



AVANÇOS DO SIMPLE BIOSPHERE MODEL (SIB) NA REPRESENTAÇÃO DOS PROCESSOS FÍSICOS E BIOGEOQUÍMICOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Aurilene Barros dos Santos de Andrade
Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Pará, Brasil
leneinpa@gmail.com

Júlio Tota
Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Pará, Brasil
totaju@gmail.com

Antonio Marcos Delfino de Andrade
Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Pará, Brasil
marcoslaba33@gmail.com

RESUMO – Esta revisão de literatura tem o objetivo de fornecer uma visão geral das melhorias e avanços do Simple Biosphere Model (SiB), no qual tem passado por evoluções na representação dos processos físicos e biogeoquímicos da superfície terrestre desde a sua implementação. Sua primeira modificação importante foi incluir o metabolismo do ecossistema e dados de satélite para gerar simulações mais realistas. Outras modificações surgiram ao longo dos anos, como por exemplo, o aperfeiçoamento da previsão de fotossíntese considerando estresses hídricos e térmicos, o particionamento da respiração em componente autotrófica e heterotrófica, a revisão do balanço de energia para incluir temperatura prognóstica, umidade e CO₂ no espaço aéreo do dossel e, introdução da fenologia prognóstica dinâmica ligando processos biofísicos e biogeoquímicos para prever o ciclo do carbono terrestre, removendo a dependência do índice de vegetação por satélite. O SiB é aplicado em escalas global, continental e regional, utilizado em modelos climáticos e estudos de interações superfície-atmosfera. Destacou-se em investigações sobre fluxos de carbono em diversos ecossistemas, incluindo florestas tropicais, regiões temperadas e áreas agrícolas. Portanto, o modelo SiB tem a capacidade de investigar mudanças nos fluxos superfície-atmosfera, na biomassa viva e nos reservatórios de carbono..

Palavras-chave: Fluxos de energia; Modelagem; Vegetação; Superfície-Atmosfera.

ADVANCES OF THE SIMPLE BIOSPHERE MODEL (SIB) IN THE REPRESENTATION OF PHYSICAL AND BIOGEOCHEMICAL PROCESSES: A REVIEW

ABSTRACT – This review aims to provide an overview of these improvements and advances in the Simple Biosphere Model (SiB), which has undergone evolution in the representation of the physical and biogeochemical processes of the land surface since its implementation. Its first important modification was to include ecosystem metabolism and satellite data to generate a more realistic simulation. Other modifications have emerged over the years, such as the improvement of photosynthesis prediction considering water stress and temperature stress, the partitioning of respiration into autotrophic and heterotrophic components, the revision of the surface energy budget to include prognostic temperature, moisture, and CO₂ in the canopy air space, and the introduction of dynamic prognostic phenology that links biophysical and biogeochemical processes to predict the terrestrial carbon cycle, removing the dependence on satellite-based vegetation indices. SiB is applied on global, continental, and regional scales and used in climate models and studies of surface-atmosphere interactions. It stood out in research on carbon fluxes in various ecosystems, including tropical forests, temperate regions, and

agricultural areas. Therefore, the SiB model has the ability to investigate changes in land-atmosphere fluxes, live biomass, and carbon pools.

Keywords: Energy flux; Modeling; Vegetation; Surface-Atmosphere.

INTRODUÇÃO

Os modelos de superfície terrestre (Land surface models - LSMs) desempenham um papel importante na previsão de fluxos biogeoquímicos, como água, energia e calor, entre a superfície e a atmosfera (PITMAN 2003). No entanto, devido à diversidade e complexidade das interações no sistema terrestre, os LSMs muitas vezes têm dificuldade em reproduzir corretamente os processos físicos nas florestas (RAUPACH e FINNIGAN, 1988; RAUPACH et al. 1991).

Desde a década de 1960, os pesquisadores têm se dedicado a medir e modelar as trocas de calor, vapor d'água e CO₂ entre as plantas e a atmosfera (INOUE, 1963; CIONCO, 1965; RAUPACH, 1988). Eles buscavam entender como os processos dessas trocas acima do dossel estavam vinculados com a fisiologia da planta e estruturas do dossel (WILSON e SHAW 1977; SELLERS et al. 1986, 1992). No entanto, a formulação matemática desses processos é desafiadora devido à não linearidade em relação a vários parâmetros ambientais e a sua variação ao longo do dossel.

Ao calcular fluxos de superfície para modelos de previsão do tempo e clima, esses modelos de superfície devem equilibrar a complexidade do processo com eficiência computacional, e por esse motivo a grande maioria dos LSMs representam a copa das plantas como uma única camada homogênea de fitomassa sem estrutura vertical (conhecida como big leaf – folha grande em tradução livre). A intenção dos modelos de folha grande é calcular os fluxos que igualam a soma dos fluxos de todas as folhas no dossel sem a complexidade e carga computacional de resolver várias camadas no dossel. A equação de Penman-Monteith para evaporação é um exemplo clássico desse modelo (MONTEITH 1965).

Deardorff, (1978) formalizou a estrutura moderna para modelos de superfície terrestre usando uma única camada de folha, mas com fluxos separados para folhas e solo (conhecido como dossel de fonte dupla). O espaço de ar do dossel é tratado como um volume total com uma temperatura e umidade específica determinada assumindo ser uma fonte/sumidouro dos fluxos de calor e umidade das folhas e do solo para o espaço de ar do dossel, equilibrando o fluxo do ar para a atmosfera. Esta estrutura foi adotada para o Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme - BATS; (DICKINSON et al. 1986, 1993) o Simple Biosphere model (SiB); (SELLERS et al., 1986; SELLERS et al., 1996b, 1996a) e gerações subsequentes de modelos de superfície terrestre. Uma desvantagem do dossel de camada única usado em modelos de superfície terrestre é que negligencia perfis verticalmente variáveis e os microclimas dentro do dossel e suas consequências para estimar fluxos de superfície (NIINEMETS et al. 2015; KEENAN e NIINEMETS 2016).

Modelos mais avançados, como os de dossel multicamadas, foram desenvolvidos nas últimas décadas para simular características específicas das copas das florestas, incluindo perfis verticais de absorção de luz, velocidade do vento, potencial hídrico da folha e temperatura do ar (LAUNIAINEN et al., 2015; FLERCHINGER et al., 2016; CHANG et al., 2018). Esses modelos também consideram a transferência radiativa, condutância estomática, fluxos de energia foliar, fluxos do solo e difusão turbulenta, associados a equações para temperatura e conservação do vapor d'água em cada camada (BONAN et al., 2014, ASHWORTH et al., 2015; 2018). Além disso, esses modelos levam em conta a concentração de CO₂ nas copas, sendo essenciais para simular a química das florestas (SAYLOR, 2013; CHEN et al., 2016; RYDER et al., 2016; XU et al., 2017).

