



Universidade de Brasília

FACULDADE UnB PLANALTINA – FUP

GRADUAÇÃO EM LICENCIATURA EM CIÊNCIAS NATURAIS

**MODELAGEM DE SISTEMAS APLICADA À ECOLOGIA:
UMA ABORDAGEM SOB A PERSPECTIVA DA DINÂMICA
DE SISTEMAS**

Autora: Camila Silva Rodrigues

Orientador: Prof. Ismael Victor de Lucena Costa

Coorientador: Luiz Fernando Roncaratti Junior

Brasília - DF

Junho de 2025



Universidade de Brasília

FACULDADE UNB DE PLANALTINA – FUP

GRADUAÇÃO DE LICENCIATURA EM CIÊNCIAS NATURAIS

**MODELAGEM DE SISTEMAS APLICADA À ECOLOGIA:
UMA ABORDAGEM SOB A PERSPECTIVA DA DINÂMICA
DE SISTEMAS**

Autora: Camila Silva Rodrigues

Orientador: Prof. Ismael Victor de Lucena Costa

Coorientador: Luiz Fernando Roncaratti Junior

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Banca Examinadora, como exigência parcial
para a obtenção de título de Licenciado do Curso
em Ciências Naturais, da Faculdade UnB
Planaltina, sob a orientação do Prof. Ismael
Victor de Lucena Costa.*

Brasília - DF

Junho de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico à minha família, amigos e namorado que estiveram presentes em todos os momentos da minha jornada. Ao professor Ismael por seus ensinamentos e confiança. Acima de tudo à Deus, pela força e por proporcionar sempre um novo mundo de possibilidades.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e força, por ter me sustentado em cada etapa desta jornada. Foi Sua presença constante que me deu coragem nos momentos de incerteza e perseverança para concluir este trabalho.

Agradeço também aos meus pais, irmão e namorado, pelo apoio incondicional, amor e incentivo ao longo de todo o meu percurso acadêmico. Aos professores ao longo do curso, dos quais tive o prazer de conhecer e aprender; aos meus orientadores, especialmente ao Ismael Victor pela confiança, dedicação, paciência e por compartilharem seus conhecimentos de forma tão generosa.

Estendo minha gratidão aos colegas de curso e amigos, Nalanda, Joana, Gabriel, Paulo, Gheliel, Jean e Guilherme, que tornaram essa caminhada mais leve com suas companhias, junto às memórias boas que levarei para a vida toda. Cada conversa, cada incentivo e cada conquista compartilhada fizeram essa jornada muito mais especial. Obrigada por estarem ao meu lado, por acreditarem em mim e por tornarem essa experiência inesquecível. Esse trabalho também é de vocês!

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso, o meu muito obrigado.

MODELAGEM DE SISTEMAS APLICADA À ECOLOGIA: UMA ABORDAGEM SOB A PERSPECTIVA DA DINÂMICA DE SISTEMAS

Camila Silva Rodrigues¹

Ismael Victor Lucena Costa², orientador

Luiz Fernando Roncaratti Junior³, coorientador

RESUMO

Neste trabalho, realizamos a transposição de três modelos ecológicos clássicos para a linguagem da Dinâmica de Sistemas: o ciclo global do carbono, a fotossíntese e o crescimento de microalgas em fotobiorreatores. Para a elaboração e simulação dos modelos, utilizamos a plataforma gratuita Insight Maker, adequada à representação da complexidade inerente aos fenômenos complexos. A dinâmica desses sistemas pode ser compreendida a partir de ciclos interconectados e interdependentes, como exemplificado nos modelos do Ciclo Global do Carbono e da Fotossíntese em Plantas, originalmente esquematizados por Hartmut Bossel e aqui aperfeiçoados. Adicionalmente, o modelo de Cultivo de Microalgas em Fotobiorreatores, baseado no esquema proposto por Hermanto, foi incorporado como exemplo de sistemas tecnológicos complexos, cujas características possibilitam a construção de modelos mentais e matemáticos integrados, os quais foram desenvolvidos ao longo deste trabalho.

Palavras-chave: Ensino de Ciências; Ciclo do Carbono; Fotossíntese; Modelos Sistêmicos; Sistemas Ecológicos; Modelos Mentais; Modelos Matemáticos Integrados.

1. INTRODUÇÃO

1.1 – Problemática e justificativa

Historicamente, a comunicação e a linguagem tradicional sempre foram utilizadas de forma linear, como na forma de contar a história e a evolução humana, organizadas em uma sequência contínua de fatos. Da mesma maneira, na escola, os conhecimentos das diferentes áreas das ciências são ensinados de forma separada e isolada. No entanto, quando nos deparamos com um problema que segue uma dinâmica circular, em que um evento A gera B, que por sua vez influencia C e este atua em A, a linguagem linear se mostra insuficiente para representar essas interações complexas, que são comuns na natureza. Por isso, analisar eventos e sistemas de forma fragmentada gera limitação no desenvolvimento do pensamento sistêmico (Villela, 2005). Por esse motivo, o presente trabalho, que visa contemplar a complexidade dinâmica de fenômenos naturais, faz-se relevante tendo em vista a necessidade de conectar as áreas da ciência, possibilitando o desenvolvimento de linguagens capazes de descrever, compreender e ensinar a variedade de fenômenos naturais existentes nesse campo de estudo. Assim, a linguagem de Sistemas é empregada com o intuito de descrever

¹ Curso de Licenciatura em Ciências Naturais – FUP/UnB

² Universidade de Brasília - UnB

³ Universidade de Brasília - UnB

fenômenos naturais e desempenhar essa função.

Para Villela (2005), a Dinâmica de Sistemas é uma nova linguagem que permite expressar mais adequadamente as cadeias de eventos circulares (loops) existentes na natureza. Assim, a complexidade dinâmica do ambiente e suas relações com o meio podem ser detalhadas por meio de gráficos e diagramas, sejam eles causais, de estoques ou fluxos. Por esse motivo, a metodologia de Dinâmica de Sistemas foi utilizada para descrever fenômenos descritos no livro “*System Zoo 2, Simulation Models. Climate, Ecosystems, Resources*” de Hartmut Bossel (2007), em que foram escolhidos modelos de fenômenos relativos às Ciências da Natureza, fenômenos estes já propostos no livro e que foram transcritos, juntamente com o trabalho do Hermanto (2009) sobre a cinética de crescimento de microalgas em fotobiorreator. Os três modelos sistêmicos foram transcritos utilizando o *Insight Maker*, um *software* de código aberto, disponibilizado gratuitamente na internet, de modo em que servirão como ponto de partida, para posterior observação de um fenômeno natural, além da construção de um modelo científico computacional para descrição da dinâmica dos fenômenos. Em seguida, transcrevê-lo para uma linguagem computacional, simulá-lo no computador e analisá-lo sob o ponto de vista de sua adequação aos dados experimentais. Todo esse processo será desenvolvido utilizando a linguagem de Sistemas, empregando basicamente a metodologia da Dinâmica de Sistemas.

Mapas sistêmicos são úteis para ajudar na visualização e compreensão das dinâmicas complexas que acontecem dentro de sistemas sociais, ambientais ou econômicos, e que consequentemente estabelecem conexões de causa e efeito que podem não ser óbvias no primeiro contato (Meadows, 2022). Os sistemas físicos, químicos e biológicos geralmente aparecam ser estáveis no tempo, porém por meio da Dinâmica de Sistemas o que se pretende é conhecer a dinâmica de funcionamento destes. Na concepção de Arantes (2012), entender a dinâmica de funcionamento da ação poluidora do homem, por exemplo, deve-se considerar a emissão de CO₂ na atmosfera, a temperatura dos oceanos, a ação do permafrost e das calotas polares, ou seja, ciclos que estão interconectados, interrelacionados e são interatuantes. Somente após uma análise de mapas sistêmicos pode-se entender e visualizar subsistemas e eventos que se relacionam uns com os outros de maneira interdependente.

Apesar da Dinâmica de Sistemas ser um tema pouco abordado no Brasil, possui grande potencial para aplicação no ensino de Ciências por se tratar de uma linguagem de fácil acesso para a educação básica, sendo, então uma metodologia que busca entender e explicar

interações complexas de fenômenos que acontecem no mundo real. Criar modelos possibilita a análise de cenários futuros, através de simulações baseadas em premissas, ou seja, a aplicação do pensamento sistêmico atrelado aos processos do método científico. De acordo com Sampaio (1999), a questão da modelagem no ensino abrange a construção do conhecimento em Ciências, o aprimoramento das representações mentais de um conhecimento e a percepção do mundo a partir da visão de Dinâmica de Sistemas, que entretanto, não é enfatizada como deveria nas escolas, de maneira em que os estudantes pudessem desenvolver seu próprio conhecimento de fenômenos naturais. Dessa forma, o processo desta metodologia assemelha-se ao método científico quanto à observação, formulação, teste de hipóteses, experimentação e análise de dados. A modelagem de modelos sistêmicos, portanto, faz-se relevante tendo em vista a importância da vivência do método científico para o cientista natural, atrelado, consequentemente, à metodologia de Dinâmica de Sistemas.

Nesse sentido, o Ciclo Global do Carbono descreve o movimento contínuo do carbono entre a atmosfera, os oceanos, os solos, a biosfera e a litosfera. A fotossíntese, realizada por plantas terrestres e organismos fotossintetizantes, como as microalgas, é um dos principais processos que retiram o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, convertendo-o em matéria orgânica e liberando oxigênio (O_2). Esse complexo sistema bioquímico torna possível a manutenção da vida na Terra, possibilitando a entrada de energia na forma de carboidrato e a conversão da energia luminosa em energia química metabolizável, realizada pelos seres fotossintetizantes. Dessa forma, a partir de uma compreensão holística e integrada desses sistemas, é possível compreender os processos biofísicos e suas interações com o ambiente.

Da mesma forma, as interações das algas com o ambiente resultam em importantes funções ecológicas, como a conversão de energia solar em biomassa, produção de oxigênio e geração de biocombustíveis ou fertilizantes. Esses processos dependem de fatores como temperatura, luz, nutrientes e presença de animais no sistema (Vidotti, 2004). Alterações naturais ou humanas podem desequilibrar esses fatores, impactando diretamente o crescimento e a produtividade das algas. Por isso, visando a busca de um melhor rendimento, pode-se considerar que experimentos em fotobioreatores permitem a análise sistêmica de variáveis que possivelmente podem influenciar a dinâmica desses microrganismos. Deste modo, o presente trabalho objetiva a transposição de modelos sistêmicos referente à sistemas ecológicos, como o Ciclo Global do Carbono, Fotossíntese de Plantas e o Crescimento de Microalgas em Fotobioreator. Assim, a partir das equações matemáticas das variáveis, foi

possível criar um modelo computacional, de acordo com a metodologia de Dinâmica de Sistemas.

2. OBJETIVOS

2.1 - Objetivo geral:

- Aprender os processos da elaboração de modelos sistêmicos e sistematizá-los, desde a criação, simulação e análise de fenômenos naturais.

2.2 - Objetivos específicos:

- Simular e aprimorar os modelos propostos por Hartmut Bossel (2007) de Ciclo Global do Carbono e Fotossíntese de Plantas, juntamente com o Crescimento de Microalgas em Fotobioreator descrito por Hermanto (2009).
- Sob a perspectiva da Dinâmica de Sistemas, fazer a transposição de modelos, analisar os padrões de comportamento e variáveis dos sistemas ecológicos de ciclo do carbono, fotossíntese e crescimento de microalgas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 - Dinâmica de Sistemas

A metodologia Dinâmica de Sistemas foi proposta e desenvolvida na década de 1950 pelo engenheiro eletricista Jay Forrester, principal autor que se dedicou à modelagem e ao ensino de sistemas. Essa abordagem tem como finalidade apoiar a compreensão da estrutura e do comportamento de sistemas complexos, permitindo a formulação de políticas de alta alavancagem para promover melhorias sustentáveis (Sterman, 2000). Juntamente com o grupo de Dinâmica de Sistemas do MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts), os trabalhos de Jay Forrester (Forrester, 1961), são influentes neste campo de estudo, sendo considerado, portanto, o fundador e principal expoente.

Na concepção de Arantes (2012), o Pensamento Sistêmico é uma abordagem abrangente para entender sistemas complexos, analisando como seus vários componentes

interagem e se influenciam mutuamente. Ou ainda definido por Sterman (2000), como a capacidade de ver o mundo como um sistema complexo e entender como tudo está conectado a todo o resto. A Dinâmica de Sistemas, por outro lado, é uma metodologia utilizada para estudar o comportamento de sistemas complexos ao longo do tempo, modelando as interações entre diferentes componentes usando técnicas matemáticas e computacionais. Assim, o presente trabalho utilizou-se do Pensamento Sistêmico para analisar possíveis cenários futuros para sistemas ecológicos, através de simulações.

Quando pensamos em um conjunto de coisas, sejam pessoas, células, moléculas, empresas ou outros eventos que possuem uma estrutura complexa, estes podem ser denominados sistemas, no qual elementos estão interconectados de tal forma que ao longo do tempo produzem um padrão de comportamento. As relações entre estrutura e comportamento fazem com que o sistema funcione e produza resultados desejáveis ou não. Segundo Meadows (2022), em seu livro *Pensando em Sistemas*, algumas coisas são percebidas pelas lentes do olho nu, outras pelas lentes de um microscópio ou de um telescópio, e há ainda aquelas que só podem ser compreendidas por meio da lente da Teoria dos Sistemas. Essa lente do pensamento sistêmico nos permite resgatar a compreensão sobre o funcionamento dos sistemas como um todo, além de aprimorar a capacidade de entender suas partes, identificar interconexões, projetar cenários futuros e propor soluções criativas para reorganizar o sistema. Portanto, considerando a complexidade integrada, interconectada e autossustentável, pode-se dizer que o ciclo do carbono na atmosfera, fotossíntese de plantas e a organização de microalgas também são sistemas complexos de elementos organizados coerentemente e diretamente relacionados ao controle do meio.

Elementos, interconexões e função/propósito são a base de um sistema de acordo com Meadows (2022).

