Modelando o papel dos ciclos do Nitrogênio e Fósforo na estabilidade da floresta amazônica frente às mudanças ambientais globais

**Beneficiário: João Paulo Darela Filho 1**

**Orientador: Dr. David Montenegro Lapola 2**

**Co-orientadora: Dra. Katrin Fleischer 1**

1 – Laboratório de Ciência do Sistema Terrestre – LabTerra. Instituto de Biociências. UNESP Campus Rio Claro

2 – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. CEPAGRI-UNICAMP.

Rio Claro

Novembro de 2016

Proposta de Doutorado Direto

Resumo

A hipótese ‘forest dieback’ na Amazônia foi postulada no final do anos 90, sugerindo um declínio acentuado da biomassa da floresta amazônica em resposta as mudanças climáticas projetadas para o século XXI. Mais recentemente, a hipótese foi considerada menos provável, uma vez que o efeito de fertilização por CO2 poderia manter a produtividade e a biomassa florestal nas próximas décadas. A resposta da floresta amazônica ao CO2 elevado é, contudo muito incerta, principalmente em virtude de duas características importantes ainda não consideradas, em concomitância, em projeções realizadas por modelos de vegetação: o papel potencialmente limitante dos nutrientes sobre o efeito de fertilização por CO2 (Como observado em experimentos prévios) e a persistência, nas comunidades vegetais, de atributos funcionais (e das espécies que os detém) que confiram resistência às perturbações originadas pelas mudanças climáticas e pela limitação por nutrientes. Da primeira, decorre uma menor produtividade florestal e menor assimilação de carbono (C), o que poderia acelerar mudanças climáticas por meio de retroalimentações e amo mesmo tempo levar a um “forest dieback”. No entanto, da segunda decorrem prováveis mudanças na composição da comunidade vegetal, sem necessariamente levar a uma mudança acentuada na biomassa florestal, conforme predito pela hipótese do “forest dieback”. Essas incertezas mantêm a questão de como a floresta amazônica responderá à futura mudança global em aberto. Este projeto de Doutorado Direto investigará a hipótese do “forest dieback” empregando uma abordagem de modelagem baseada em atributos funcionais de plantas, considerando os ciclos do Nitrogênio e Fósforo, totalmente acoplados ao ciclo de Carbono, em uma combinação única e inovadora de características na modelagem de ecossistemas globais. Este projeto incluirá desenvolvimentos necessários no Modelo CAETÊ (Carbon and Ecosystem functional Trait Evaluation model). Esses desenvolvimentos permitirão investigar os efeitos da limitação de N e P sobre a fertilização por CO2 e a resposta da diversidade funcional das plantas ao CO2 elevado e às mudanças climáticas, que acabarão por possibilitar ou nãoo “forest dieback” na Amazônia.

Abstract

1. Introdução

As emissões antropogênicas de CO2 alteram os processos que regulam os balanços de Carbono (C) entre a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre (Archer et al. 2009; Bindoff et al. 2013; Le Quéré et al. 2015). Estas emissões impactam diretamente os ecossistemas terrestres, através do aumento da disponibilidade de CO2, um dos principais substratos para a fotossíntese, e, indiretamente, por meio das mudanças climáticas e meteorológicas previstas (Prentice et al. 2001; Raddatz et al. 2007; Ciais et al. 2013). Estimativas indicam que, globalmente, os ecossistemas florestais armazenam cerca de 861 ± 66 PgC – Petagramas de Carbono (Pan et al. 2011). Cerca de 55% do carbono (ou 471 ± 93 PgC) destes ecossistemas encontra-se em florestas tropicais, sendo que a floresta amazônica constitui a maior extensão contínua de floresta tropical e armazena entre 150 e 200 PgC (Feldpausch et al. 2012; Liu et al. 2015). Ela é responsável por 14% da produtividade primária liquida (*Net Primary Productivity-* NPP) dos ecossistemas terrestres, apresentando uma taxa de assimilação de 0.65 PgC ano-1, valor que representa cerca de 25% do ‘*missing carbon sink*’[[1]](#footnote-2) anual (Friedlingstein 1995; Phillips et al. 2009; Pan et al. 2011; Brienen et al. 2015). Assim, a Amazônia atua como um importante agente mitigatório para as emissões antropogênicas de CO2 (Le Quéré et al. 2009). Porém, a estabilidade deste sumidouro de C durante o século XXI ainda é incerta, frente aos efeitos diretos e indiretos do acúmulo de CO2 na atmosfera (Huntingford et al. 2013; Williams 2013; Hofhansl et al. 2016).