Embora modelos de dossel multicamadas sejam precisos em simular a física do dossel, requerem um alto custo computacional devido à grande quantidade de informações necessárias para representar os processos que ocorrem no dossel. Isso introduz uma complexidade difícil de implementar ao acoplar a superfície e a atmosfera em modelos de previsão do tempo e climáticos, além de aumentar o custo computacional. Em contraste, os modelos de dossel de camada única, embora incorretos em termos de física, são considerados mais simples, eficientes computacionalmente e úteis para o acoplamento

nos modelos de previsão. Diante do que foi exposto, esta revisão tem como objetivo fornecer uma visão geral das melhorias e avanços do Simple Biosphere Model (SiB) na representação dos processos físicos e biogeoquímicos da superfície terrestre.

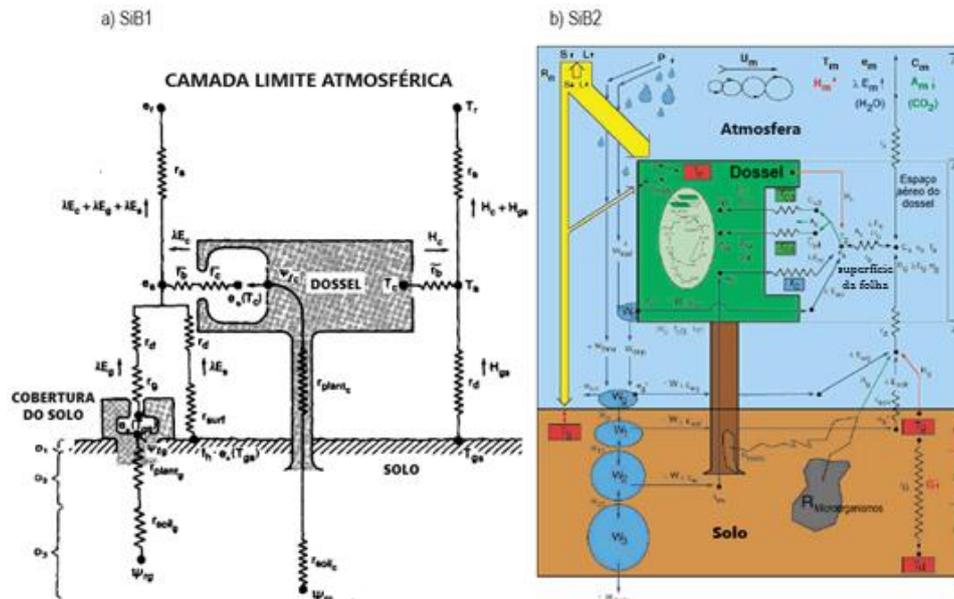
EVOLUÇÃO DO SIMPLE BIOSPHERE MODEL (SIB)

O modelo de superfície Simple Biosphere Model tem passado por melhorias e alguns avanços importantes desde sua primeira versão (doravante referido como SiB1). O SiB1 começou como um modelo de biosfera simples, mas realista, desenvolvido para calcular a transferência de energia, massa e momento entre a vegetação terrestre e a atmosfera (SELLERS et al. 1986). A referida ferramenta foi projetada para fornecer estimativas aprimoradas das trocas de radiação solar e terrestre, umidade, calor sensível e momento entre a superfície da terra e a atmosfera para uso em modelos de circulação geral atmosférica (GCMs, do inglês General Circulation Models) (SELLERS et al. 1996b). O esquema de parametrização utilizou duas camadas de vegetação distintas com propriedades físicas e fisiológicas prescritas; e o modelo tinha sete variáveis prognósticas de estado físico: duas temperaturas (uma temperatura do dossel e uma temperatura para o solo e cobertura vegetal), dois armazenamentos de água interceptada (no dossel e na cobertura vegetal) e três armazenamentos de umidade do solo (uma em cada camada) (HAYNES et al. 2020). Sua estrutura é mostrada na Figura 1a.

O supracitado modelo foi aprimorado por Randall et al. (1996) e Sellers et al. (1996a, 1996b) com o objetivo de produzir um modelo mais realista de fotossíntese e condutância do dossel adicionando metabolismo do ecossistema e dados de satélite (Figura 1b). Essas e outras alterações realizadas na primeira versão (SiB1) resultou na segunda versão (SiB2) sintetizadas por Sellers et al. (1996a) da seguinte forma:

- Inserção de um modelo de condutância estomática da folha para descrever as transferências simultâneas de CO₂ e vapor d'água, para dentro e para fora da folha;
- Utilização de dados de satélite para descrição da fenologia da vegetação;
- Alterações no submodelo hidrológico para melhor descrever o fluxo e calcular com mais confiabilidade as trocas entre as camadas nos perfis do solo;
- Inclusão de uma descrição do derretimento de neve; Mudança de duas para uma camada de vegetação;
- Modificação dos tipos de cobertura vegetal resultando em uma diminuição de 12 para 9 tipos

Figura 1. a) Representação esquemática do SiB1 com duas camadas de vegetação (dossel e cobertura do solo), três camadas de solo (D1, D2 e D3) e o processo de transferência turbulenta de energia: fluxos de calor latente (lado esquerdo) e calor sensível (lado direito), o processo de transferência radiativa, transporte e interceptação de água no solo e dossel foram omitidos. e b) estrutura do SiB2 com uma camada de vegetação (dossel), três camadas de solo, processo de transferência radiativa (setas amarelas), transporte e interceptação de água no solo e dossel (círculos azuis), processo de fotossíntese e condutância estomática e processo de transferência turbulenta de energia e gases (no dossel, no espaço aéreo do dossel e no solo).

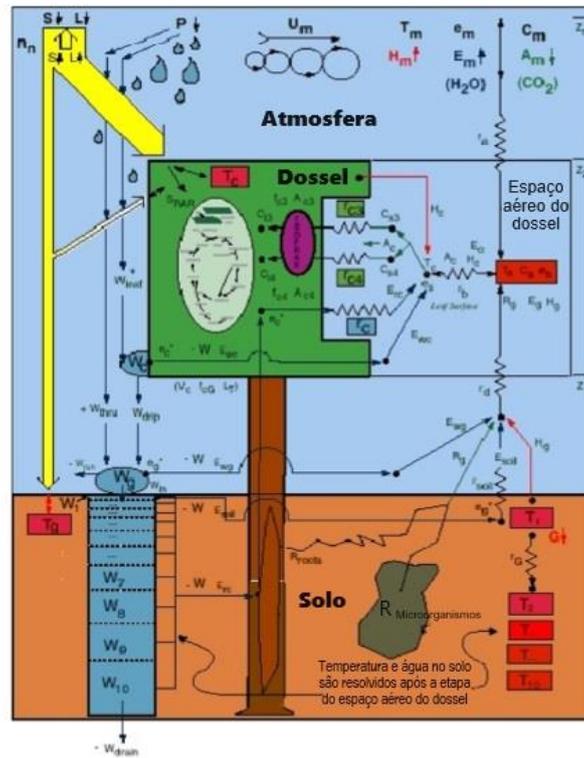


Fonte: Sellers et al. (1986, p. 511) e Pinheiro (2018, p. 23).