1. Os elementos de um sistema são as partes mais fáceis de identificar em um sistema, já que frequentemente são visíveis e tangíveis. No caso de uma árvore, por exemplo, os elementos incluem raízes, tronco, galhos e folhas. Ao observar mais de perto, também é possível identificar componentes internos, como vasos condutores de seiva, cloroplastos e células especializadas.
2. As interconexões são as relações entre os elementos do sistema. Em uma árvore, essas conexões se manifestam por meio de fluxos físicos e reações químicas que regulam os processos metabólicos. São os sinais que permitem

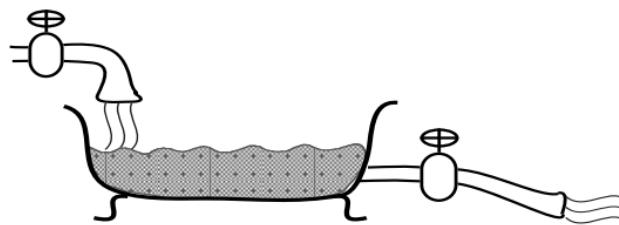
que uma parte da árvore responde ao que ocorre em outra parte.

3. Estoques representam a base de qualquer sistema. São os componentes que podem ser vistos, sentidos, contados e medidos a qualquer momento. Os estoques variam ao longo do tempo em função das ações dos fluxos.
4. Fluxos são os processos que alimentam ou esvaziam os estoques. Eles incluem movimentos como preenchimentos e drenagens, sucessos e fracassos, nascimentos e mortes, compras e vendas, crescimento e declínio, entradas e saídas, representando, portanto, as mudanças contínuas do sistema.

Como afirma Arantes (2012), estoque é o histórico das mudanças de fluxo em um sistema. Um estoque leva tempo para mudar, pois os fluxos e vazões levam tempo para se completar. Estoques se modificam devagar, mesmo quando os fluxos de entrada ou de saída mudam de repente. Assim, podem gerar atrasos, de maneira em que esses estoques geram entradas e saídas dissociadas, independentes e temporariamente desequilibradas entre si.

Sterman (2000) ilustra o exemplo da banheira, em que há entrada de água em uma determinada vazão e vazamento pelo ralo a outra vazão. A figura 1 abaixo mostra o comportamento hipotético das vazões de entrada e saída da banheira e a partir de um diagrama de estoque e fluxo, é possível prever o comportamento da quantidade de água na banheira e gerar gráficos.

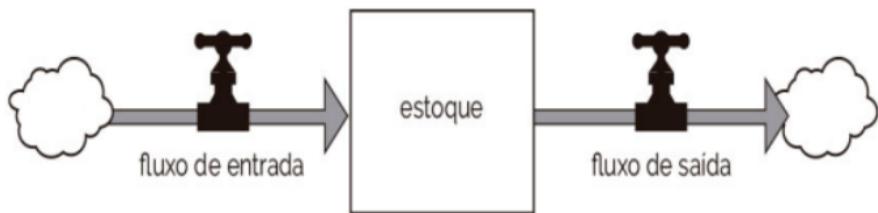
Figura 1. Comportamento hipotético da vazão de água em uma banheira.



Fonte: STERMAN, J. D. Business Dynamics. Editora McGraw-Hill, 2000.

Na figura 2 os estoques são mostrados como caixas e os fluxos, como “tubos” com uma seta na ponta que leva para dentro ou para fora dos estoques. Uma “torneira” indica que o fluxo pode ser aumentado ou diminuído, ligado ou desligado. As “nuvens” representam as origens ou os destinos dos fluxos – fontes e escoadouros.

Figura 2. Diagramas de estoque e fluxo.



Fonte: MEADOWS, Donella H. Pensando em sistemas: Como o pensamento sistêmico pode ajudar a resolver os grandes problemas globais. Sextante, 2022.

Nesse contexto, as estruturas do sistema são ferramentas poderosas para a modelagem de sistemas físicos, químicos ou biológicos. Villela (2005) afirma que os Modelos de Estoque e Fluxo são ideais para representar quantitativamente relações de causa e efeito, que são expressas através de fórmulas lógico-matemáticas. Dessa forma, os estudos de sistemas dinâmicos possibilitam a projeção de possíveis acontecimentos de acordo com fatores que se desdobram em modos diferentes.

Consoante Sterman (2000) e Arantes (2012) apontam algumas características fundamentais presentes na maioria dos sistemas complexos: são dinâmicos, isto é, mudam de estado com o tempo e essas mudanças nos sistemas ocorrem em muitas escalas de tempo, e essas diferentes escalas às vezes interagem; são acoplados, sendo que os fatores interatuantes do sistema interagem fortemente entre si e com a natureza, reforçando a ideia de que tudo está conectado a todo resto; são norteados por retroalimentação, ou seja, todas decisões alteram o estado do mundo, que por sua vez induz outras ações e reações; não são lineares, em que seu efeito pode ser desproporcional à causa; a estrutura interna de um sistema é o que determina seu comportamento, sendo que os diferentes subsistemas interligados influenciam a forma como o todo irá se comportar; e toda interferência feita no sistema a curto prazo pode resultar em benefícios ou malefícios a longo prazo.

Sob o nível de ecossistemas terrestres, o fluxo de energia e ciclagem de matéria se dá entre seus componentes físicos e biológicos, no qual a maior parte da energia que circula pela biosfera tem origem na luz solar, ou seja, dependem da energia solar, que é convertida em compostos orgânicos por plantas e algas fotossintetizantes, sendo essa energia posteriormente dissipada na forma de calor e irradiada para o espaço. Por outro lado, a matéria permanece em circulação, tanto dentro dos ecossistemas, quanto entre eles (Ricklefs, 1996). Nesse sentido, os mesmos processos são observados a partir da modelagem de sistemas dinâmicos de

carbono, fotossíntese e algas.

3.2 - *Insight maker*

Todos os modelos, sejam mentais ou matemáticos, são simplificações do mundo real. Nesse sentido, a utilidade do modelo não depende de uma transposição totalmente realista do sistema, mas sim das semelhanças nos padrões de comportamento que se processam tanto na modelagem, quanto na natureza (Arantes, 2012). Neste trabalho, foi utilizado o *Insight maker* <<https://insightmaker.com>>, uma ferramenta de simulação e modelagem acessível a um público mais amplo de usuários, que possui código aberto.

O Insight Maker tornou-se público em 2009 e passou por desenvolvimento e evolução contínuos desde então. Fortmann-Roe (2014) estudou ferramentas de simulação e modelagem baseadas na web, e apontou a importância em aumentar sua utilização dentro e fora da sala de aula, devido à sua acessibilidade. Ademais, afirma que o software é projetado para ser o mais acessível possível, mas que também contém ferramentas de modelagem avançadas, suportando a construção de modelos gráficos usando vários paradigmas.

4. METODOLOGIA

4.1 - Ciclo Global do Carbono

Nessa perspectiva, os modelos propostos no livro “*System Zoo 2, Simulation Models. Climate, Ecosystems, Resources*”, de Hartmut Bossel (2007), foram transcritos para o *Insight maker*, compreendendo, assim, suas respectivas dinâmicas e padrões de comportamento ao longo do tempo (Anexo A). O primeiro sistema escolhido foi o Ciclo Global do Carbono.

O ciclo do carbono é um sistema complexo que envolve sua circulação entre a biosfera, atmosfera, hidrosfera e geosfera, configura-se como um dos processos globais mais complexos, relevantes e fascinantes do planeta (Bralower; Bice, s.d.). Ou seja, um sistema integrado por processos que transferem carbono, sob diversas formas, através dos diferentes compartimentos da Terra.

De acordo com a Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2018), os anos finais do Ensino Fundamental aprofundam o estudo de temas como solo, ciclos biogeoquímicos,

esferas terrestres, interior do planeta e clima, cujo objetivo é que os estudantes desenvolvam uma visão sistêmica do planeta, fundamentada nos princípios de sustentabilidade socioambiental. Nesse contexto, a BNCC destaca a habilidade (EM13CNT105), que propõe a análise dos ciclos biogeoquímicos e a interpretação dos efeitos de fenômenos naturais e da interferência humana sobre eles, reforçando o papel ativo do estudante na promoção de um ambiente saudável e equilibrado.

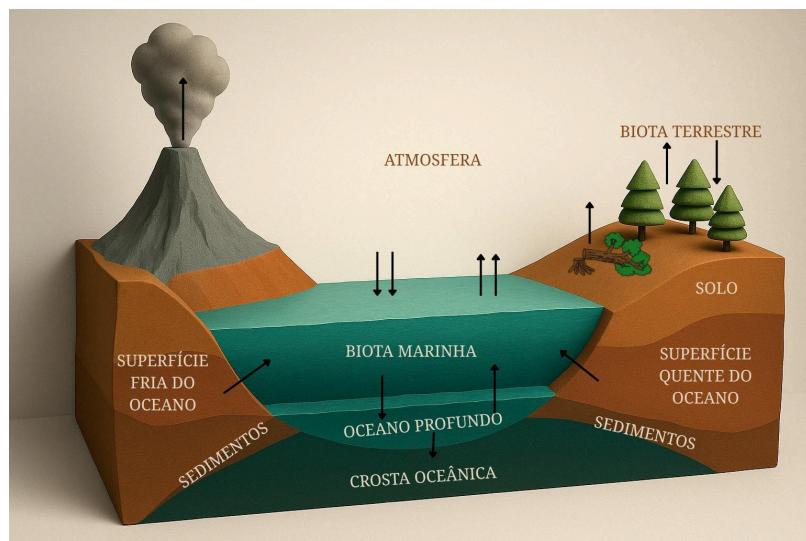
Diferentemente dos fluxos de energia, a matéria se move em ciclos dentro dos ecossistemas, sendo o carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e fósforo os elementos essenciais e principais moléculas da vida, incluindo água, carboidratos, proteínas e DNA. Estes são obtidos de diversas fontes da Terra, como os organismos vivos, a atmosfera, a água e as rochas, chamado de fluxo de matéria (Ricklefs, 1996). Como exemplo tem-se a disposição de nutrientes presentes no solo que são absorvidos pelas plantas e então consumidas pelos animais. Esses nutrientes passam a compor os tecidos dos animais, e parte deles é eliminada como excreção. Após a morte do animal, os nutrientes de seus tecidos retornam ao solo, completando o ciclo dos nutrientes.

Considerando todos os grandes ciclos biogeoquímicos, o do carbono se destaca por exigir uma abordagem interdisciplinar, já que integra conhecimentos das áreas da biologia, química, oceanografia e geologia, a fim de compreender seu funcionamento e os fatores que provocam suas alterações. O carbono é considerado um dos elementos mais essenciais para a manutenção da vida na Terra. Trata-se do principal componente estrutural dos compostos orgânicos que formam os organismos vivos (Bralower; Bice, s.d.). Sua configuração eletrônica confere-lhe uma valência de +4, o que possibilita a formação de múltiplas ligações covalentes, inclusive com átomos de carbono, originando uma vasta diversidade de compostos químicos. Essa característica está diretamente relacionada à complexidade e à diversidade da vida. Assim, Tonello (2007) afirma que o ciclo do carbono é um sistema de transformações químicas (reações de oxidação e redução) que envolve e conecta todos os seres vivos do planeta e suas formas de vida, além dos seus reservatórios inorgânicos e os mecanismos de troca entre componentes.

Além de sua função biológica, o carbono também está presente em diversas formas e compartimentos do planeta. É um dos principais constituintes das rochas calcárias, na forma de carbonato de cálcio, encontra-se dissolvido tanto nas águas oceânicas quanto nas águas continentais, e está presente na atmosfera sob a forma de dióxido de carbono (CO_2), sendo

este o segundo gás de efeito estufa mais abundante, com forte atuação nas mudanças climáticas globais observadas na atualidade (Bralower; Bice, s.d.). A figura 3 evidencia os principais reservatórios de carbono, assim como os processos responsáveis pela transferência desse elemento entre eles. No ciclo, o carbono circula por diferentes compartimentos. No ciclo geológico, o carbono se movimenta entre a atmosfera, os oceanos (hidrosfera) e as rochas (litosfera). Já no ciclo biológico, ele percorre os organismos vivos, sendo constantemente transferido entre plantas, animais, microrganismos e o ambiente. Por isso, os processos de fotossíntese, respiração e decomposição desempenham um papel fundamental, pois são responsáveis pela entrada, transformação e liberação do carbono entre os seres vivos e o meio em que vivem. Nesse sentido, o fundamental é reconhecer que há uma grande diversidade de compartimentos e interações envolvidas nesse ciclo.

Figura 3: Representação do Ciclo Global do Carbono entre os diferentes compartimentos da Terra.

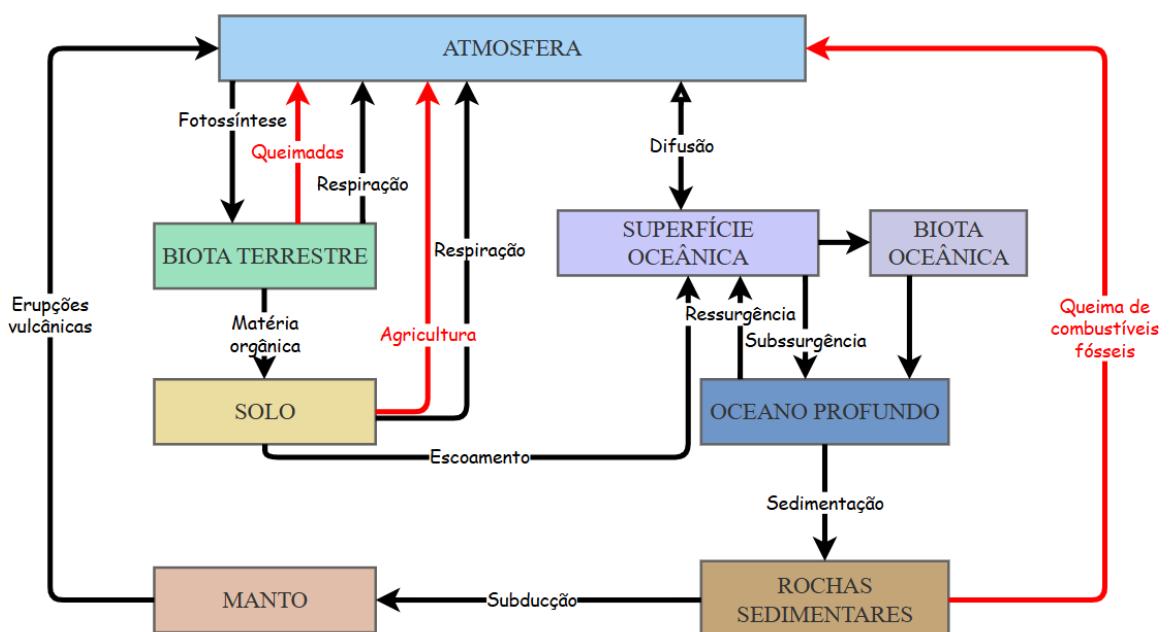


Dessa forma, entende-se que o ciclo biogeoquímico do carbono refere-se ao conjunto de processos naturais e antrópicos que promovem a movimentação do carbono entre diferentes compartimentos do planeta, denominados reservatórios. Pacheco (1990) afirma que esses processos consistem na retirada do carbono de um determinado reservatório, sua incorporação em compostos e reações químicas em outros compartimentos, e, após certo tempo, seu eventual retorno à origem. É importante destacar que o carbono armazenado em combustíveis fósseis não participa naturalmente desse ciclo. Sua produção e emissão ocorre predominantemente por meio da ação antrópica, especialmente através da queima desses combustíveis. Por isso, a remoção do dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera ocorre, basicamente, por meio de dois importantes reservatórios: os oceanos e a biomassa terrestre.

