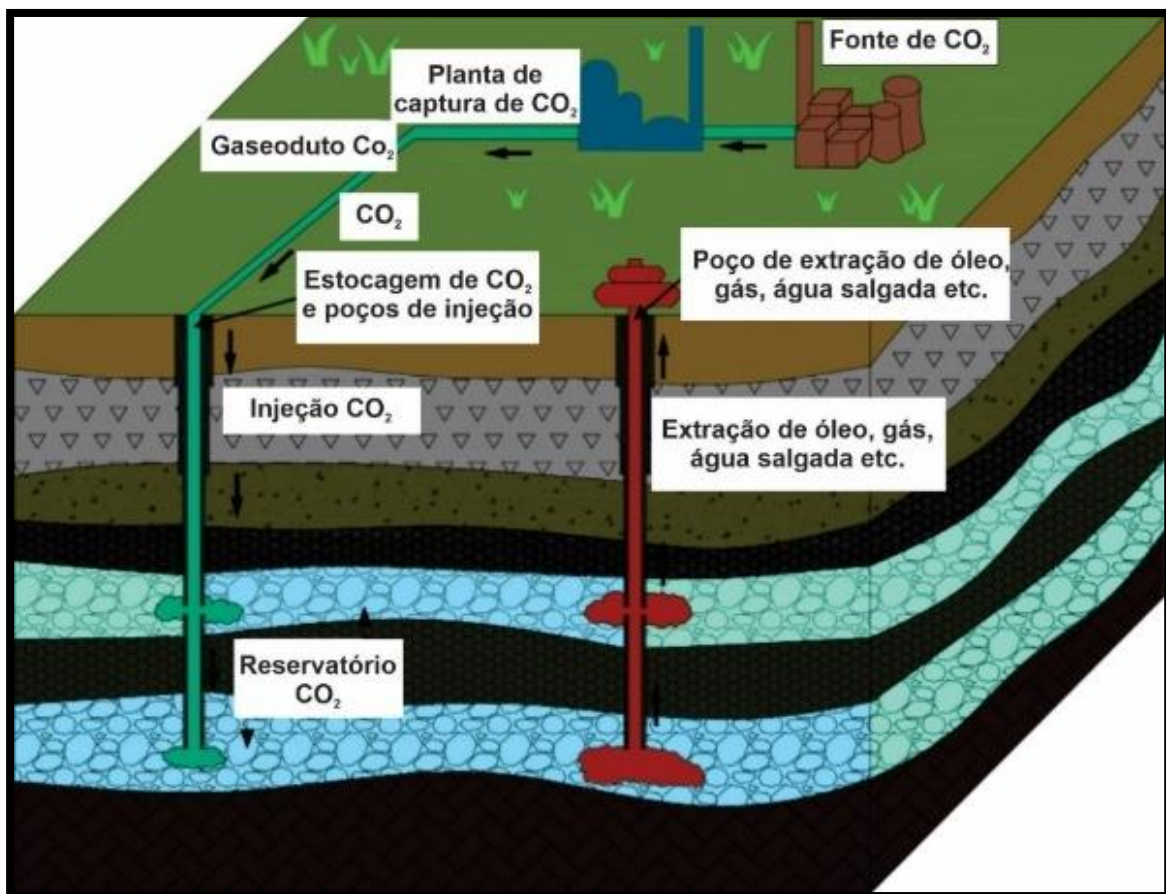
**Silvicultura** - é a ciência e a prática de cultivar florestas para produzir madeira, papel, biomassa e outros derivados florestais.

**Simbiótica** - refere-se à simbiose, um conceito biológico que descreve a interação entre duas espécies diferentes em que ambas se beneficiam.

**SIMEOS-AMG** - é uma ferramenta para simular a evolução do estado solo orgânico (valores de carbono orgânicos e estoques) com base no modelo de balanço húmico AMG e colocado online pela primeira vez em 2012.

**Termoalina** - movimento das águas dos oceanos, causado por diferenças de densidade entre as massas de água. Essas diferenças são devidas a variações de temperatura (termo) e salinidade (halina).

**Unité InfoSol** - é uma unidade de serviço do INRAE (Institut National de la Recherche Agronomique) que se dedica à gestão e criação de sistemas de informação sobre o solo francês.



Esquema geral do conceito de captura e armazenamento de carbono.

(modificado: Li, et al., 2019)