O SiB2 foi revisado e várias modificações foram adicionadas para criar o SiB3. Uma dessas modificações foi revisar o balanço de energia da superfície para incluir o prognóstico de temperatura do ar, umidade e CO₂ no espaço aéreo do dossel (CAS, do inglês canopy air space) para produzir cálculos de fluxo mais realistas (VIDALE e STÖCKLI, 2005). Outra mudança foi melhorar a hidrologia do modelo, adotando o submodelo Community Land Model soil/snow, nos quais, a temperatura e a umidade do solo são calculadas para dez camadas de solo e até cinco camadas de neve (DAI et al., 2003). Todas essas camadas têm tratamento explícito de água líquida e gelo, e o perfil da raiz no solo depende do tipo de vegetação e diminui exponencialmente da superfície até a camada inferior do solo (HAYNES et al., 2020; JACKSON et al., 1996).

Para melhorar a fotossíntese foram realizadas três modificações importantes. Primeiro, o estresse hídrico do solo foi alterado para vincular o estresse hídrico a uma densidade de raízes efetiva e, assim, simular uma resposta mais realista da fotossíntese à seca (BAKER et al., 2008; 2013). Assim como o estresse de temperatura que foi modificado para incluir uma aproximação simples do estresse de geada e, assim, incluir uma resposta fotossintética à geada (BAKER, 2011). Em segundo lugar, para ajudar a melhorar o ciclo anual de absorção e liberação de carbono, a respiração foi dividida em componentes autotróficos e heterotróficos (SCHAEFER et al., 2002). Por último, foi adicionada a capacidade de modelar a discriminação de isótopos de carbono, fracionamento biogeoquímico e a reciclagem de isótopos de carbono estáveis (SUITS et al., 2005). Uma representação atualizada do SiB3 é mostrada na Figura 2.

Figura 2. Representação esquemática do SiB3 com uma camada de vegetação (dossel), dez camadas de solo, processo de transferência radiativa (setas amarelas), transporte e interceptação de água no solo e dossel (círculos e quadrados azuis), processo de fotossíntese e condutância estomática, discriminação de isótopos de carbono C3/C4 (círculo roxo) e processo de transferência turbulenta de energia e gases (no dossel, no espaço aéreo do dossel e no solo).



Fonte: Biocycle, 2023

Tabela 1. Esquema de classificação da vegetação utilizado no SiB1, SiB2 e SiB3

SiB1		SiB2 e SiB3	
Tipo	Nome	Tipo	Nome
1	Árvores com folhas largas e verde	1	Árvores com folhas largas e verde
2	Árvores decíduais com folhas largas	2	Árvores decíduais com folhas largas
3	Árvores com folhas largas e aciculifoliadas	3	Árvores com folhas largas e aciculifoliadas
4	Árvores aciculifoliadas e verdes	4	Árvores aciculifoliadas e verdes
5	Árvores decíduais aciculifoliadas	5	Árvores decíduais aciculifoliadas
6	Árvores com folhas largas e solo com cobertura	6	Vegetação curta / C4 - pastagem
7	Solo com cobertura	7	Arbusto com folhas largas e solo descoberto
8	Arbusto com folhas largas e solo com cobertura	8	Árvore baixa e arbustos
9	Arbusto com folhas largas e solo descoberto	9	Agricultura / C3 - pastagem
10	Árvore baixa e arbustos		
11	Solo descoberto sem vegetação		
12	Árvores com folha larga e trigo de inverno		

Fonte: Adaptado de Sellers et al. (1996, p. 680).

Conforme o SiB se desenvolveu, ele se ramificou para diferentes versões, cada uma adicionando novos recursos de modelagem para lidar com preocupações e incertezas no ciclo do carbono (HAYNES et al., 2020), a saber:

- SiBPP, no qual adicionou a capacidade de prever a fenologia da vegetação e o estado da folha, em vez de depender de produtos de satélite (STÖCKLI et al., 2008; 2011);
- SiBcrop, que prevê a fenologia da cultura (especificamente milho, soja e trigo) usando um esquema de alocação de carbono baseado em graus-dia de crescimento (GDD, do inglês *growing degree-days*). Também prevê a biomassa e o rendimento da cultura, além de simular trocas superfície-atmosfera para essas espécies (LOKUPITIYA et al. 2009; CORBIN et al., 2010b; HAYNES et al., 2020);
- SiB-CASA, em que uma versão do SiB foi acoplada à biogeoquímica do modelo Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA), que contém um esquema para alocação, transformação e decomposição de carbono, baseado nesse modelo (POTTER et al., 1993; RANDERSON et al., 1996). Essa versão é adequada para uma variedade de aplicações de pesquisa, para estudar processos que afetam o armazenamento de carbono e fluxos, pois combina processos biofísicos em escalas de tempo curtas do SiB com os processos biogeoquímicos em escalas de tempo mais longas;
- SiB-RAMS, que está agregado a um modelo de mesoescala, o *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) que implementou “*patches*” para representar várias classes de uso da terra dentro de uma única célula de grade (SiB-RAMS), a fim de capturar a heterogeneidade da cobertura da terra (WANG et al., 2007; CORBIN et al., 2008).

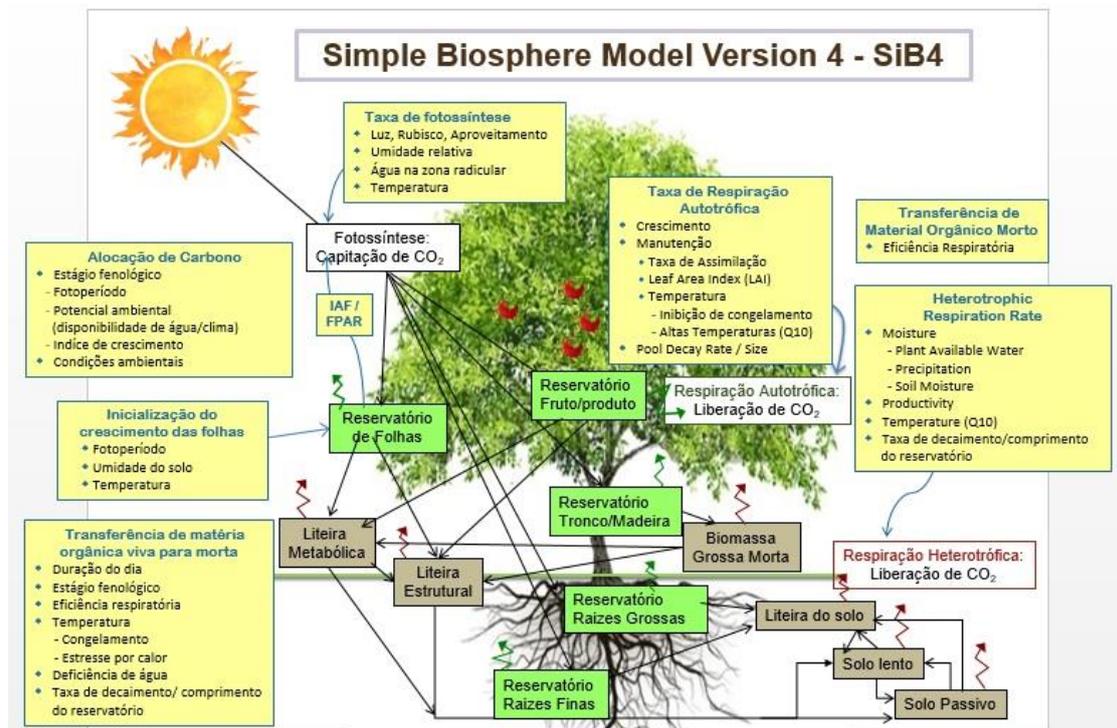
Dessa forma, o SiB4 compila as diferentes versões, incorpora os mais recentes desenvolvimentos na modelagem da superfície da terra e inova um novo método para prever a fenologia e o ciclo do carbono terrestre, além disso, usa um único conjunto de equações para representar os processos do ecossistema em vez de especificar propriedades específicas da vegetação (HAYNES et al., 2020). De acordo com Haynes et al., 2020, o SiB4 combina de forma consistente fluxos de carbono e reservatórios de carbono em uma estrutura preditiva e seus novos recursos podem ser resumidos da seguinte forma:

- Usa tipos funcionais de planta (PFTs);
- Incorpora reservatórios de carbono;
- Usa patches para representar a heterogeneidade;
- Introduz a fenologia prognóstica: estágios sazonais dinâmicos e estágios sazonais definidos;
- Inclui perturbação: fogo e pastoreio;
- Adiciona alocação de reserva de carbono variável;
- Inclui novos processos de respiração autotrófica;
- Adicionar mecanismos de liteira;
- Fecha o ciclo do carbono terrestre.

Com essas atualizações, o SiB4 usa uma única estrutura matemática para prever trocas de carbono, água, energia, radiação solar e terrestre e, quantidade de movimento entre a superfície e a atmosfera (HAYNES et al., 2020). Uma visão geral dessa versão é mostrada na Figura 3. Nas seções seguintes será mostrado o novo método para prever a fenologia e o ciclo do carbono terrestre.

Figura 3. Diagrama estrutural SiB4. Caixas brancas mostram as trocas terra-atmosfera de carbono via fotossíntese e respiração. As caixas verdes mostram os reservatórios de carbono vivo, as caixas castanhas mostram os reservatórios de carbono morto e as linhas pretas mostram o fluxo de carbono.

As linhas verdes mostram a liberação de carbono na atmosfera via respiração autotrófica, e as linhas bordô mostram a liberação de carbono da respiração heterotrófica. As caixas amarelas mostram as influências predominantes nos fluxos e reservatórios de carbono.



Fonte: Adaptado de Haynes et al. (2019a, p. 11).

FENOLOGIA PROGNÓSTICA

O SiB4 modela a fenologia da planta aproveitando o conceito de estágio de crescimento sem depender de valores empíricos ou dados de satélite sobre a vegetação (HAYNES et al., 2020). Para prever a fenologia da planta, essa ferramenta usa estágios dinâmicos que respondem ao estado da folha e às condições ambientais. A ideia geral é que a vegetação progride através de estágios fenológicos durante uma estação de crescimento; no entanto, o estágio da fenologia pode mudar diariamente (HAYNES et al. 2019a). Esse comportamento dinâmico significa que as plantas podem progredir pelos estágios em taxas diferentes, retornando à fase de crescimento a qualquer momento ou nunca existindo em estágios específicos. Por exemplo, ambientes desérticos com estações chuvosas curtas progridem rapidamente através dos estágios, enquanto florestas perenes nunca ficam dormentes (HAYNES et al. 2019a). Nesta abordagem, descrita em detalhes por Haynes et al. (2019a), o tempo e a duração das fases de crescimento e desenvolvimento da planta não são prescritos, mas diagnosticados usando uma combinação de potenciais que respondem à taxa de assimilação, clima, duração do dia, tamanho dos reservatórios de folhas e estresse da planta devido ao clima e condições ambientais associados. Essa estratégia dinâmica permite que o SiB4 simule a variabilidade diária, sazonal e interanual usando uma abordagem mecanicista. O estágio fenológico pode mudar diariamente e está associado a velocidades máximas especificadas de rubisco (V_{max}), alocações de reservatório de carbono e transferências de carbono de reservatórios vivos para mortos.

O carbono fotossintetizado, a cada intervalo de tempo inferior a uma hora, é somado diariamente e alocado para os reservatórios vivos dependendo do desenvolvimento sazonal, que é representado pelo estágio fenológico (também atualizado diariamente). Os reservatórios de carbono acima do solo são usados para determinar o Índice de área foliar (IAF), que então é usado para calcular a fotossíntese. Além de ser usado para alocação, o estágio fenológico também desempenha um papel na determinação da V_{max} que afeta a taxa de fotossíntese, bem como a renovação do

compartimento vivo para senescência. No final da estação, um IAF mínimo é mantido para que o crescimento ocorra uma vez que as condições ambientais sejam adequadas, o que é análogo a um carbono lábil ou reservatório de armazenamento usado por alguns modelos.

O CICLO DO CARBONO TERRESTRE

O SiB4 simula totalmente o ciclo do carbono terrestre usando a fenologia prognóstica para integrar processos ecossistêmicos, vinculando reservatórios de carbono, fluxos superfície-atmosfera e trocas biosfera-atmosfera (HAYNES et al., 2020). Essa abordagem estabelece esse ciclo totalmente preditivo, em vez de depender de dados de satélite para o estado da vegetação.

A cada intervalo de tempo (atualmente a cada 10 minutos), o SiB4 calcula o albedo, o balanço de radiação, o ciclo hidrológico, Temperatura e umidade do solo e temperatura do ar, bem como os fluxos de energia, umidade e carbono, e transferências de carbono nos reservatórios (HAYNES et al., 2020). A fotossíntese depende diretamente de fatores ambientais (umidade relativa, umidade do solo e temperatura do ar) e biomassa acima do solo, a absorção de carbono é determinada usando cinética enzimática (FARQUHAR et al., 1980) e fisiologia estomática (COLLATZ et al., 1991, 1992). A liberação de carbono ocorre por meio da respiração autotrófica e heterotrófica (REIS et al., 2021; WALLWORK et al., 2022). O crescimento e a manutenção da biomassa contribuem para a respiração autotrófica, e a respiração heterotrófica depende da umidade do solo, temperatura do ar e do solo e quantidade de material vegetal morto nos reservatórios de carbono superficiais e do solo (Silva et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017; REY et al., 2021; CHEN et al., 2023).

De acordo com Haynes et al., 2020, para calcular os reservatórios de carbono, o SiB4 combina a fase fenológica com ajustes ambientais de temperatura e umidade do solo e assim determina a fração de carbono alocada para cada reservatório de carbono vivo. Ou seja, o carbono que é transferido entre os reservatórios varia com a taxa de assimilação, duração do dia, umidade, temperatura e tamanho do reservatório. Uma vez que os reservatórios são atualizados, o estado da superfície terrestre e suas propriedades relativas são revisados; e os novos valores são usados para assimilação e respiração, completando o ciclo do carbono e fornecendo previsões coerente e consistente sobre o estado da vegetação, hidrologia do solo e trocas entre superfície-atmosfera (HAYNES et al., 2019a; HAYNES et al., 2020).