Na atmosfera, o carbono está presente principalmente na forma de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e monóxido de carbono (CO), porém essas substâncias não permanecem indefinidamente nesse meio. O carbono atmosférico está em constante movimento, migrando para outros reservatórios e transformando-se em diferentes compostos ao longo do ciclo (Bralower; Bice, s.d.). Em outras palavras, o carbono flui continuamente entre os diversos sistemas da Terra. Da mesma forma, sob a perspectiva de Dinâmica de Sistemas é possível analisar esse ciclo nomeando primeiramente: 1. os reservatórios onde se encontram; 2. os caminhos pelos quais transitam de um estoque para o outro; 3. as quantidades dessas transferências; e 4. os fatores que controlam tais dinâmicas. Estes são representados no diagrama a seguir, no qual cada caixa simboliza um reservatório distinto. É importante ressaltar que, em cada um desses compartimentos, o carbono pode assumir formas químicas bastante distintas, refletindo a complexidade e a abrangência do ciclo.

No diagrama apresentado abaixo na figura 4, disponível em: <<https://insightmaker.com/insight/5WKxfGXG5K9nlT85sbeoq>>, mostra os processos de transferência de carbono na natureza, em que as setas pretas indicam os processos naturais de transferência de carbono entre os diferentes reservatórios do sistema terrestre, enquanto as setas vermelhas representam as alterações resultantes da ação antrópica. As unidades de medida desses fluxos são expressas em gigatoneladas de carbono por ano (GtC/ano), unidade que permite quantificar a movimentação do elemento ao longo do ciclo.

Figura 4: Processos naturais de transferência de carbono.

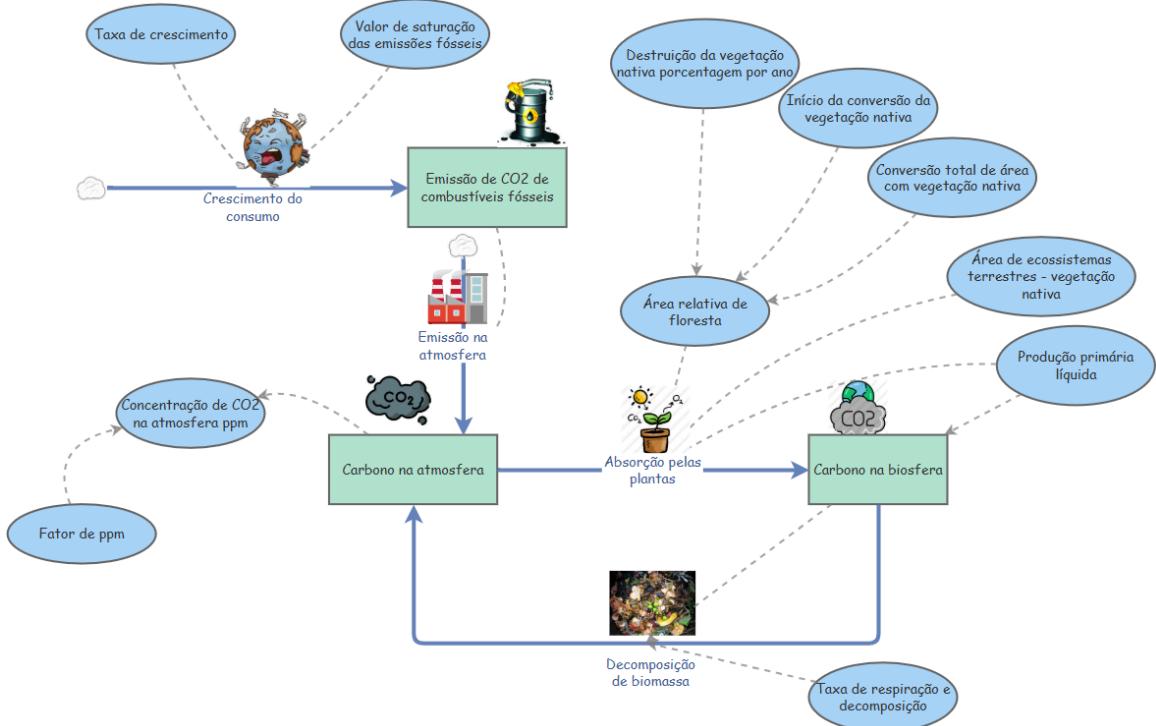


O carbono presente na atmosfera, na forma de CO₂ e CH₄ (metano), não permanece na atmosfera por muito tempo, pois circula entre diferentes compartimentos da Terra, assumindo diversas formas. Durante a fotossíntese, as plantas absorvem o CO₂ atmosférico para produzir carboidratos e outros compostos orgânicos. Esse carbono pode, então, retornar à atmosfera como CO₂ ou ser transferido para o solo na forma de diferentes substâncias que contêm carbono. Uma parte também se acumula em rochas sedimentares nos oceanos e, após longos períodos, pode ser liberada novamente para a atmosfera. Percebe-se também as relações da biota oceânica que armazena uma quantidade relativamente pequena de carbono, em comparação com as rochas sedimentares que concentram uma quantidade imensamente maior, principalmente na forma de calcita (CaCO₃), que compõe depósitos de calcário, carvão, petróleo e outros recursos fósseis (Bralower; Bice, s.d.). Desse modo, o carbono está em constante movimento, fluindo entre a biosfera, a atmosfera, os oceanos e a geosfera.

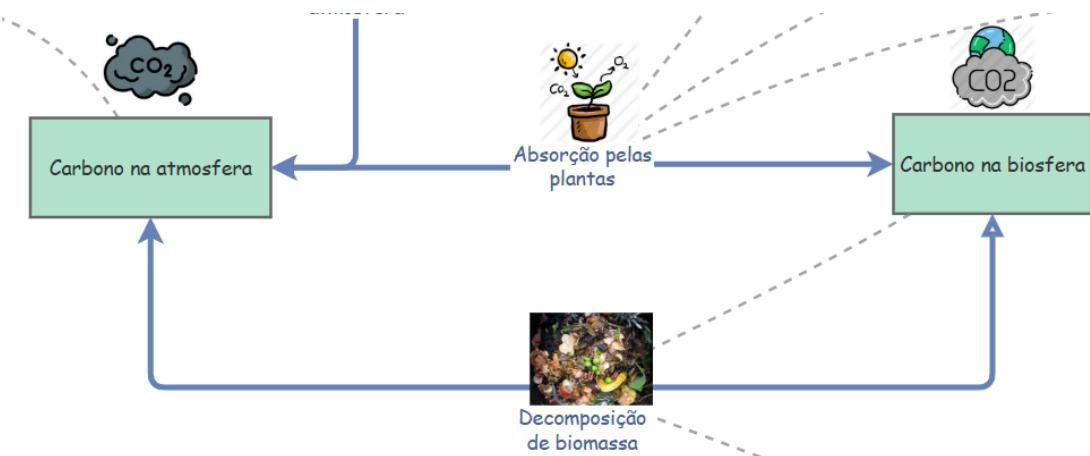
O fenômeno do *equilíbrio dinâmico dos fluxos* pode ser definido, de acordo com a concepção de Bossel (2007), como um sistema em que haja perdas ou entradas do ambiente externo. Este processo aplica-se geralmente à dinâmica de gases de efeito estufa na atmosfera, absorção e decomposição de substâncias no solo, nas águas subterrâneas, nas águas superficiais e outros. No diagrama da figura 4, considerando-se apenas os fluxos naturais, representados pelas setas pretas, o sistema pode ser interpretado em equilíbrio dinâmico: a quantidade de carbono que entra em cada reservatório é equivalente à quantidade que dele sai.

Bossel (2007) define os *fluxos de carbono* como sendo as quantidades de carbono transferidas entre os reservatórios ao longo do tempo, em função de processos físicos, biológicos, geológicos e químicos. Com base em seus estudos, a industrialização foi um marco importante que afetou o equilíbrio dinâmico entre os reservatórios de CO₂ da atmosfera e da biomassa viva e morta, sendo alterados pela queima de combustíveis fósseis e pela desflorestação de grandes áreas. Assim, com a quantidade de CO₂ extrapolando o que é retirado pela fotossíntese, maiores perturbações de fluxo equilibrado levam à mudanças dinâmicas irreversíveis no sistema climático global. Todos esses ciclos e mudanças ao longo do tempo podem ser melhor visualizados por meio do modelo criado no *Insight Maker*, apresentado na figura 5.

Figura 5: Diagrama de simulação do Ciclo Global do Carbono.

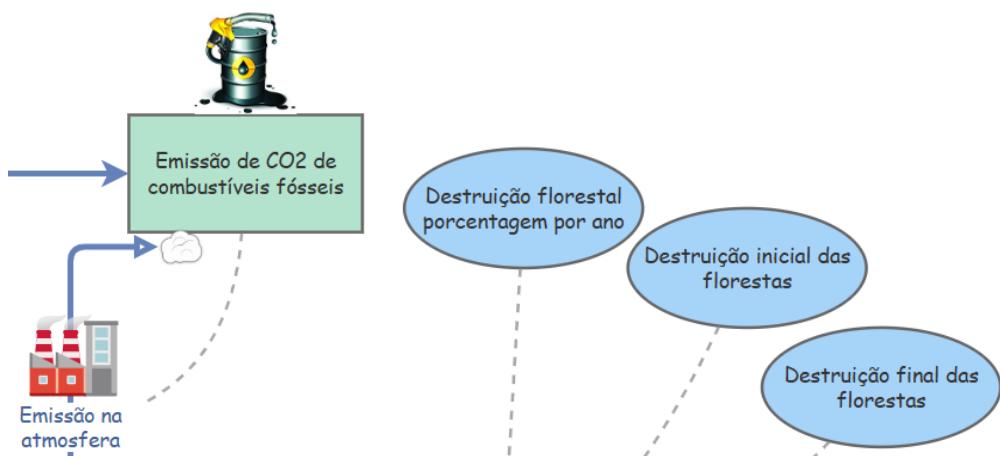


A simulação da figura 5, conforme o livro *System Zoo 2*, apresenta um modelo simples dos fluxos globais de carbono, disponível em <<https://insightmaker.com/insight/2Y9gkKwOrsmD9xRocuGq2X>>. Os dois reservatórios de carbono na atmosfera e carbono na biosfera estão ligados uns aos outros pelos fluxos de absorção pelas plantas e decomposição da biomassa.

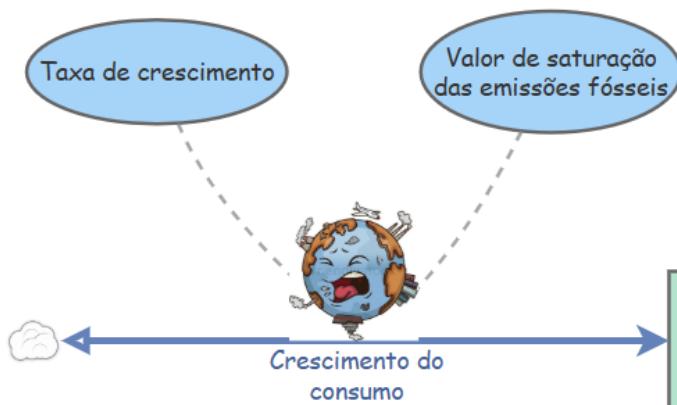


O ciclo do carbono, que naturalmente se mantém em equilíbrio, é desestabilizado pela emissão excessiva de CO₂ gerada pela queima de combustíveis fósseis e pelo desmatamento. Além disso, o aumento da temperatura dos oceanos reduz sua capacidade de absorver CO₂ da atmosfera, fazendo com que, em certos casos, os oceanos liberam o carbono de volta para o ar. No entanto, no modelo em questão, não se considera de forma significativa a absorção de

CO_2 pelos oceanos, já que essa contribuição é relativamente pequena em relação às outras dinâmicas do sistema (Devries, 2022).

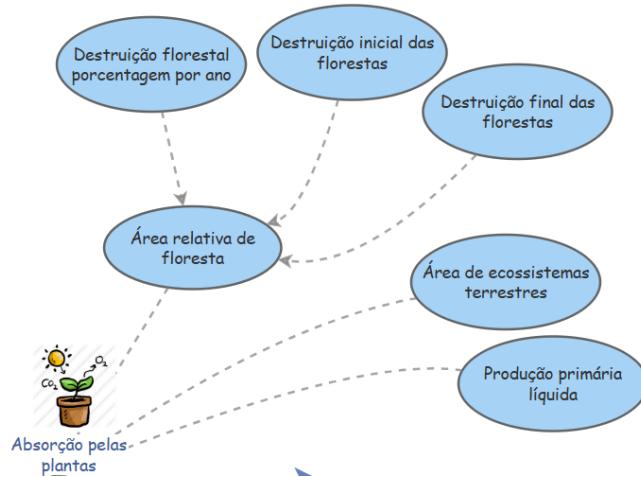


Os principais fatores que determinam o comportamento do sistema são a **taxa de crescimento** do uso de combustíveis fósseis, o limite máximo dessas emissões (**valor de saturação das emissões fósseis**) e os parâmetros relacionados à **destruição florestal**. Como a capacidade de absorção de CO_2 não depende diretamente da quantidade de carbono na atmosfera, qualquer aumento nas concentrações de CO_2 só poderá ser controlado se houver uma interrupção tanto na queima de combustíveis fósseis quanto no desmatamento.