Há cerca de duas décadas a hipótese do ‘*forest dieback*’ na Amazônia foi postulada, a partir de estudos com modelos de vegetação, prevendo a diminuição drástica na biomassa e descaracterização desta grande floresta tropical como bioma florestal, em consequência das alterações regionais nos padrões de precipitação e temperatura projetados por modelos climáticos para o século XXI (White et al. 1999; Cox et al. 2000; Oyama 2003; Cox et al. 2004; Cook and Vizy 2008). Mais recentemente, esta hipótese foi desafiada por estudos de modelagem que sugeriram que o aumento da concentração de CO2 causaria, na realidade, o aumento da produtividade e da biomassa deste ecossistema florestal, evitando ou postergando o ‘forest dieback’ na Amazônia (Lapola et al. 2009; Cox et al. 2013; Huntingford et al. 2013).

O **efeito de Fertilização por CO2** é observado como o aumento da produtividade primária líquida – especialmente das plantas *C3* , em resposta ao aumento da concentração de CO2 na atmosfera. Este aumento de produtividade é resultante da resposta fisiológica das plantas frente a maior disponibilidade de substrato (CO2) para a carboxilação da Ribulose-1,5 bifosfato carboxilase oxidase (RuBisCO) (Kimball 1983; Friedlingstein 1995) e/ou da melhoria da Eficiência do Uso da Água (EUA). No primeiro caso, o aumento da eficiência fotossintética é resultante de uma menor razão entre oxidação/carboxilação da RuBisCO; no segundo caso, a maior eficiência do processo fotossintético é resultante da diminuição da condutância estomática, o que aumenta a eficiência da planta quanto ao uso de recursos hídricos na produção de biomassa (Kimball 1983; Friedlingstein 1995; Farquhar 1997; Prentice et al. 2001; Norby et al. 2005; Steffen and Canadell 2005; Lenton et al. 2009). A fertilização por CO2 foi observada inicialmente em experimentos de laboratório, em nível de indivíduos (Norby et al. 1986; Eamus and Jarvis 1989; Norby et al. 1992). Mais recentemente, a fertilização por CO2 foi investigada em nível de comunidades e ecossistemas, por meio de experimentos de manipulação da concentração de CO2 atmosférico [*Open-top Chamber* (OTC) e *Free Air CO2 Enrichment experiment* (FACE)], implementados na maior parte dos casos em regiões extratropicais (Norby and Zak 2011; Lapola and Norby 2014; Medlyn et al. 2016; Norby et al. 2016). Alguns estudos envolvendo modelagem e sensoriamento remoto oferecem bons indicativos do efeito da fertilização por CO2, na forma de um aumento de cobertura vegetal (*greening*) (Donohue et al. 2013; Zhu et al. 2016).

A possibilidade do *forest dieback* na amazônia e em outros biomas florestais tropicais permanece indefinida. Esta incerteza pode ser em parte atribuída a não consideração, de maneira conjunta (*i.e.* em um mesmo modelo de vegetação), de dois importantes aspectos ligados à ciclagem do carbono nos ecossistemas: (1) a limitação do efeito de fertilização por CO2 por nutrientes (*i.e.* N e P) e (2) as respostas adaptativas dos ecossistemas frente ao aumento de CO2 na atmosfera (Hofhansl et al. 2016). Estes aspectos são discutidos nos próximos dois parágrafos, respectivamente.