APLICAÇÕES

Como foi visto nas seções anteriores, foram desenvolvidas várias versões diferentes do SiB, nas quais foram utilizadas em diversos estudos abrangendo uma ampla variedade de escalas espaciais e temporais. Inicialmente o mencionado modelo foi desenvolvido para ser implementado em modelos de circulação geral para prever as condições de contorno da superfície terrestre (SATO et al., 1989; RANDALL et al., 1996;). Além de fornecer informações sobre propriedades da superfície e fluxos de energia, também foi atualizado para prever os fluxos de carbono, permitindo a geração de concentrações atmosféricas de CO₂ (DENNING et al., 1996a; 1996b). Essas concentrações podem ser analisadas para entender os processos que influenciam as distribuições atmosféricas desse gás (DENNING et al., 1999; CORBIN et al., 2008; PARAZOO et al., 2008; 2012).

Além disso, os fluxos globais de carbono do SiB têm sido utilizados como dados de entrada em modelos de circulação atmosférica, com o objetivo de localizar e quantificar fontes e sumidouros, com a intenção de melhorar as estimativas globais (LAW et al., 2008; LOKUPITIYA et al., 2008; PATRA et al., 2008). De acordo com Haynes et al., 2020, além de simular fluxos de carbono e energia, o SiB tem a capacidade de simular outros componentes relacionados ao carbono, o que contribui para a compreensão de processos biofísicos. Essa capacidade inclui a simulação de isótopos de carbono, utilizada em estudos globais sobre a troca no sistema (SUITS et al., 2005; BALLANTYNE et al., 2011; VAN DER VELDE et al., 2014).

O SiB também pode simular o sulfeto de carbonila (OCS), sendo empregado em estudos globais para investigar as respostas diferenciais de fotossíntese e respiração a forçantes ambientais (BERRY et al., 2013; GLATTHOR et al., 2015; KUAI et al., 2015; WANG et al., 2016). Por fim, a capacidade de simular a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) permitiu o uso do SiB na investigação da relação entre SIF, produção primária bruta (GPP) e na restrição do GPP (CHEESEMAN, 2018).

O modelo SiB não se limita a estudos globais, sendo utilizado em estudos regionais para investigar as interações entre a terra e a atmosfera em uma variedade de tipos de vegetação e climas (HAYNES et al., 2020). Em escalas continentais, essa ferramenta tem sido empregada para estudar a fotossíntese na América do Norte e na África (WILLIAMS et al., 2008; BAKER et al., 2010; WILLIAMS e HANAN, 2011). Em regiões tropicais, estudos têm utilizado para investigar as florestas tropicais em diversas condições hidrológicas em toda a Amazônia (BAKER et al., 2008; HARPER et al., 2014). Em regiões temperadas, o foco tem sido em pastagens e culturas na América do Norte central para estudar as trocas de energia e carbono entre a terra e a atmosfera (HANAN et al., 2005; LOKUPITIYA et al., 2016). Nas altas latitudes, seu uso foi aplicado para estudar o armazenamento e fluxos de carbono em regiões em que o solo está congelado de forma permanente, independentemente das variações sazonais de temperatura (SCHAEFER et al., 2011; SCHAEFER e JAFAROV, 2016; SULMAN et al., 2012).

Além de seu uso offline, o SiB também tem sido combinado com modelos de transporte atmosférico (HAYNES et al., 2020). Ele foi acoplado a um modelo de mesoescala para investigar as interações terra-atmosfera em escalas diurnas e sinóticas, incluindo circulações atmosféricas e as concentrações resultantes de CO₂ (NICHOLLS, 2004; LU et al., 2005; WANG et al., 2007). Um modelo atmosfera-ecossistema em escala regional, acoplado ao SiB, foi utilizado para avaliar os impactos espaciais e temporais nas concentrações atmosféricas de CO₂ provenientes das emissões de combustíveis fósseis (CORBIN et al., 2010a) e de colheitas (CORBIN et al., 2010b) nos Estados Unidos. Por fim, o SiB tem sido usado em conjunto com modelos regionais para estimar o balanço de carbono na América do Norte (LAUVAUX et al., 2012; SCHUH et al., 2013; OGLE et al., 2015), bem como para investigar fontes e sumidouros de carbono específicos na região (ZUPANSKI et al., 2007; BUTLER et al., 2010; SCHUH et al., 2010).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos fatos apresentados verificou-se que o Simple Biosphere Model (SiB) foi introduzido pela primeira vez como uma parametrização da superfície terrestre para modelos de circulação geral (GCMs) por Sellers et al. (1986). Desde então, passou por várias revisões e avanços: SiB2 (SELLERS et al., 1996a), SiB3 (BAKER et al., 2003, 2008) e atualmente SiB4 (HAYNES et al., 2020, 2019a, 2019b).

O SiB4 é uma ferramenta que pode ser utilizada em uma ampla variedade de estudos, pois combina inovações com os já estabelecidos processos de fotossíntese, hidrologia e radiação solar e terrestre. Ademais, é capaz de fechar o ciclo do carbono terrestre através da unificação dos fluxos e reservatórios de carbono por meio da fenologia e realizar previsões em diferentes escalas de tempo desde minutos a séculos. Para prever o comportamento do ecossistema em escalas de tempo de minutos, essa ferramenta utiliza mecanismos biogeoquímicos para capturar reações da vegetação ao clima em intervalos de tempo inferior a uma hora. Já para capturar o comportamento sazonal, usa-se mecanismos fenológicos e climatológicos para capturar respostas de longo prazo da vegetação ao clima. Portanto, o modelo mencionado tem a capacidade de investigar mudanças na biomassa viva, reservatórios de carbono e nos fluxos de energia, massa e momento entre superfície-atmosfera.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação Sociedade, Natureza e Desenvolvimento (PPGSND), UFOPA e a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas - Fapespa.