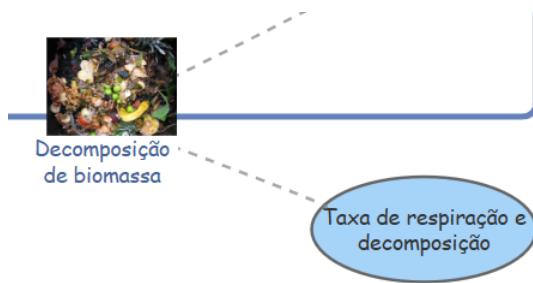


Partindo de uma situação de equilíbrio entre os diferentes reservatórios de carbono da Terra, observa-se uma tendência de aumento na concentração de carbono na atmosfera. Esse aumento está diretamente relacionado à crescente emissão de dióxido de carbono (CO_2), impulsionada pelo uso intensivo de combustíveis fósseis, que segue um padrão de crescimento logístico. A capacidade das plantas de capturar CO_2 da atmosfera está diretamente ligada à quantidade de áreas cobertas por vegetação (**área de ecossistemas terrestres**) e à eficiência dos ecossistemas terrestres em realizar a **produção primária líquida**,

processo em que o carbono é fixado durante a fotossíntese. Contudo, atividades como a **destruição florestal** e o aumento da poluição afetam negativamente esse processo, pois reduzem a extensão da cobertura vegetal e, com isso, limitam a capacidade das plantas de absorver o carbono presente na atmosfera.

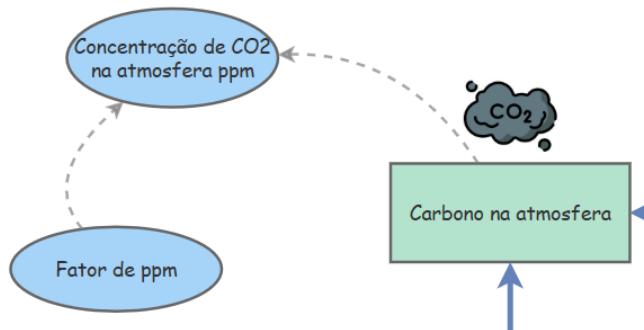


Diferente da fotossíntese, que depende da luz solar e da atividade das plantas, os processos de respiração e decomposição estão diretamente associados à quantidade de biomassa existente, tanto viva quanto morta. Isso significa que, quanto maior for o acúmulo de biomassa em um ecossistema, maior será a emissão de carbono para a atmosfera, resultado das atividades respiratórias dos organismos e da decomposição da matéria orgânica. Essas emissões correspondem às **taxas de respiração e decomposição**.



Dessa forma, mesmo que a geração de nova biomassa diminua, os processos de respiração e decomposição continuam liberando quantidades consideráveis de CO₂. De maneira geral, a quantidade de **carbono na atmosfera** acaba sendo maior do que a **absorção pelas plantas**, o que leva ao acúmulo progressivo de CO₂ na atmosfera e, consequentemente, ao agravamento do efeito estufa. Os impactos desses gases podem alterar a fisiologia das plantas, a produção e a biomassa. Nesse sentido, o gerenciamento do uso da terra é uma estratégia para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e aumentar a absorção de

carbono. Essa prática aprimora diversos fatores ambientais, como o crescimento das plantas, o microclima e a disponibilidade de nutrientes no solo (IPCC, 2020).



A tabela abaixo apresenta os valores e equações utilizados na simulação:

Configurações da simulação	<ul style="list-style-type: none"> Início da simulação: 1850 Tempo de duração: 350 Passo: 0.05 Unidade de medida: Ano Algoritmo da simulação: Runge-Kutta de 4^a Ordem
VARIÁVEIS	
Concentração de CO ₂ na atmosfera ppm	<ul style="list-style-type: none"> Equação: [Carbono na atmosfera]/[Fator de ppm]
Destruíção final das florestas	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 2020 Unidade de medida: [Ano]
Destruíção florestal porcentagem por ano	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.2 Unidade de medida: [1/Ano] porcentagem por ano
Destruíção inicial das florestas	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 1970 Unidade de medida: [Ano]

Fator de ppm	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 2.12 Unidade de medida: [GtC/CO2 ppm]
Produção primária líquida	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 400 Unidade de medida: [GtC/(Gkm²*Ano)]
Taxa de crescimento	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.03 Unidade de medida: [1/Ano]
Taxa de respiração e decomposição	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.02 Unidade de medida: [1/Ano]
Valor de saturação das emissões fósseis	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 15 Unidade de medida: [GtC/Ano]
Área de ecossistemas terrestres	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.145 Unidade de medida: Gkm²
Área relativa de floresta	<ul style="list-style-type: none"> Equação: 1-Ramp([Destruição inicial das florestas], [Destruição final das florestas], ([Destruição florestal porcentagem por ano]/100))
ESTOQUES	
Carbono na atmosfera	<ul style="list-style-type: none"> Valor inicial: 570 Unidade de medida: [GtC]
Carbono na biosfera	<ul style="list-style-type: none"> Valor inicial: 2900 Unidade de medida: [GtC]
Emissão de CO2 de combustíveis fósseis	<ul style="list-style-type: none"> Valor inicial: 0.1 Unidade de medida: [GtC/Ano]
FLUXOS	

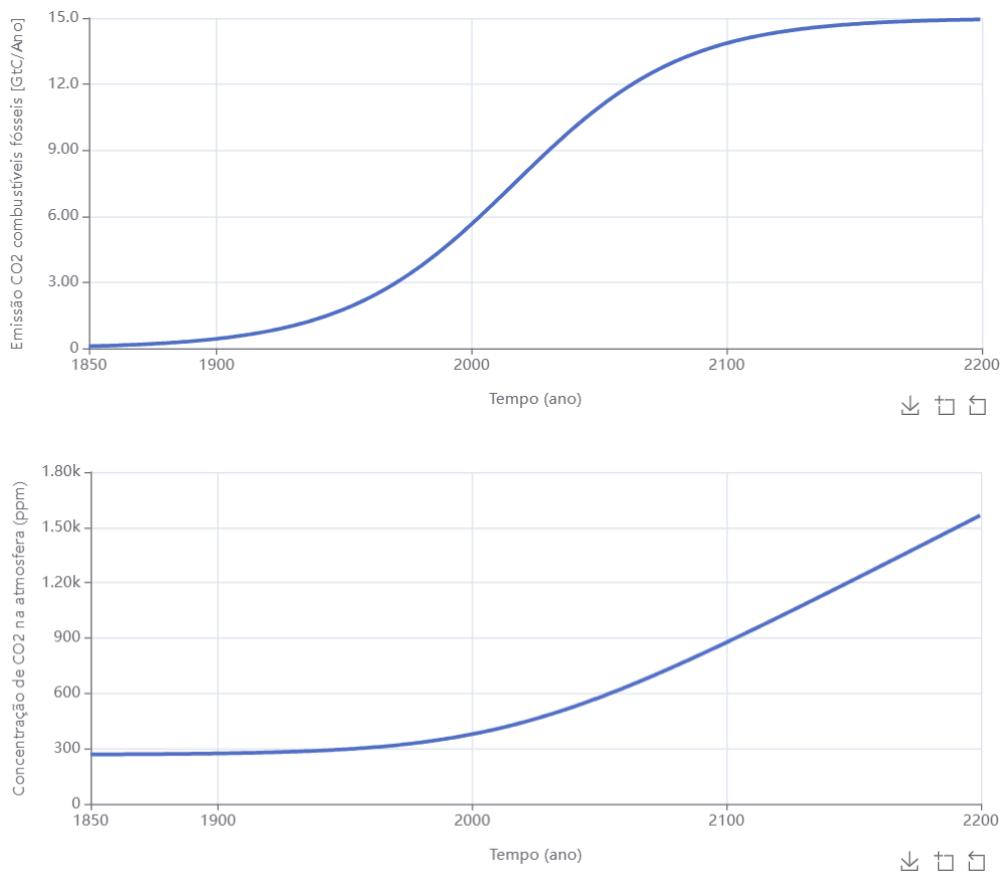
Absorção pelas plantas	<ul style="list-style-type: none"> Equação: [Produção primária líquida]*[Área de ecossistemas terrestres]*[Área relativa de floresta] Início: Carbono na atmosfera Fim: Carbono na biosfera Unidade de medida: [GtC/Ano]
Crescimento do consumo	<ul style="list-style-type: none"> Equação: [Taxa de crescimento]*[Emissão de CO₂ de combustíveis fósseis]*(1-[Emissão de CO₂ de combustíveis fósseis]/[Valor de saturação das emissões fósseis]) Início: Nada Fim: Emissão de CO₂ de combustíveis fósseis Unidade de medida: [GtC/Ano²]
Decomposição de biomassa	<ul style="list-style-type: none"> Equação: [Taxa de respiração e decomposição]*[Carbono na biosfera] Início: Carbono na biosfera Fim: Carbono na atmosfera
Emissão na atmosfera	<ul style="list-style-type: none"> Equação: [Emissão de CO₂ de combustíveis fósseis] Início: Nada Fim: Carbono na atmosfera Unidade de medida: [GtC/Ano]

4.1.2 - Resultados da simulação

De posse do modelo pronto, efetuamos a simulação e os dados foram apresentados nos gráficos abaixo (Figuras 6 e 7). Percebe-se que no início da industrialização a dinâmica global do carbono teve um crescimento do nível de dióxido de carbono da atmosfera. Anteriormente, até este marco histórico, os fluxos de carbono para dentro e para fora da atmosfera estavam relativamente em equilíbrio. Assim, a enorme quantidade de CO₂ absorvida pelas plantas todos os anos correspondia exatamente à quantidade de CO₂ que, todos os anos, chegava à atmosfera por processos de decomposição da matéria orgânica (Bossel, 2007). No entanto, o nível de CO₂ atmosférico aumenta fortemente, sendo necessárias intervenções nas principais causas desse ciclo, como na queima de combustíveis fósseis e no desmatamento de florestas.

Os gráficos abaixo mostram o resultado da simulação, em que a emissão de CO₂ de combustíveis fósseis segue uma curva de crescimento e consequentemente o gráfico de concentração de CO₂ na atmosfera também aumenta.

Figuras 6 e 7: Desenvolvimento histórico e futuro do nível de CO₂.



4.2 - Fotossíntese de plantas

De acordo com Bossel (2007), a capacidade das plantas em realizar fotossíntese depende da quantidade de luz solar disponível, especialmente da radiação fotoativa incidente do sol. Essa disponibilidade de luz varia conforme o horário do dia, a presença de nuvens e as mudanças sazonais na posição do sol. Durante a noite, a fotossíntese não ocorre e as plantas continuam consumindo energia por meio da respiração. Quando o dia começa, a luz solar vai se intensificando até atingir um ponto em que a energia produzida pela fotossíntese se iguala à energia perdida na respiração – esse ponto é chamado de ponto de compensação luminosa. Com o avanço das horas e o aumento da luz solar, a fotossíntese se intensifica, atingindo seu máximo geralmente por volta do meio-dia. A forma como cada planta responde à luz varia entre as espécies, sendo essa resposta uma característica própria de cada uma.

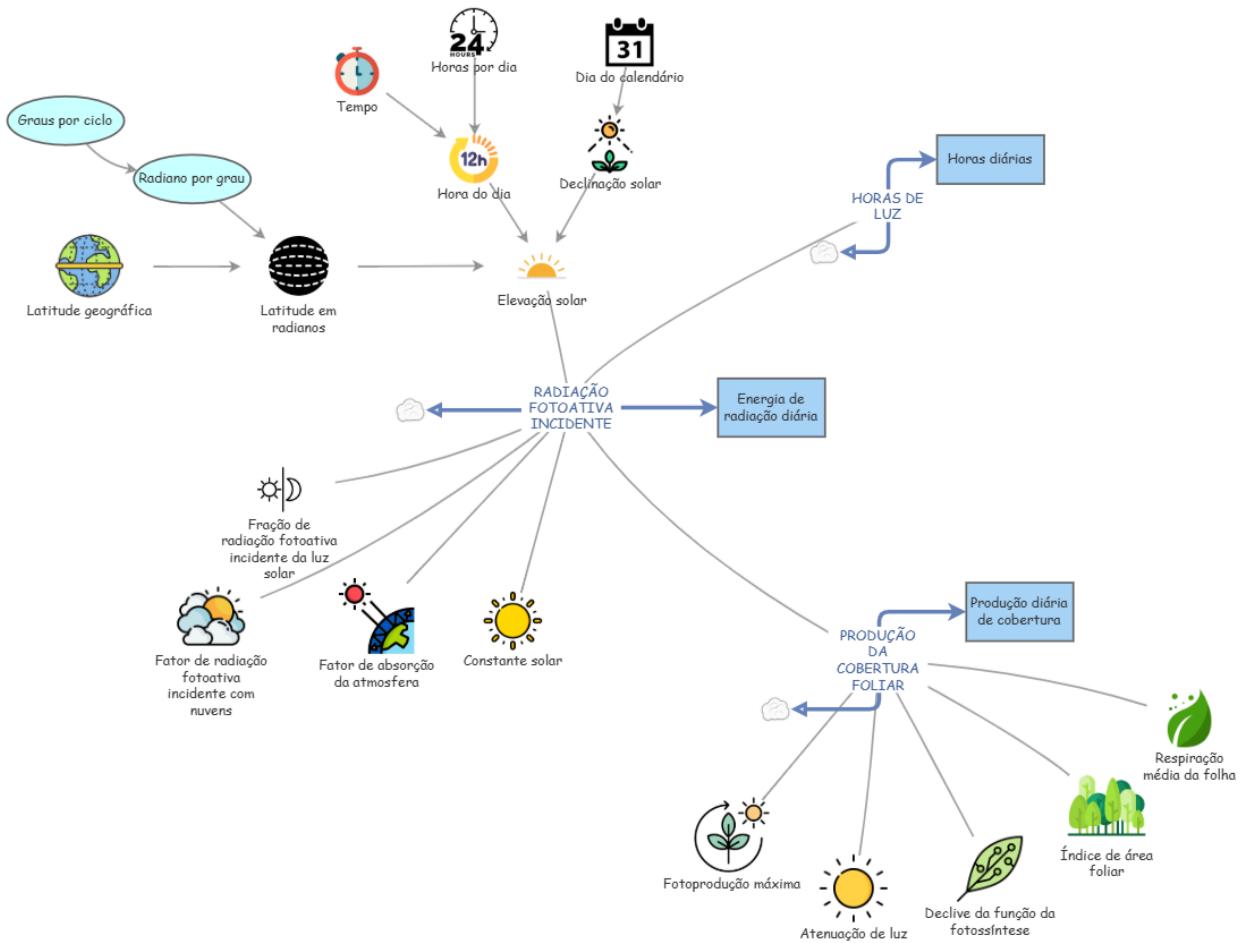
Na cobertura vegetal, apenas as folhas situadas na parte superior do dossel recebem a maior quantidade de radiação fotoativa incidente (RFI) e, por isso, alcançam as maiores taxas de fotossíntese. Já nas camadas inferiores, onde as folhas permanecem sombreadas, a produção de energia é significativamente menor. Para que modelos de simulação representem de forma precisa a fotoprodução total da planta, é necessário considerar três aspectos

fundamentais, conforme descrito nos modelos matemáticos de Monsi e Saeki (1953) e disponibilizado no anexo B:

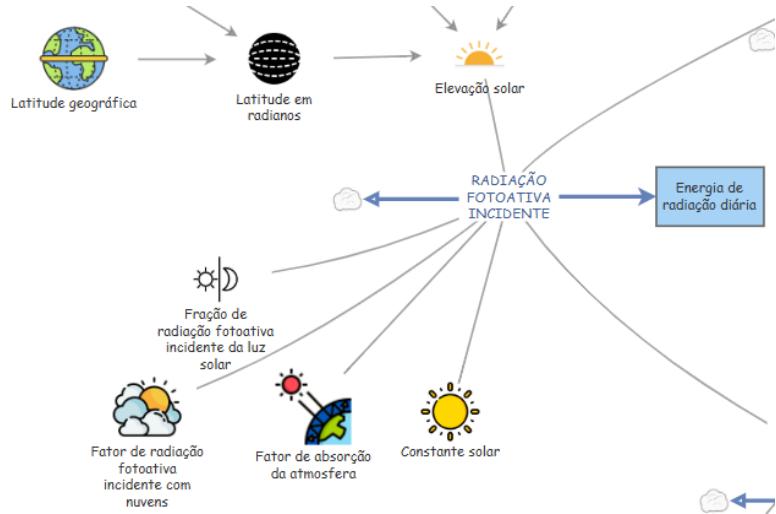
1. A variação diária e sazonal da luz solar;
2. As características específicas de cada espécie vegetal, como a curva de resposta à luz;
3. A forma como a luz se distribui e se atenua ao longo das diferentes camadas da cobertura foliar.

O modelo está descrito no diagrama de simulação apresentado na figura 8, disponível em <<https://insightmaker.com/insight/4O9IKC2GshjRHPmSbX4q7H>> bem como as equações correspondentes. Assim, foi calculada a variação diária da produção fotossintética de uma vegetação com base em fatores como a latitude geográfica, a declinação solar e a duração do dia, que sofrem alterações ao longo das estações do ano. Também são considerados, ao longo do dia, a elevação do sol no céu e a forma como a luz é gradualmente atenuada nas diferentes camadas da copa das plantas. Este modelo pode ser aplicado a diferentes tipos de vegetação, abrangendo ecossistemas como florestas, campos ou matas.

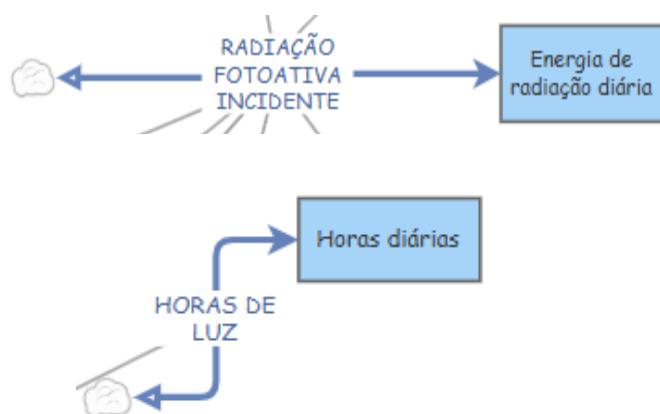
Figura 8: Diagrama de simulação da Fotossíntese de plantas.



A Radiação Fotoativa Incidente, que representa a fração da luz solar utilizada na fotossíntese, é calculada considerando diversos fatores astronômicos e atmosféricos. Entre eles, estão a **latitude geográfica**, que define a posição do local na Terra; a **declinação solar**, que varia conforme a época do ano, influenciando a inclinação dos raios solares; e a **elevação solar**, que depende do horário do dia, determinando o ângulo de incidência da luz. Além desses, o cálculo também leva em conta a **constante solar**, que é a quantidade média de energia que chega do Sol à atmosfera terrestre, e os efeitos de **absorção e dispersão da luz pela atmosfera**, que reduzem a quantidade de energia que atinge a superfície. Por fim, considera-se ainda a **fração da radiação total** que corresponde à radiação fotossinteticamente ativa, fundamentais para o processo de fotossíntese.



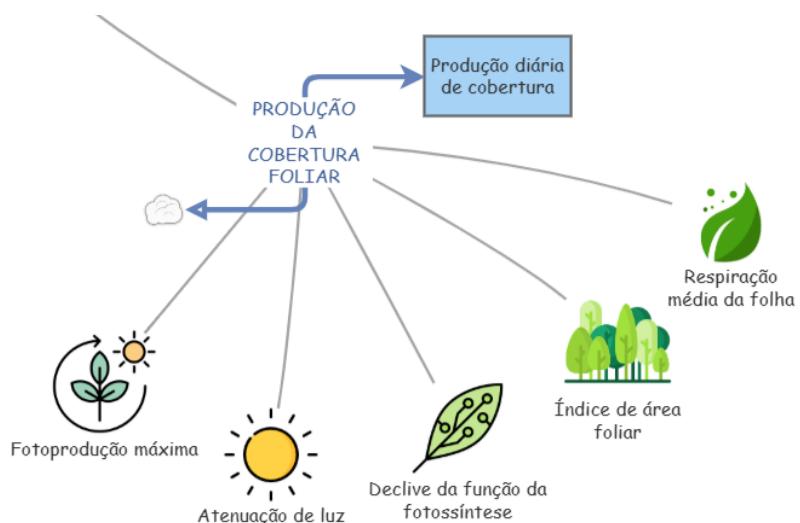
A quantidade total de energia luminosa (*energia de radiação diária*) disponível ao longo de um dia é calculada através da integração da *radiação fotoativa incidente* recebida em cada instante, desde o nascer até o pôr do sol. Esse processo consiste em somar, ao longo do tempo, os valores de radiação que incidem sobre a superfície, resultando na energia diária total disponível para a fotossíntese. Paralelamente, as *horas diárias* — ou seja, o tempo durante o qual há luz suficiente para sustentar a fotossíntese — é determinada pela soma das horas em que a intensidade luminosa ultrapassa um determinado limiar considerado adequado para a atividade fotossintética. Ambos os parâmetros são fundamentais para estimar o potencial produtivo de plantas ou microalgas em ambientes naturais ou em sistemas controlados, como fotobiorreatores.



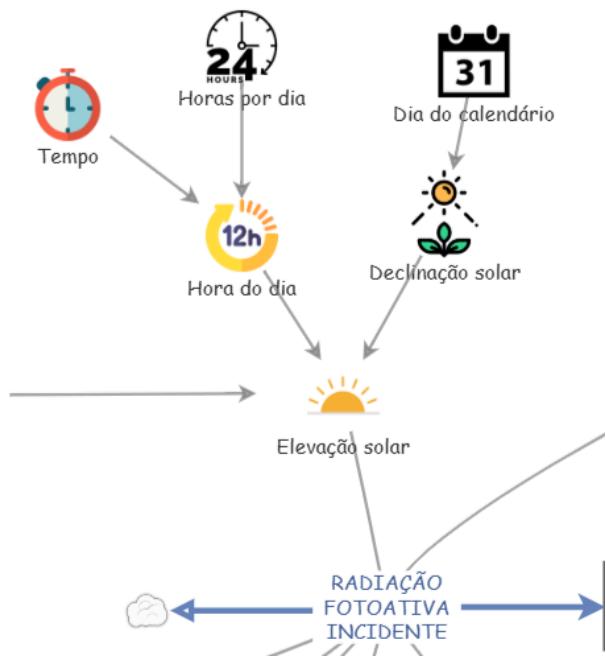
A *produção da cobertura foliar* é determinada a partir da integração da curva de fotossíntese ao longo do perfil da vegetação. Esse cálculo considera a *atenuação da luz* à medida que ela atravessa as diferentes camadas de folhas, bem como parâmetros biofísicos

como a **fotossíntese máxima** e a **inclinação da curva de resposta à luz**, que expressa a eficiência na conversão da radiação em energia química nas baixas intensidades luminosas. Outro fator essencial é o **índice de área foliar**, que representa o número de camadas de folhas sobre uma determinada área de solo, influenciando diretamente a captura de luz.

Além disso, é feito um ajuste pela **taxa média de respiração foliar**, que representa a quantidade de carbono liberado pelas folhas durante o processo respiratório, reduzindo a produção líquida. A base matemática para esse modelo é a equação de Monsi-Saeki, amplamente utilizada para descrever a distribuição da luz e o acúmulo de biomassa em dosséis vegetais. Assim, ao integrar a produção líquida foliar ao longo de todas as horas de luz durante o dia, obtém-se o estoque de **produtividade diária da cobertura vegetal**, que reflete o balanço entre a assimilação de carbono pela fotossíntese e as perdas por respiração.

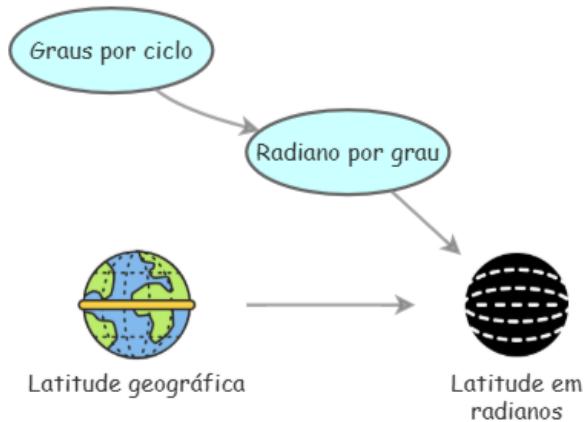


A **radiação fotoativa incidente** (RFI) varia ao longo do dia de forma semelhante a uma curva suave, como uma onda, com seu ponto mais alto por volta do meio-dia. O início e o fim dessa radiação coincidem com o nascer e o pôr do sol. A produção de energia pelas folhas, chamada de **fotoprodução do dossel**, acompanha essa variação da luz solar, mas com um comportamento diferente. Isso acontece porque as folhas podem atingir sua capacidade máxima de fotossíntese mesmo com níveis médios de luz, não sendo necessário esperar a intensidade máxima da radiação. Parte da energia produzida durante o dia é consumida pelas plantas à noite, durante a respiração. Por isso, a curva de produção acumulada – que representa a produção total ao longo do dia – tende a se estabilizar durante o período noturno. No verão, mesmo em regiões próximas aos polos, os valores de produção diária do dossel podem ser bastante altos devido à longa duração da luz do dia.



A respiração das folhas pode levar a perdas consideráveis de energia, especialmente quando o período de luz durante o dia é curto. Como as folhas localizadas nas camadas mais baixas da planta recebem menos luz e produzem pouca energia líquida, elas tendem a cair com o tempo. Isso limita o desenvolvimento do dossel e, em geral, resulta em um *índice máximo de área foliar* em torno de 5 — ou seja, cerca de cinco metros quadrados de folhas para cada metro quadrado de solo.

A *latitude geográfica* também exerce grande influência na produção das plantas, pois afeta a quantidade de radiação solar recebida de acordo com a estação do ano e a posição do sol no céu (*declinação solar*). Para estimar a produção total de biomassa, é essencial considerar o formato da curva de resposta à luz das folhas. Essa curva é definida por dois aspectos principais: a *fotoprodução máxima*, que ocorre quando a luz atinge um ponto de saturação, e a *inclinação inicial da curva de fotossíntese*, que representa a eficiência com que a planta utiliza os baixos níveis de radiação — especialmente importantes nos períodos de início e fim do dia, assim como nas regiões mais sombreadas do dossel foliar.



A tabela abaixo apresenta os valores e equações utilizados na simulação:

Configurações da simulação	<ul style="list-style-type: none"> Início da simulação: 0 Tempo de duração: 24 Passo: 0.05 Unidade de medida: Horas Algoritmo da simulação: Runge-Kutta de 4^a Ordem
VARIÁVEIS	
Atenuação de luz	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.7 Unidade de medida: adimensional
Constante solar	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 1650 Unidade de medida: [W/m²] (Watt=Joule/Segundo)
Declinação solar	<ul style="list-style-type: none"> Equação: $-23.4 * (\pi / 180) * \text{Cos}(2 * \pi * ([\text{Dia do calendário}] + 10) / 365)$ Unidade de medida: adimensional
Declive da função da fotossíntese	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.05 Unidade de medida: [gCO₂/W*Hora]

Dia do calendário	<ul style="list-style-type: none"> ● Valor: 173 ● Unidade de medida: dia
Elevação solar	<ul style="list-style-type: none"> ● Valor: $\text{Sin}([\text{Latitude em radianos}]) * \text{Sin}([\text{Declinação solar}]) + \text{Cos}([\text{Latitude em radianos}]) * \text{Cos}([\text{Declinação solar}]) * \text{Cos}(2\pi * [\text{Hora do dia}])$ ● Unidade de medida: adimensional
Fator de absorção da atmosfera	<ul style="list-style-type: none"> ● Valor: 0.534 ● Unidade de medida: adimensional
Fator de radiação fotoativa incidente com nuvens	<ul style="list-style-type: none"> ● Valor: 0.65 ● Unidade de medida: adimensional
Fotoprodução máxima	<ul style="list-style-type: none"> ● Valor: 3 ● Unidade de medida: [gCO₂/m²*hora]
Fração de radiação fotoativa incidente da luz solar	<ul style="list-style-type: none"> ● Valor: 0.47
Graus por ciclo	<ul style="list-style-type: none"> ● Valor: 360 ● Unidade de medida: graus
Hora do dia	<ul style="list-style-type: none"> ● Equação: ([Tempo]+12)/[Horas por dia]