Em conjunto com estudos de modelagem dos ecossistemas terrestres, os experimentos de manipulação da concentração de CO2 têm demonstrado, entre outros resultados importantes, que a produtividade primária líquida aumenta em resposta ao aumento da [CO2] na atmosfera (Norby et al. 2005), porém, mostram também que esta resposta é atenuada após períodos iniciais de maior produtividade primária, em virtude da limitação progressiva por Nitrogênio (PNL) (Reich et al. 2006). Muitos modelos (*Veja* Zaehle et al. 2014*⁠*)que consideram explicitamente a interação C/N projetam uma forte limitação por Nitrogênio (N) sobre a suposto aumento de produtividade futura dos ecossistemas terrestres (*i.e.* fertilização por CO2) - frente ao aumento da concentração atmosférica de CO2 em comparação aos modelos que consideram apenas o ciclo de C. O N é correlacionado positivamente com a capacidade fotossintética em nível foliar (Kattge et al. 2009) em virtude da sua representatividade nas enzimas relacionadas à fotossíntese (Chapin et al. 2002). Assim, o N está intimamente ligado a ciclagem de C nos ecossistemas. O Fósforo, (P) é outro importante nutriente que limita a produtividade dos ecossistemas terrestres (Aerts and Chapin 2000)⁠ e possivelmente limitará os efeitos da fertilização por CO2 sobre a produtividade da vegetação (Norby et al. 2010; Wang et al. 2010; Goll et al. 2012; Cernusak et al. 2013; Wieder et al. 2015)⁠ (INSERIR QUESADA 2012). O P é fundamental no metabolismo energético (*e.g.* presente em moléculas como a ATP, NADP, etc.) e também na composição das membranas celulares. Poucos modelos de vegetação incorporam as interações Carbono/N/P (Wang et al. 2010; Goll et al. 2012; Yang et al. 2014; Wieder et al. 2015), Deste modo, pouco se sabe ainda sobre a influência dos ciclos do P e do N sobre o armazenamento e estabilidade do carbono na Amazônia e em outros ecossistemas tropicais (Reich et al. 2006; Cernusak et al. 2013).

O segundo importante aspecto ainda não explorado em modelos de vegetação e que pode ser fundamental para a diminuição das incertezas relacionadas ao *forest dieback* na Amazônia, é a relação entre os efeitos associados da fertilização de CO2 e dalimitação por nutrientes sobre a **diversidade funcional** da floresta amazônica (Hofhansl et al. 2016; Pavlick et al. 2013). A diversidade funcional exprime a variabilidade (intra ou interespecífica) de atributos funcionais de seres vivos (Chapin et al. 2000). Os atributos funcionais são, por sua vez, qualquer característica genética, comportamental, fenológica, fisiológica ou morfológica (*e.g.* massa da semente), passível de medição, relacionada ao desempenho das funções biológicas dos indivíduos dentro da comunidade, incluindo suas relações com outros organismos (Stearns 1989, Chapin et al. 2000; Dı́az & Cabido 2001). Cada atributo funcional está relacionado a um ou mais tradeoffs, ou seja, a melhoria resultante da modificação de um atributo tem efeitos prejudiciais sobre outro, ou outros atributos (Stearns 1989). A diversidade funcional está diretamente ligada ao funcionamento ecossistêmico, uma vez que ela representa a diversidade de relações e feedbacks que controlam o fluxo de energia e matéria pelos ecossistemas (Dı́az and Cabido 2001).