REFERÊNCIAS

- ASHWORTH, K.; CHUNG, S. H.; GRIFFIN, R. J.; et al. Forest Canopy Atmosphere Transfer (FORCAsT) 1.0: A 1-D model of biosphere-atmosphere chemical exchange. *Geoscientific Model Development*, v. 8, n. 11, p. 3765–3784, 2015.
- BAKER, I.; DENNING, S.; STÖCKLI, R. North American gross primary productivity: regional characterization and interannual variability. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 62, n. 5, p. 533–549, 2010. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1600-0889.2010.00492.x>>.
- _____. HARPER, A. B.; DA ROCHA, H. R.; et al. Surface ecophysiological behavior across vegetation and moisture gradients in tropical South America. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182–183, p. 177–188, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.015>>.
- _____. Biophysical Behavior in Tropical South America. Tese (Doutorado em Ecologia) – Fort Collins: Colorado State University. 2011. Disponível em: <<http://denning.atmos.colostate.edu/biocyte/Documents/Dissertations/2011.IanBaker.PhD.Dissertation.pdf>>.
- _____. PRIHODKO, L.; DENNING, A. S.; et al. Seasonal drought stress in the amazon: Reconciling models and observations. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. G00B01, p. 1–10, 2008.
- BALDOCCHI, D. D.; HARLEY, P. C. Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. II. Model testing and application. 1995.
- _____. WILSON, K. B.; GU, L. How the environment, canopy structure and canopy physiological functioning influence carbon, water and energy fluxes of a temperate broad-leaved deciduous forest--an assessment with the biophysical model CANOAK. *Tree Physiology*, v. 22, n. 15–16, p. 1065–1077, 2002. Disponível em: <<https://academic.oup.com/treephys/article-lookup/doi/10.1093/treephys/22.15-16.1065>>.
- BALLANTYNE, A. P.; MILLER, J. B.; BAKER, I. T.; TANS, P. P.; WHITE, J. W. C. Novel applications of carbon isotopes in atmospheric CO₂: what can atmospheric measurements teach us about processes in the biosphere? *Biogeosciences*, v. 8, n. 10, p. 3093–3106, 2011. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/8/3093/2011/>>.
- BERRY, J.; WOLF, A.; CAMPBELL, J. E.; et al. A coupled model of the global cycles of carbonyl sulfide and CO₂: A possible new window on the carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 118, n. 2, p. 842–852, 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrg.20068>>.
- BIOCYCLE. Denning Research Group, Carbon, Climate, Water and Ecosystem. Acesso em: 05 jun. 2023. Disponível em: <<http://biocycle.atmos.colostate.edu/research/models/sib3/>>
- BONAN, G. B.; PATTON, E. G.; HARMAN, I. N.; et al. Modeling canopy-induced turbulence in the Earth system: A unified parameterization of turbulent exchange within plant canopies and the roughness sublayer (CLM-ml v0). *Geoscientific Model Development*, v. 11, n. 4, p. 1467–1496, 2018.
- _____. WILLIAMS, M.; FISHER, R. A.; OLESON, K. W. Modeling stomatal conductance in the earth system: Linking leaf water-use efficiency and water transport along the soil-plant-atmosphere continuum. *Geoscientific Model Development*, v. 7, n. 5, p. 2193–2222, 2014.
- BUTLER, M. P.; DAVIS, K. J.; DENNING, A. S.; KAWA, S. R. Using continental observations in global atmospheric inversions of CO₂: North American carbon sources and sinks. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 62, n. 5, p. 550–572, 2010. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1600-0889.2010.00501.x>>.
- CHANG, K. Y.; PAW U, K. T.; CHEN, S. H. Canopy profile sensitivity on surface layer simulations evaluated by a multiple canopy layer higher order closure land surface model. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 252, p. 192–207, 2018.
- CHEESEMAN, M. J. Productivity and Phenology in a Process-Driven Carbon Cycle Model. Dissertação (Master of Science) - Fort Collins: Colorado State University. 2018. Disponível em: <<https://mountainscholar.org/handle/10217/193205>>.

CHEN, J.; MA, X.; LU, X.; et al. Long-term phosphorus addition alleviates CO₂ and N₂O emissions via altering soil microbial functions in secondary rather primary tropical forests. *Environmental Pollution*, v. 323, 2023.

CHEN, Y.; RYDER, J.; BASTRIKOV, V.; et al. Evaluating the performance of land surface model ORCHIDEE-CAN v1.0 on water and energy flux estimation with a single-and multi-layer energy budget scheme. *Geoscientific Model Development*, v. 9, n. 9, p. 2951–2972, 2016.

CIONCO, R. M. A Mathematical Model for Air Flow in a Vegetative Canopy. *Journal of Applied Meteorology*, v. 4, n. 4, p. 517–522, 1965.

COLLATZ, G. J.; BALL, J. T.; GRIVET, C.; BERRY, J. A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 54, n. 2–4, p. 107–136, 1991.

_____. RIBAS-CARBO, M.; BERRY, J. Coupled Photosynthesis-Stomatal Conductance Model for Leaves of C₄ Plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, v. 19, n. 5, p. 519–538, 1992.

CORBIN, K. D.; DENNING, A. S.; LOKUPITIYA, E. Y.; et al. Assessing the impact of crops on regional CO₂ fluxes and atmospheric concentrations. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 62, n. 5, p. 521–532, 2010b. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1600-0889.2010.00485.x>>.

_____. DENNING, A. S.; LU, L.; WANG, J.-W.; BAKER, I. T. Possible representation errors in inversions of satellite CO₂ retrievals. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. D2, p. D02301, 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2007JD008716>>.

_____. DENNING, S.; GURNEY, K. The space and time impacts on U.S. regional atmospheric CO₂ concentrations from a high resolution fossil fuel CO₂ emissions inventory. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 62, n. 5, p. 506–511, 2010a. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1600-0889.2010.00480.x>>.

DAI, Y.; ZENG, X.; DICKINSON, R. E.; et al. The Common Land Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 84, n. 8, p. 1013–1024, 2003. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-84-8-1013>>.

DEARDORFF, J. W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, v. 83, n. C4, p. 1889, 1978.

DENNING, A. S.; RANDALL, D. A.; COLLATZ, G. J.; SELLERS, P. J. Simulations of terrestrial carbon metabolism and atmospheric CO₂ in a general circulation model. Part 2: Simulated CO₂ concentrations. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 48, n. 4, p. 543–567, 1996a.

_____. RANDALL, D. A.; COLLATZ, G. J.; SELLERS, P. J. Simulations of terrestrial carbon metabolism and atmospheric CO₂ in a general circulation model. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 48, n. 4, p. 543–567, 1996b. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3402/tellusb.v48i4.15931>>.

_____. TAKAHASHI, T.; FRIEDLINGSTEIN, P. Can a strong atmospheric CO₂ rectifier effect be reconciled with a “reasonable” carbon budget? *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 51, n. 2, p. 249–253, 1999. Disponível em: <<http://www.tellusb.net/index.php/tellusb/article/view/16277>>.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. Colorado: National Center for Atmospheric Research Boulder, 1993. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5065/D67W6959>>.

_____. HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J.; WILSON, M. F. Biosphere-atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. Colorado: National Center for Atmospheric Research Boulder, p. 1–82, 1986.

GLATTHOR, N.; HÖPFNER, M.; BAKER, I. T.; et al. Tropical sources and sinks of carbonyl sulfide observed from space. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 22, p. 10,082–10,090, 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2015GL066293>>.

HANAN, N. P.; BERRY, J. A.; VERMA, S. B.; et al. Testing a model of CO₂, water and energy exchange in Great Plains tallgrass prairie and wheat ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.

131, n. 3-4, p. 162-179, 2005. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192305001012>>.

HARPER, A.; BAKER, I. T.; DENNING, A. S.; et al. Impact of Evapotranspiration on Dry Season Climate in the Amazon Forest. *Journal of Climate*, v. 27, n. 2, p. 574-591, 2014. Disponível em:
<<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-13-00074.1>>.

HAYNES, K.; BAKER, I.; DENNING, A. S. The Simple Biosphere Model, Version 4.2: SiB4 Technical description. Colorado State University, 2020. Disponível em:
<<https://mountainscholar.org/handle/10217/200691>>. Acesso em: 31/1/2023.