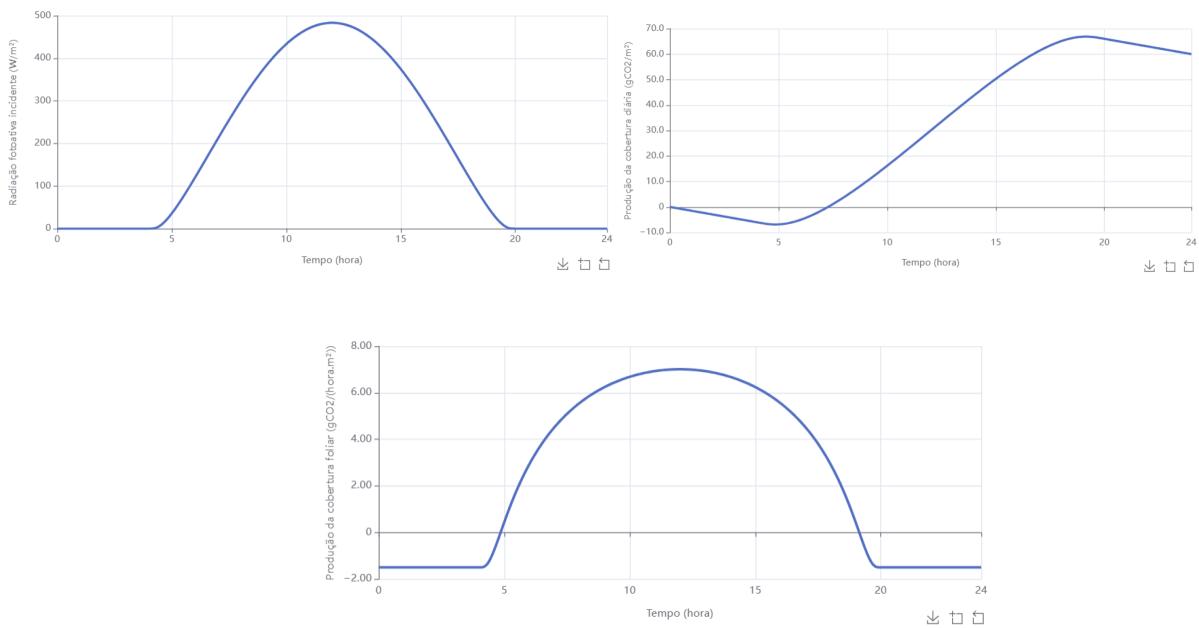
Horas por dia	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 24
Latitude em radianos	<ul style="list-style-type: none"> Equação: [Latitude geográfica]*[Radiano por grau] Unidade de medida: adimensional
Latitude geográfica	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 50 Unidade de medida: graus
Radiano por grau	<ul style="list-style-type: none"> Equação: $2\pi/[Graus por ciclo]$ Unidade de medida: 1/graus
Respiração média da folha	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.3 Unidade de medida: [gCO₂/m²*Hora]
Tempo	<ul style="list-style-type: none"> Equação: Hours()
Índice de área foliar	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 5 Unidade de medida: [m²/m²]
ESTOQUES	
Energia de radiação diária	<ul style="list-style-type: none"> Valor inicial: 0 Unidade de medida: [W*Hora/m²]
Horas diárias	<ul style="list-style-type: none"> Valor inicial: 24 Unidade de medida: horas

Produção diária de cobertura	<ul style="list-style-type: none"> Valor inicial: 0 Unidade de medida: [gCO₂/m²]
FLUXOS	
HORAS DE LUZ	<ul style="list-style-type: none"> Equação: IfThenElse([RADIAÇÃO FOTOATIVA INCIDENTE]>0.001, 1,0) Início: Zero Fim: Horas diárias
PRODUÇÃO DA COBERTURA FOLIAR	<ul style="list-style-type: none"> Equação: ([Fotoprodução máxima]/[Atenuação de luz])*Ln((1+[Declive da função da fotossíntese]/[Fotoprodução máxima]*[RADIAÇÃO FOTOATIVA INCIDENTE])/(1+([Declive da função da fotossíntese]/[Fotoprodução máxima])*[RADIAÇÃO FOTOATIVA INCIDENTE]*Exp(-[Atenuação de luz]*[Índice de área foliar])))-[Respiração média da folha]*[Índice de área foliar] Início: Zero Fim: Produção diária de cobertura Unidade de medida: [gCO₂/(m²*hora)]
RADIAÇÃO FOTOATIVA INCIDENTE	<ul style="list-style-type: none"> Equação: IfThenElse([Elevação solar]>0.01,[Fator de radiação fotoativa incidente com nuvens]*[Fração de radiação fotoativa incidente da luz solar]*[Constante solar]*[Elevação solar]*Exp(-[Fator de absorção da atmosfera]/[Elevação solar]), 0) Início: Zero Fim: Energia de radiação diária Unidade de medida: [W/m²]

4.2.1 - Resultados da simulação

No modelo de fotossíntese, a variável de Índice de Área Foliar representa a área total das folhas disponíveis para captar luz e realizar fotossíntese. Esse parâmetro é ajustável na simulação, refletindo diferentes níveis de cobertura vegetal, enquanto os demais parâmetros permanecem constantes.

Figura 9, 10 e 11: Taxas de fotossíntese diária de uma copa foliar (9 - Radiação fotoativa incidente; 10 - Produção da cobertura diária; 11 - Produção da cobertura foliar).



O gráfico de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) na figura 9, medido em watts por metro quadrado (m^2), acompanha o ciclo diário da luz solar. Observa-se que, ao amanhecer, a intensidade luminosa se eleva gradualmente, atingindo o pico ao meio-dia, seguido de uma redução até o anoitecer. O gráfico da produção diária de cobertura foliar (Figura 10) reflete esse comportamento.

Durante a noite, as plantas permanecem em respiração celular, utilizando energia, mas sem realizar fotossíntese. Com o aumento da luz durante o dia, a produção de biomassa cresce, apresentando uma curva semelhante à da radiação, com maior intensidade nos períodos de luz máxima. O modelo também demonstra que, quanto maior o índice de área foliar, maior é a capacidade de captação de luz e, consequentemente, maior a produção de biomassa vegetal.

Além disso, a simulação permite observar padrões globais de Produtividade Primária Líquida (PPL), que variam conforme a latitude. Os ecossistemas terrestres mais produtivos estão concentrados nas regiões tropicais, devido à combinação de alta intensidade solar, temperaturas elevadas, elevada precipitação e reciclagem eficiente de nutrientes, que favorecem o crescimento vegetal (Ricklefs, 1996). Por outro lado, nas regiões temperadas e polares, a PPL é significativamente menor, resultado de períodos mais curtos de luz solar e temperaturas mais baixas, especialmente no inverno. Em ecossistemas desérticos, localizados

nas faixas de aproximadamente 30°N e 30°S, a principal limitação da produtividade está relacionada à escassez de água, mesmo com alta incidência de luz solar. Da mesma forma, nos oceanos, a maior produtividade é observada nas regiões costeiras, onde há maior disponibilidade de nutrientes, enquanto o oceano aberto apresenta baixos níveis de PPL devido à limitação desses recursos (Tonello, 2007).

O modelo, portanto, reforça que luz, temperatura, precipitação e disponibilidade de nutrientes são determinantes no processo fotossintético e na produtividade dos ecossistemas, tanto terrestres quanto aquáticos.

4.3 - Cultivo de microalgas em fotobiorreator

Definidas como microalgas e macroalgas, esse grupo amplamente diverso são responsáveis por até 50% da fixação de carbono do planeta, compreendendo, portanto, a um grupo de organismos fotossintéticos unicelulares ou multicelulares (Croft et al., 2006; Lee, 2008). Dentro deste contexto, pode-se dizer que as microalgas nada mais são que algas microscópicas que habitam ambientes marinhos e de água doce.

As microalgas possuem alto potencial quanto à produção de energia. O crescimento das algas depende de diversos fatores como luz e temperatura, e por isso a otimização do cultivo de microalgas está relacionado aos parâmetros de operação do fotobiorreator. Nessa mesma perspectiva de Hinterholz (2018), ainda coloca os obstáculos de fatores físicos e químicos influenciam na composição e no cultivo das microalgas para que se possa atingir uma produtividade máxima.

Nesse sentido, os estudos de Hermanto (2009) apontam a utilização de modelos para descrever o crescimento no cultivo de algas, buscando em seu trabalho o design de métodos experimentais para obter cinética de crescimento de algas com mais precisão. Dessa forma, o cultivo de Microalgas em Fotobiorreator também é considerado um sistema complexo integrado, interconectado e autossustentável, assim como o Ciclo do Carbono na atmosfera e Fotossíntese de Plantas.

4.3.1 – O que é um fotobiorreator?

O fotobiorreator para o cultivo de microalgas é um equipamento construído para servir como um espaço ideal para o crescimento de organismos fotossintetizantes aquáticos, aqueles que usam a luz como fonte de energia, gerando, assim, um ambiente controlado e propício

para o estudo do desenvolvimento de microalgas. Posten (2009) afirma a potencialidade da utilização dos fotobiorreatores nesse processo como a possibilidade de um cultivo sob uma ampla variedade de condições, evitando até certo ponto a competição da cepa de produção com outras algas ou a contaminação de microrganismos indesejáveis. Segundo o autor, biorreatores de sistemas fechados possuem maior produtividade de área e prevenção da perda de água por evaporação ou fatores externos.

Diversos tipos de óleos vêm sendo utilizados em diferentes países como matéria-prima para a produção de biodiesel. Além disso, pesquisas têm explorado outras fontes, tanto de origem comestível quanto não comestível, como gorduras animais, óleos residuais de cozinha e microalgas. Nesse contexto, as microalgas se destacam devido ao seu rápido crescimento e à capacidade de acumular lipídios, o que lhes confere um elevado potencial para a produção de biodiesel (Hermanto, 2009).

O uso prolongado de combustíveis fósseis derivados do petróleo é atualmente amplamente considerado insustentável, em virtude tanto do esgotamento gradual das reservas assim como o impacto significativo desses combustíveis na intensificação do acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera, contribuindo para o agravamento das mudanças climáticas (Chisti, 2007). Consequentemente, o combustível fóssil é considerado energia não renovável, no qual a quantidade disponível tem diminuído cada vez mais.

Tendo em vista a produção insustentável de energias não renováveis, são notórias as limitações quanto à produção de biocombustíveis de primeira geração, produzidos principalmente a partir de culturas alimentares e sementes oleaginosas, o que acaba por gerar uma competição entre o uso desses recursos para combustível ou para a produção de alimentos. As preocupações aumentaram o interesse em desenvolver biocombustíveis de segunda geração produzidos a partir de matérias-primas não alimentares, como microalgas, que potencialmente oferecem maiores oportunidades a longo prazo (Mata, Martins e Caetano, 2010). A maior parte desses microrganismos são fototróficos, ou seja, necessitam de uma fonte de luz, água e nutrientes básicos para seu crescimento, atrelado, também, a técnicas específicas de cultivo, colheita e processamento que devem ser considerados para sua produção.

O cultivo de microalgas pode ser realizado em diversos sistemas com volumes e características diferentes, seja em sistema aberto como em águas naturais de lagos, águas

artificiais de tanques ou em sistema fechado como nos fotobiorreatores. Uma das vantagens do cultivo em sistema aberto é a facilidade de sua construção e operação se comparado aos sistemas fechados (Bjerk, 2012). Entretanto, destacam-se algumas limitações quanto à utilização de pouca luz pelas células, perdas por evaporação, a difusão do CO₂ para a atmosfera e a exigência de grandes áreas, além da baixa transferência de massa devido aos mecanismos de agitação em sistemas de cultivo aberto ser menos eficientes, resultando em uma baixa produtividade de biomassa.

Nesse sentido, um fotobiorreator pode ser definido como um ambiente fechado ou semifechado, projetado para promover o crescimento de organismos fototróficos, utilizando a luz solar ou artificial como fonte de energia, além, é claro, da sua facilidade de controle para cultura de espécies únicas (Hermanto, 2009). Assim, utilizando-se de determinadas variáveis e parâmetros, o crescimento de microalgas em fotobiorreator realizado no Laboratório de Fotobiorreatores (NFAM), na Universidade de Brasília (UnB), possibilitou o estudo experimental para a modelagem de sistemas biológicos, conhecendo, assim, a dinâmica de funcionamento das mesmas.

Figura 12: Fotobiorreator do Laboratório de Fotobiorreatores (NFAM).



De acordo com a pesquisa de Chiu et al. (2008), fotobiorreatores integrados com microalgas representam um sistema biológico de alta eficiência na conversão de CO₂ em biomassa, visto que foi possível observar conversão satisfatória de dióxido de carbono em biomassa. Por isso, a utilização de fotobiorreator como uma estratégia de mitigação de CO₂

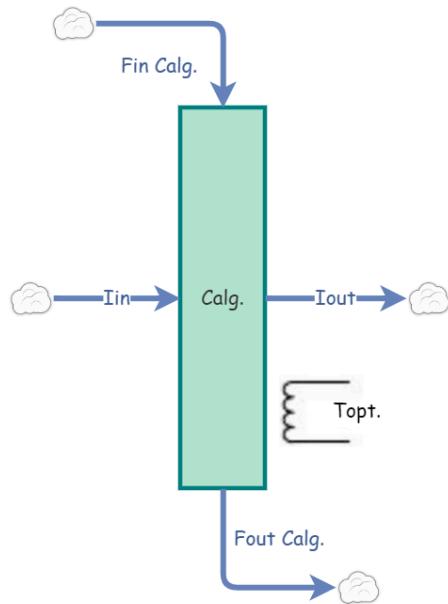
configura uma abordagem prática e promissora para a eliminação de gases residuais provenientes das emissões de dióxido de carbono, proporcionando controle mais eficiente da cultura.

4.3.2 – Descrição do modelo de crescimento de microalgas em fotobiorreator

A pesquisa de crescimento de microalgas em fotobiorreator está localizada no Laboratório de Fotobiorreatores (NFAM), na Universidade de Brasília (UnB), o qual integra o Instituto de Física (IF) da universidade. Assim, a descrição do modelo foi embasada na tese de Hermanto (2009) a respeito do design de métodos experimentais para obter cinética de crescimento de algas utilizado para avaliar os parâmetros estimados.

Esquematicamente o modelo experimental pode ser representado de acordo com a figura 13 abaixo, juntamente com os parâmetros analisados.