_____. BAKER, I. T.; DENNING, A. S.; et al. Representing Grasslands Using Dynamic Prognostic Phenology Based on Biological Growth Stages: 1. Implementation in the Simple Biosphere Model (SiB4). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 11, n. 12, p. 4423-4439, 2019a. <https://doi.org/10.1029/2018MS001540>.

_____. BAKER, I. T.; BAKER, I. T.; DENNING, A. S.; et al. Representing Grasslands Using Dynamic Prognostic Phenology Based on Biological Growth Stages: Part 2. Carbon Cycling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 11, n. 12, p. 4440-4465, 2019b. <https://doi.org/10.1029/2018MS001541>.

INOUE, E. On the Turbulent Structure of Airflow within. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. v. 41, n. 6, p. 317-326, 1963. Disponível em:
<https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj1923/41/6/41_6_317/_article>.

JACKSON, R. B.; CANADELL, J.; EHLERINGER, J. R.; et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, v. 108, n. 3, p. 389-411, 1996. Disponível em:
<<http://link.springer.com/10.1007/BF00333714>>.

KEENAN, T. F.; NIINEMETS, Ü. Global leaf trait estimates biased due to plasticity in the shade. *Nature Plants*, v. 3, n. 1, 2016. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nplants2016201>>.

KUAI, L.; WORDEN, J. R.; CAMPBELL, J. E.; et al. Estimate of carbonyl sulfide tropical oceanic surface fluxes using Aura Tropospheric Emission Spectrometer observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 120, n. 20, p. 12-23, 2015. Disponível em:
<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JD023493>>.

LAUVAUX, T.; SCHUH, A. E.; ULIASZ, M.; et al. Constraining the CO₂ budget of the corn belt: exploring uncertainties from the assumptions in a mesoscale inverse system. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 12, n. 1, p. 337-354, 2012. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/12/337/2012/>>.

LAW, R. M.; PETERS, W.; RÖDENBECK, C.; et al. TransCom model simulations of hourly atmospheric CO₂: Experimental overview and diurnal cycle results for 2002. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 22, n. 3, p. GB3009, 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2007GB003050>>.

LOKUPITIYA, E. Y.; DENNING, A. S.; SCHAEFER, K.; et al. Carbon and energy fluxes in cropland ecosystems: a model-data comparison. *Biogeochemistry*, v. 129, n. 1-2, p. 53-76, 2016. Disponível em:
<<http://link.springer.com/10.1007/s10533-016-0219-3>>.

_____. DENNING, S.; PAUSTIAN, K.; et al. Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to improve land-atmosphere carbon exchanges from croplands. *Biogeosciences*, v. 6, n. 6, p. 969-986, 2009. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/6/969/2009/>>.

LOKUPITIYA, R. S.; ZUPANSKI, D.; DENNING, A. S.; et al. Estimation of global CO₂ fluxes at regional scale using the maximum likelihood ensemble filter. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. D20, p. D20110, 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2007JD009679>>.

LU, L.; DENNING, A. S.; DA SILVA-DIAS, M. A.; et al. Mesoscale circulations and atmospheric CO₂ variations in the Tapajós Region, Pará, Brazil. *Journal of Geophysical Research*, v. 110, n. D21, p. D21102, 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2004JD005757>>.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, v. 19, p. 205-234, 1965. Disponível em: <<https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8v5v7>>.

NICHOLLS, M. E. A multiple-scale simulation of variations in atmospheric carbon dioxide using a coupled biosphere-atmospheric model. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, n. D18, p. D18117, 2004. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2003JD004482>>.

NIINEMETS, Ü.; KEENAN, T. F.; HALLIK, L. A worldwide analysis of within-canopy variations in leaf structural, chemical and physiological traits across plant functional types. *New Phytologist*, v. 205, n. 3, p. 973–993, 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.13096>>.

OGLE, S. M.; DAVIS, K.; LAUVAUX, T.; et al. An approach for verifying biogenic greenhouse gas emissions inventories with atmospheric CO₂ concentration data. *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 3, p. 034012, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034012>>.

OLIVEIRA, W. J.; SOUZA, E. R.; CUNHA, J. C.; SILVA, Ê. F. DE F.; VELOSO, V. DE L. Leaf gas exchange in cowpea and CO₂ efflux in soil irrigated with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 1, p. 32–37, 2017.

PARAZOO, N. C.; DENNING, A. S.; KAWA, S. R.; et al. Mechanisms for synoptic variations of atmospheric CO₂ in North America, South America and Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 8, n. 23, p. 7239–7254, 2008. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/8/7239/2008/>>.

_____. DENNING, A. S.; KAWA, S. R.; PAWSON, S.; LOKUPITIYA, R. CO₂ flux estimation errors associated with moist atmospheric processes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 12, n. 14, p. 6405–6416, 2012. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/12/6405/2012/>>.

PATRA, P. K.; LAW, R. M.; PETERS, W.; et al. TransCom model simulations of hourly atmospheric CO₂: Analysis of synoptic-scale variations for the period 2002–2003. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 22, n. 4, 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2007GB003081>>.

PINHEIRO, M. E. O. Modelagem da interação superfície – atmosfera: calibração dos modelos SiB2 e SiB3 em uma área de pastagem no sul do Brasil. Dissertação (Mestrado em Física) – Santa Maria: UFSM. 2018.

PITMAN, A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, v. 23, n. 5, p. 479–510, 2003.

POTTER, C. S.; RANDERSON, J. T.; FIELD, C. B.; et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 7, n. 4, p. 811–841, 1993. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/93GB02725>>.

RANDALL, D. A.; DAZLICH, D. A.; ZHANG, C.; et al. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for GCMs. Part III: The Greening of the Colorado State University General Circulation Model. *Journal of Climate*, v. 9, n. 4, p. 738–763, 1996. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0442\(1996\)009%3C0738:ARLSPF%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0442(1996)009%3C0738:ARLSPF%3E2.0.CO;2)>.

RANDERSON, J. T.; THOMPSON, M. V.; MALMSTROM, C. M.; FIELD, C. B.; FUNG, I. Y. Substrate limitations for heterotrophs: Implications for models that estimate the seasonal cycle of atmospheric CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, n. 4, p. 585–602, 1996. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/96GB01981>>.

RAUPACH, M. R.; FINNIGAN, J. Single-Layer Models of Evaporation From Plant Canopies Are Incorrect but Useful, Whereas Multilayer Models Are Correct but Useless: Discuss. *Functional Plant Biology*, v. 15, n. 6, p. 705, 1988.

_____. Canopy Transport Processes. *Flow and Transport in the Natural Environment: Advances and Applications*. p. 95–127, 1988. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-73845-6_7>.

_____. ANTONIA, R. A.; RAJAGOPALAN, S. Rough-wall turbulent boundary layers. *Applied Mechanics Reviews*, v. 44, n. 1, p. 1–25, 1991.

REIS, A. O.; COSTA, G. B.; LIMA, M. B.; et al. Sazonalidade e Correlação entre Emissões de Gases Estufa e Variáveis Ambientais em Áreas Florestais Distintas na Amazônia. *Biodiversidade Brasileira - BioBrasil*, v. 11, n. 4, p. 72–83, 2021. Disponível em: <<https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/BioBR/article/view/1779>>.

REY, A.; CARRASCAL, L. M.; BÁEZ, C. G. G.; et al. Impact of climate and land degradation on soil carbon fluxes in dry semiarid grasslands in SE Spain. *Plant and Soil*, v. 461, n. 1–2, p. 323–339, 2021.

RYDER, J.; POLCHER, J.; PEYLIN, P.; et al. A multi-layer land surface energy budget model for implicit coupling with global atmospheric simulations. *Geoscientific Model Development*, v. 9, n. 1, p. 223–245, 2016.

SATO, N.; SELLERS, P. J.; RANDALL, D. A.; et al. Effects of Implementing the Simple Biosphere Model in a General Circulation Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 46, n. 18, p. 2757–2782, 1989. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0469\(1989\)046%3C2757:EOITSB%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0469(1989)046%3C2757:EOITSB%3E2.0.CO;2)>.

SAYLOR, R. D. The Atmospheric Chemistry and Canopy Exchange Simulation System (ACCESS): model description and application to a temperate deciduous forest canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 2, p. 693–715, 2013. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/13/693/2013/>>.

SCHAEFER, K.; DENNING, A. S.; SUITS, N.; et al. Effect of climate on interannual variability of terrestrial CO₂ fluxes. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 16, n. 4, p. 1–12, 2002.

_____. JAFAROV, E. A parameterization of respiration in frozen soils based on substrate availability. *Biogeosciences*, v. 13, n. 7, p. 1991–2001, 2016. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/13/1991/2016/>>.

_____. ZHANG, T.; BRUHWILER, L.; BARRETT, A. P. Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 63, n. 2, p. 165–180, 2011. Disponível em: <<http://www.tellusb.net/index.php/tellusb/article/view/16197>>.

SCHUH, A. E.; DENNING, A. S.; CORBIN, K. D.; et al. A regional high-resolution carbon flux inversion of North America for 2004. *Biogeosciences*, v. 7, n. 5, p. 1625–1644, 2010. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/7/1625/2010/>>.

_____. LAUVAUX, T.; WEST, T. O.; et al. Evaluating atmospheric CO₂ inversions at multiple scales over a highly inventoried agricultural landscape. *Global Change Biology*, v. 19, n. 5, p. 1424–1439, 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.12141>>.

SELLERS, P. J.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; FIELD, C. B.; HALL, F. G. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment*, v. 42, n. 3, p. 187–216, 1992.

_____. LOS, S. O.; TUCKER, C. J.; et al. A revised land surface parameterization (SiB₂) for Atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, v. 9, n. 4, p. 706–737, 1996.

_____. MINTZ, Y.; SUD, Y. C.; DALCHER, A. A Simple Biosphere Model (SIB) for Use within General Circulation Models. *Journal of the Atmospheric Science*, v. 43, n. 6, p. 505–531, 1986.

_____. RANDALL, D. A.; COLLATZ, G. J.; et al. A revised land surface parameterization (SiB₂) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, v. 9, n. 4, p. 676–705, 1996.

SILVA, C. M.; VASCONCELOS, S. S.; MOURÃO JÚNIOR, M.; et al. Temporal variation of soil CO₂ efflux in oil palm-based agroforestry systems in eastern amazon. *Acta Amazonica*, v. 46, n. 1, p. 1–12, 2016.

STÖCKLI, R.; RUTISHAUSER, T.; BAKER, I.; LINIGER, M. A.; DENNING, A. S. A global reanalysis of vegetation phenology. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 116, n. 3, p. 1–19, 2011.

_____. RUTISHAUSER, T.; DRAGONI, D.; et al. Remote sensing data assimilation for a prognostic phenology model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 113, n. 4, p. 1–19, 2008.

SUITS, N. S.; DENNING, A. S.; BERRY, J. A.; et al. Simulation of carbon isotope discrimination of the terrestrial biosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 19, n. 1, p. 1–15, 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2003GB002141>>.

SULMAN, B. N.; DESAI, A. R.; SCHROEDER, N. M.; et al. Impact of hydrological variations on modeling of peatland CO₂ fluxes: Results from the North American Carbon Program site synthesis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 117, n. G1, p. 1–21, 2012. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2011JG001862>>.

VAN DER VELDE, I. R.; MILLER, J. B.; SCHAEFER, K.; et al. Terrestrial cycling of ¹³C by photosynthesis, respiration, and biomass burning in SiBCASA. *Biogeosciences*, v. 11, n. 23, p. 6553–6571, 2014. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/11/6553/2014/>>.

VIDALE, P. L.; STÖCKLI, R. Prognostic canopy air space solutions for land surface exchanges. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 80, n. 2–4, p. 245–257, 2005.

WALLWORK, A.; BANIN, L. F.; DENT, D. H.; SKIBA, U.; SAYER, E. Soil carbon storage is related to tree functional composition in naturally regenerating tropical forests. *Functional Ecology*, v. 36, n. 12, p. 3175–3187, 2022.

WANG, J.-W.; DENNING, A. S.; LU, L.; et al. Observations and simulations of synoptic, regional, and local variations in atmospheric CO₂. *Journal of Geophysical Research*, v. 112, n. D4, p. D04108, 2007. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2006JD007410>>.

WANG, Y.; DEUTSCHER, N. M.; PALM, M.; et al. Towards understanding the variability in biospheric CO₂ fluxes: using FTIR spectrometry and a chemical transport model to investigate the sources and sinks of carbonyl sulfide and its link to CO₂. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 16, n. 4, p. 2123–2138, 2016. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/16/2123/2016/>>.

WILLIAMS, C. A.; HANAN, N. P. ENSO and IOD teleconnections for African ecosystems: evidence of destructive interference between climate oscillations. *Biogeosciences*, v. 8, n. 1, p. 27–40, 2011. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/8/27/2011/>>.

_____. HANAN, N. P.; BAKER, I.; et al. Interannual variability of photosynthesis across Africa and its attribution. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 113, n. G4, p. 1–15, 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2008JG000718>>.

WILSON, N. R.; SHAW, R. H. A Higher Order Closure Model for Canopy Flow. *Journal of Applied Meteorology*, v. 16, n. 11, p. 1197–1205, 1977. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0450\(1977\)016<1197:AHOCMF>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0450(1977)016<1197:AHOCMF>2.0.CO;2)>.

WOLFE, G. M.; THORNTON, J. A. The Chemistry of Atmosphere-Forest Exchange (CAFE) Model - Part 1: Model description and characterization. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 11, n. 1, p. 77–101, 2011.

XU, L.; PYLES, R. D.; PAW U, K. T.; et al. Impact of canopy representations on regional modeling of evapotranspiration using the WRF-ACASA coupled model. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 247, p. 79–92, 2017. Elsevier B.V.

ZUPANSKI, D.; DENNING, A. S.; ULIASZ, M.; et al. Carbon flux bias estimation employing Maximum Likelihood Ensemble Filter (MLEF). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 112, n. 17, p. 1–18, 2007.