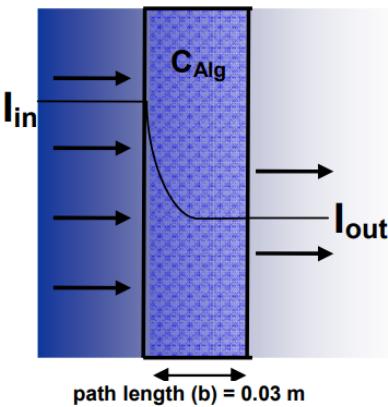
Figura 13: Modelo do fotobiorreator de algas criado no *Insight maker*.



A figura 13 representa um fotobiorreator de placa plana utilizado para desenvolver um modelo. Os componentes envolvidos em um sistema fotobiorreator são C_{Alg} [g/l] é a concentração de algas, F_{in} or F_{out} [l/h] é o fluxo de líquido de entrada ou saída no fotobiorreator, μ [h^{-1}] a taxa de crescimento específico das algas, V [l] a capacidade de volume do fotobiorreator e I [$\mu\text{. mol}/m^2 \cdot s$] refere-se à intensidade da luz.

Assim, os parâmetros de estudo podem ser descritos na figura 13, de modo em que há um fluxo de entrada, ou seja, concentração inicial de algas no fotobiorreator, assim como um fluxo de saída de certa concentração de algas. Também são considerados o crescimento e volume de algas dentro do fotobiorreator. A intensidade da luz é um fator que contribui para a limitação do crescimento das algas, em razão da transmissão de luz, de uma parcela que é absorvida e outra refletida, além dos fenômenos de auto-sombreamento. Dessa forma, a intensidade luminosa diminui progressivamente ao longo do trajeto no fotobiorreator, conforme é ilustrado na figura 14.

Figura 14: Atenuação de luz em fotobiorreator.



Fonte: Hermanto (2009).

De acordo com Hermanto (2009) um modelo matemático é uma representação de um sistema real que geralmente é focado em um conjunto de propriedades e características. Os modelos são fundamentais para as metodologias modernas de engenharia de processos, como simulação, otimização e controle.

O modelo matemático foi fundamentado no sistema de equações diferenciais, definido como um conjunto de duas ou mais equações diferenciais que descrevem como várias funções dependem de uma ou mais variáveis independentes e estão interligadas entre si. Em geral, esses sistemas modelam fenômenos em que diferentes quantidades evoluem de maneira interdependente ao longo do tempo ou em relação a outras variáveis (Pata, 2017). Nesse sentido, conforme Hermanto (2009), pode-se considerar que inicialmente o balanço de massa neste sistema é:

$$[\text{massa acumulada}] = [F_{in} \text{ de massa}] - [F_{out} \text{ de massa}] \pm [\text{produção ou consumo de massa}]$$

$$\frac{d[V \cdot C_{Alg}]}{dt} = F_{in} \cdot C_{Alg,in} - F_{out} \cdot C_{Alg,out} + \mu \cdot C_{Alg} \cdot V$$

Considerando a derivada do produto, tem-se:

$$V \frac{dC_{Alg}}{dt} + C_{Alg} \frac{dV}{dt} = F_{in} \cdot C_{Alg,in} - F_{out} \cdot C_{Alg,out} + \mu \cdot C_{Alg} \cdot V$$

A variação de volume é a diferença entre o fluxo de entrada e saída, ou seja:

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out}$$

Substituindo na equação, tem-se:

$$\begin{aligned} V \frac{dC_{Alg}}{dt} + C_{Alg}(F_{in} - F_{out}) &= F_{in} \cdot C_{Alg,in} - F_{out} \cdot C_{Alg,out} + \mu \cdot C_{Alg} \cdot V \\ V \frac{dC_{Alg}}{dt} &= F_{in} \cdot C_{Alg,in} - F_{out} \cdot C_{Alg,out} + \mu \cdot C_{Alg} \cdot V - C_{Alg}(F_{in} - F_{out}) \\ V \frac{dC_{Alg}}{dt} &= F_{in} \cdot C_{Alg,in} - F_{out} \cdot C_{Alg,out} + \mu \cdot C_{Alg} \cdot V - C_{Alg} \cdot F_{in} + C_{Alg} \cdot F_{out} \\ V \frac{dC_{Alg}}{dt} &= \mu \cdot C_{Alg} \cdot V - C_{Alg} \cdot F_{in} \end{aligned}$$

Considerando que nenhuma alga entra no sistema, tem-se:

$$\frac{dC_{Alg}}{dt} = \frac{\mu \cdot C_{Alg} \cdot V}{V} - \frac{C_{Alg} \cdot F_{in}}{V}$$

Na equação, a mudança da concentração de algas depende de dois termos. O primeiro termo é a ***taxa de crescimento específica das algas*** (μ) que depende da expressão cinética. Segundo termo é chamado de ***fator de diluição*** ($D = \frac{F}{V}$).

A expressão cinética é a parte do modelo que determina a produção ou consumo específico dentro de um sistema de biorreator. A equação foi também usada como modelos cinéticos de crescimento limitados pela luz com μ_{max} como taxa máxima de crescimento específico, sendo K_1 a ***constante de saturação*** para intensidade de luz, em que o crescimento máximo é atingido, K_2 a ***constante de inibição*** e I a ***intensidade de luz***. Assim, quanto menor for o K_2 , maior o efeito de inibição da intensidade luminosa.

$$\mu = \mu_{max} \frac{I}{I + K_1 + \frac{I}{K_2}}$$

A atenuação da luz também contribui para a limitação do crescimento de algas devido à transmissão de luz e fenômenos de auto-sombreamento. É certo que a intensidade da luz diminui ao longo do comprimento do caminho no fotobiorreator que é apresentado na Figura 14. Assim, a intensidade média da luz e o gradiente de luz dentro de um fotobiorreator de placa plana é posta como:

$$I_{média} = I_{in} \cdot \frac{1}{b} (1 - e^{-a_c \cdot C_{Alg} \cdot b}) \cdot \frac{1}{C_{Alg} \cdot a_c}$$

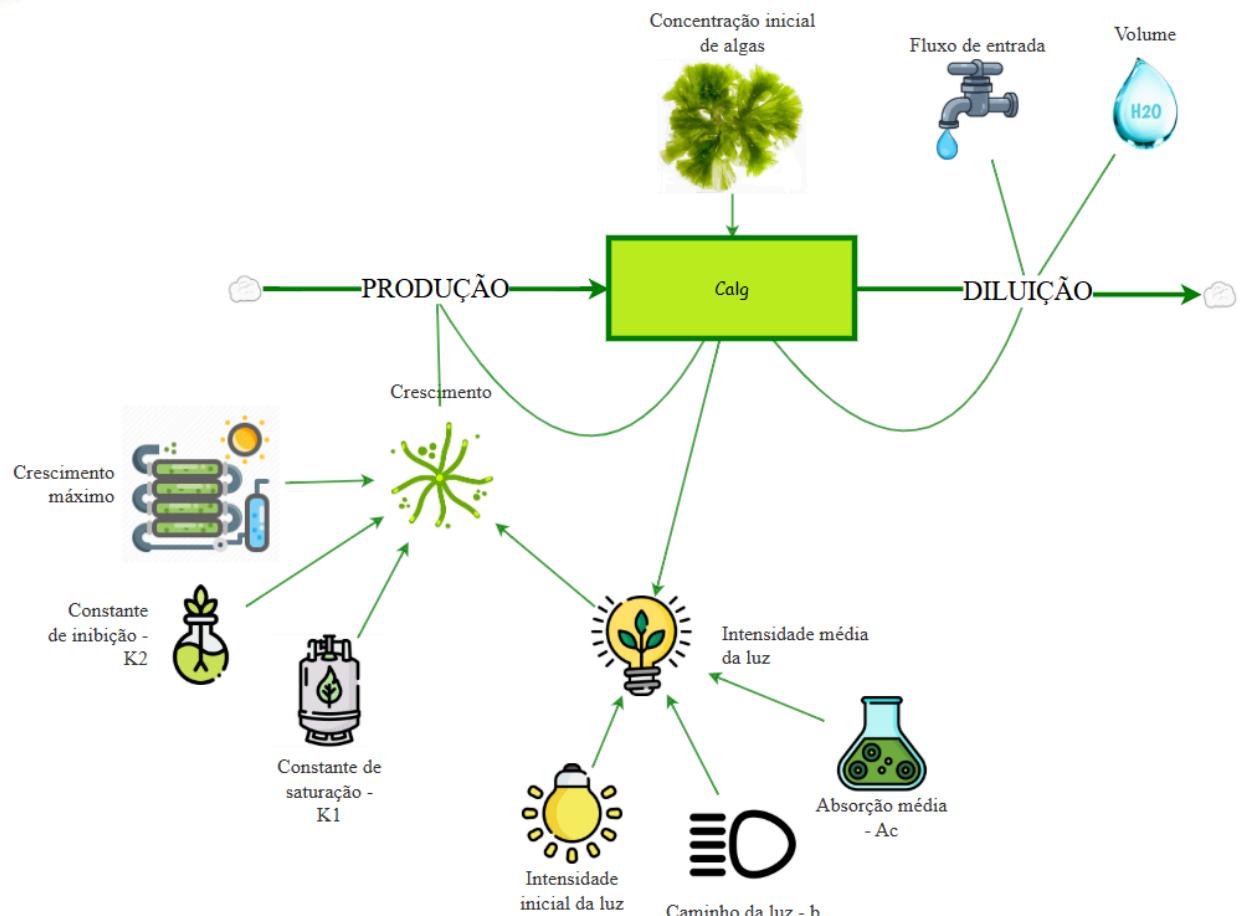
Na qual b é o **caminho da luz** do fotobiorreator e a_c é o **coeficiente de absorção médio espectral**. Os valores dessas constantes são respectivamente:

$$b = 0.03 \text{ m}$$

$$a_c = 200 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Nesse contexto, de acordo com a Dinâmica de Sistemas, o diagrama de estoque e fluxo da cinética de crescimento de microalgas em fotobiorreator foi esquematizado conforme a figura 13.

Figura 15: Modelo computacional de Crescimento de Microalgas em Fotobioreator.



A tabela abaixo apresenta os valores e equações utilizados na simulação:

Configurações da simulação	<ul style="list-style-type: none"> Início da simulação: 0 Tempo de duração: 240 Passo: 0.1 Unidade de medida: Horas Algoritmo da simulação: Runge-Kutta de 4^a Ordem
VARIÁVEIS	
Absorção média - A_c	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 200 Unidade de medida: m² Kg⁽⁻¹⁾
Caminho da luz - b	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.03 Unidade de medida: metros

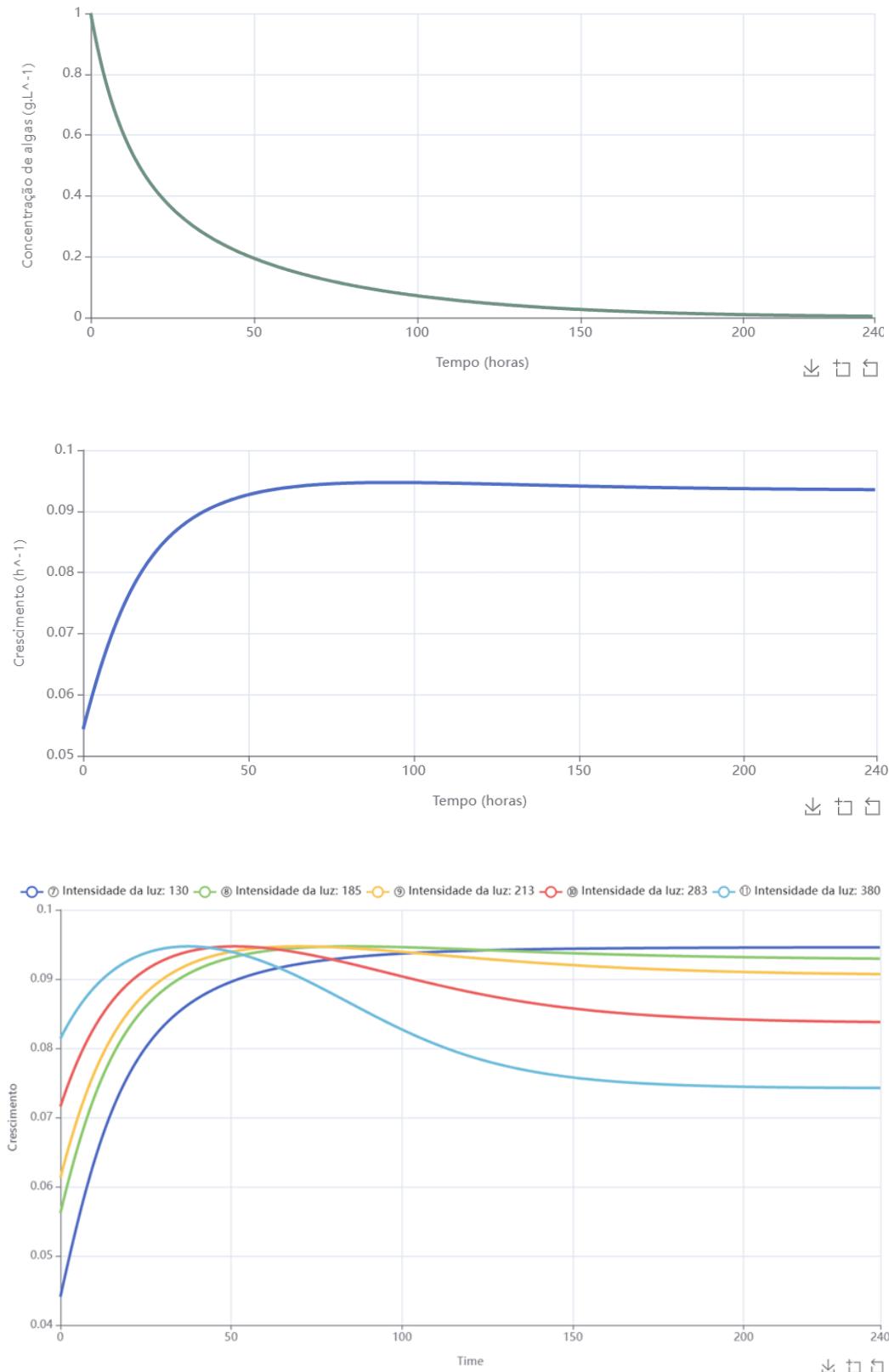
Concentração inicial de algas	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 1 Unidade de medida: g.L⁻¹
Constante de inibição - K2	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 276 Unidade de medida: μmol*(m⁻²)*(s⁻¹)
Constante de saturação - K1	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 69.86 Unidade de medida: μmol*(m⁻²)*(s⁻¹)
Crescimento	<ul style="list-style-type: none"> Equação: [Crescimento máximo]*([Intensidade média da luz]/([Intensidade média da luz]+[Constante de saturação - K1]+([Intensidade média da luz]²)/[Constante de inibição - K2])) Unidade de medida: h⁻¹
Crescimento máximo	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.19 Unidade de medida: hora⁻¹
Fluxo de entrada	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 0.33 Unidade de medida: L/hora⁻¹
Intensidade inicial da luz	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 175.84 Unidade de medida: μmol*(m⁻²)*(s⁻¹)
Intensidade média da luz	<ul style="list-style-type: none"> Equação: [Intensidade inicial da luz]*(1/[Caminho da luz - b])*(1-Exp(-[Absorção média - Ac]*[Calg]*[Caminho da luz - b]))*(1/([Calg]*[Absorção média - Ac])) Unidade de medida: μmol*(m⁻²)*(s⁻¹)
Volume	<ul style="list-style-type: none"> Valor: 2.89 Unidade de medida: Litros
ESTOQUES	

Calg	<ul style="list-style-type: none"> Valor inicial: [Concentração inicial de algas] Unidade de medida: $\mu\text{mol}^*(\text{m}^{-2})^*(\text{s}^{-1})$
FLUXOS	
DILUIÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> Equação: $([\text{Fluxo de entrada}]/[\text{Volume}]) * [\text{Calg}]$ Início: Calg Fim: Zero Unidade de medida: h^{-1} (quantidade de algas por hora)
PRODUÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> Equação: $[\text{Crescimento}] * [\text{Calg}]$ Início: Zero Fim: Calg Unidade de medida: h^{-1} (quantidade de algas por hora)

4.3.3 - Resultados da simulação

A partir dos gráficos percebe-se que a concentração das algas no fotobiorreator, se existirem as condições mínimas, inicia com uma dinâmica de crescimento até atingir equilíbrio entre o crescimento e a diluição. Os dois parâmetros que temos maior controle são a *intensidade de luz* sobre as algas e a *diluição* no fotobiorreator. É possível variar os parâmetros para obter o máximo de produção e crescimento de microalgas, otimizando, então, todo sistema.

Figura 16, 17 e 18: Gráfico de concentração de algas (16), crescimento (17) e a variação do crescimento de algas em função das variações da intensidade da luz no fotobiorreator (18).



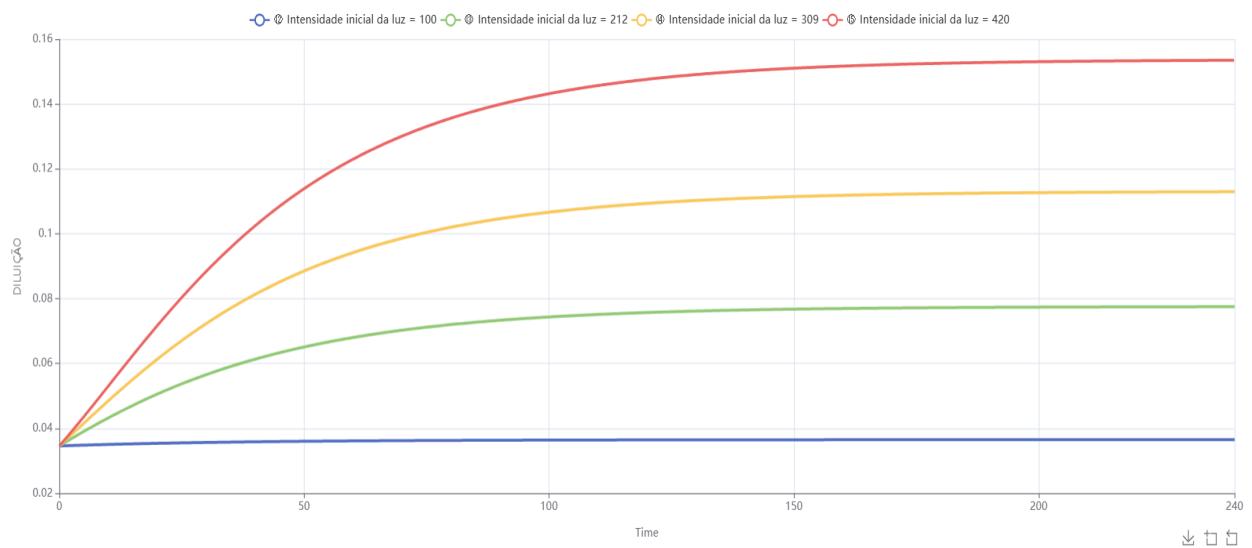
O gráfico de crescimento mostra que, à medida que a **intensidade de luz** aumenta, há um ponto ótimo que maximiza a taxa de fotossíntese e, consequentemente, o crescimento das

algas. Após esse ponto, observa-se uma fase de inibição por excesso de luz, na qual o crescimento continua, porém, em uma taxa reduzida até atingir um estado de equilíbrio. Esse equilíbrio ocorre quando a quantidade de algas produzidas é compensada pela **diluição**, mantendo o sistema estável. Ou seja, as algas continuam se multiplicando, mas ao mesmo tempo são removidas do meio de cultivo (diluição), de modo que a quantidade de algas no sistema se mantém constante, garantindo, portanto, uma produção sem acúmulo excessivo de biomassa.

Embora o crescimento desacelere, ele permanece positivo até atingir o ponto de estabilidade, caracterizado por um período transiente, seguido pela manutenção de concentração constante de biomassa.

O parâmetro de **diluição**, representado pelo fluxo de saída do sistema, também apresenta comportamento semelhante: cresce até um determinado limite e, posteriormente, se estabiliza. Esse equilíbrio entre produção de biomassa e diluição garante que o sistema opere de forma sustentável (Figura 19). Portanto, os dois principais parâmetros de controle para otimizar a produção de microalgas são: **intensidade da luz**, que influencia diretamente a taxa de crescimento e o **fluxo de entrada**, que regula a **diluição** das algas no meio.

Figura 19: Diluição de algas (produção de biomassa) em função das variações da intensidade da luz no fotobioreator.



O objetivo da otimização do sistema, portanto, é identificar a combinação ideal dos fatores para maximizar a concentração de biomassa. Além disso, a simulação poderia ser aprimorada utilizando softwares mais robustos, como o *Vensim*, amplamente utilizado na

modelagem de sistemas dinâmicos. Esse programa oferece ferramentas mais avançadas para desenvolvimento, validação e análise de modelos, permitindo simulações mais precisas e a obtenção de parâmetros mais refinados, aplicáveis a sistemas ambientais, ecológicos e científicos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando a modelagem de sistemas dinâmicos, este trabalho evidenciou a importância da abordagem sistêmica como ferramenta fundamental para compreender a complexidade dos fenômenos naturais. A utilização do software *Insight Maker*, aliado à linguagem de Dinâmica de Sistemas, permitiu representar, de forma visual e matemática, processos dinâmicos que regem ciclos biogeoquímicos, o Ciclo Global do Carbono e a Fotossíntese de Plantas, e processos, como o Cultivo de Microalgas em Fotobiorreatores.

A modelagem sistêmica possibilitou melhor compreensão das interações e retroalimentações presentes nesses sistemas, e contribuiu para construção de modelos mais precisos, reforçando a sua interdependência entre os elementos da natureza. Além disso, ao transpor conceitos complexos para diagramas de estoque e fluxo, junto às simulações, facilita-se o entendimento e a tomada de decisão em contextos científicos, educacionais e tecnológicos.

A integração entre diferentes áreas do conhecimento, por meio da Dinâmica de Sistemas, estratégia eficiente para análise de sistemas ambientais, oferece visão holística, essencial para enfrentar desafios contemporâneos, como a sustentabilidade e o uso racional dos recursos naturais. Portanto, conclui-se que a modelagem de sistemas contribui para o avanço científico, é uma ferramenta pedagógica poderosa para promover educação mais integrada, crítica e voltada para a compreensão dos sistemas complexos que sustentam a vida no planeta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, João A. **Desvendando Sistemas**, 2012. Livro de domínio público: <<https://www.joaoarantes.com.br/livro-on-line>>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- BJERK, Thiago R. **Cultivo de microalgas em fotobioreator e reator misto visando a biorremediação e produção de biocombustíveis**. Orientador: Schneider, Rosana de Cassia de Souza. 2012. 53 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Santa Cruz do Sul, [S. l.], 2012.
- BOSSEL, Harmut. **System Zoo 2 Simulation Models: Climate, Ecosystems, Resources**. BoD-Books on Demand, 2007.
- BRALOWER, Timothy; BICE, David. **Módulo 5: Ciclo Global do Carbono**. PennState, Earth 103: Terra no Futuro. Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/525>>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, DF: MEC, 2018. Disponível em: <https://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- CHISTI, Yusuf. **Biodiesel from microalgae**. Biotechnology advances, v. 25, n. 3, p. 294- 306, 2007.
- CHIU, Sheng. Y. *et al.* **Reduction of CO₂ by a high-density culture of Chlorella sp. in a semicontinuous photobioreactor**. Bioresource technology, v. 99, n. 9, p. 3389-3396, 2008.
- CROFT, Martin T.; WARREN, Martin J.; SMITH, Alison G. Algae need their vitamins. **Eukaryotic cell**, v. 5, n. 8, p. 1175-1183, 2006.
- DEVRIES, Tim. **The ocean carbon cycle**. Annual Review of Environment and Resources, v. 47, n. 1, p. 317-341, 2022.
- FORRESTER, Jay W. **Industrial dynamics**. MIT Press, Cambridge. Reprinted by Pegasus Communications, Waltham, 1961.
- FORRESTER, J. **The Beginning of System Dynamics**. International Meeting of the System Dynamics Society, Alemanha: 1989.

FORTMANN-ROE, Scott. Insight Maker: A general-purpose tool for web-based modeling & simulation. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 47, p. 28-45, 2014.

HERMANTO, Mochamad B. **Identification of algae growth kinetics**. Thesis Syst Control, 2009.

HINTERHOLZ, Camila L. *et al.* **Desenvolvimento de um fotobiorreator de placas planas para cultivo de microalgas com alta densidade celular**. 2018.

IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change.
<https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-1/>. 2020.

MATA, T. M.; MARTINS, A. a. e CAETANO, N. S. **Microalgae for biodiesel production and other applications: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 1, p. 217-232, doi:10.1016/j.rser.2009.07.020, 2010.

MEADOWS, Donella H. **Pensando em sistemas: Como o pensamento sistêmico pode ajudar a resolver os grandes problemas globais**. Tradução de Paulo Afonso. 1. ed. Rio de Janeiro: Sextante, 2022. 240 p.

PACHECO, Maria R. P. e HELENE, Maria E. M. **Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂**. Estudos avançados, v. 4, p. 204-220, 1990.

PATA, Rafael B. **Modelo de lotka-volterra para a dinâmica predador-presa**. 2022. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Matemática) - Universidade Federal do Pampa, Itaqui, 2017.

POSTEN, Clemens. **Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae**. Engineering in Life Sciences, v. 9, n. 3, p. 165-177, 2009

RIBEIRO, Eduardo *et al.* **Construção e avaliação de um fotobiorreator do tipo coluna de bolhas para o cultivo de microalgas em laboratório**. Trabalho de graduação – Engenharias. Universidade São Francisco.

RICKLEFS, Robert; RELYEA, Rick. **A economia da natureza**. Revisão Técnica por Cecília Bueno, Bióloga Doutora em Ciências - PPGG/UFRJ Professora Titular da Universidade Veiga de Almeida. Sétima edição. 1996. p. 5-8.

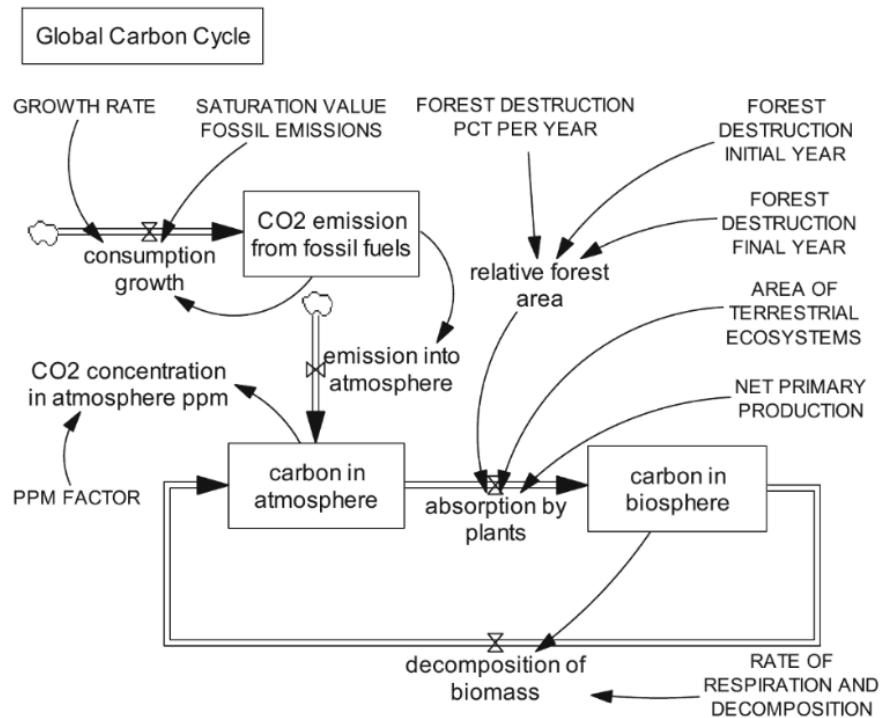
SAMPAIO, Fábio F. **Modelagem dinâmica computacional e o processo de ensino-aprendizagem: algumas questões para reflexão.** Relatório Técnico NCE, 1999.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics.** Editora McGraw-Hill, 2000.

TONELLO, Victor M. M. *Principais aspectos do ciclo biogeoquímico do elemento carbono e seu contexto na atualidade.* 2007. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) – Programa Interunidades em Ecologia Aplicada, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-15062007-110357/>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

VILLELA, Paulo RC. **Introdução à Dinâmica de Sistemas.** Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

ANEXO A - DIAGRAMA DE SIMULAÇÃO DO CICLO GLOBAL DO CARBONO



ANEXO B - DIAGRAMA DE SIMULAÇÃO DA FOTOPRODUÇÃO DE DOSSÉIS VEGETAIS