Atualmente, a lógica utilizada na maioria dos modelos de vegetação para sintetizar a imensa diversidade funcional das plantas é a classificação destas em PFTs - tipos funcionais de plantas (*Plant Funcional Types*), que correspondem a grupos de plantas teoricamente similares, de acordo com a distribuição geográfica, características fisiológicas, morfológicas e fenológicas (Prentice et al. 1992; Kattge et al. 2011; Pavlick et al. 2013). Dentro de cada PFT os valores de atributos funcionais intimamente ligados ao funcionamento ecossistêmico (*e.g.* taxa máxima de carboxilação da RuBisCO) são mantidos constantes espacialmente e temporalmente (Pavlick et al. 2013)⁠. Tal abordagem afeta negativamente o poder preditivo dos modelos de duas diferentes maneiras. Primeiro, pelo viés ecológico. Evidências experimentais (Kattge et al. 2011) e de modelagem (Sakschewski et al. 2016)⁠ demonstram que a abordagem baseada em PFTs subestima a diversidade funcional e, em última instância, a resiliência dos ecossistemas terrestres. Dada a diversidade de estratégias de vida representadas pela diversidade de atributos funcionais, é provável que, frente as mudanças ambientais, as comunidades vegetais hiperdiversas, como a amazônica, sofram mudanças em sua composição (Scheiter et al. 2013)⁠ sem que necessariamente ocorra alteração de bioma (*forest dieback*) (Tilman et al. 2006; Pavlick et al. 2013; Hofhansl et al. 2016). Segundo, dada a importância da diversidade funcional para os processos ecossistêmicos ligados a ciclagem do carbono, como a NPP, a simplificação imposta pela utilização dos PFTs para caracterizar a vegetação ignora a variabilidade espacial e temporal de atributos funcionais chave para a ciclagem do C, empobrecendo as simulações do fluxo de C nos ecossistemas (Groenendijk et al. 2011; Pavlick et al. 2013). Recentemente, alguns modelos incorporaram a variabilidade de atributos funcionais em sua formulação (*e.g.* JeDi-DGVM, Pavlick et al. 2013; aDGVM2, Scheiter et al. 2013), abrindo caminho para uma nova geração de modelos de vegetação. A incorporação da diversidade funcional, através de atributos funcionais variantes na vegetação, representa uma mudança de paradigma, uma vez que permite a simulação mecanística de processos ecológicos de maneira mais realista, em comparação com abordagens recorrentes em estudos de modelagem de vegetação, leia-se PFTs (Dı́az and Cabido 2001; Kattge et al. 2011; Scheiter et al. 2013; Fyllas et al 2014).

Neste projeto de pesquisa pretendemos avançar de maneira pioneira na modelagem de vegetação, incorporando os ciclos de N e P a um modelo dinâmico de vegetação que já usa uma lógica baseada em atributos funcionais de plantas. Com isso pretendemos construir um modelo capaz de fornecer informações que contribuam para o avanço do entendimento da ciclagem do carbono nos ecossistemas terrestres e diminuição das incertezas quanto a hipótese do 'forest dieback' na Amazônia.

Adicionalmente, o desenvolvimento deste projeto terá um importante papel para o sucesso científico do experimento AmazonFACE (Lapola and Norby 2014). Este experimento, juntamente com outros [*e.g.* EucFACE - Medlyn et al. (2016)], faz parte da segunda geração de experimentos do tipo FACE e propõe em seu desenho experimental a integração dos processos de modelagem e experimentação, possibilitando a geração de hipóteses, por meio de modelos, que possam ser comparadas aos dados coletados em tempo real e indicar possíveis variáveis chave que devem ser coletadas em experimentos para testar as diferentes premissas assumidas pelos diversos modelos de vegetação utilizados no processo de integração modelagem/experimento (Lapola and Norby 2014; Medlyn et al. 2016;(Norby et al. 2016).

1. Objetivos e Motivações

Este projeto de pesquisa tem o objetivo geral de *avaliar a influência dos ciclos de Nitrogênio e Fósforo sobre a dinâmica biogeoquímica e a diversidade funcional amazônicas, frente às mudanças ambientais globais,* por meio da implementação dos ciclos de Nitrogênio e Fósforo no DGVM-CAETÊ (CArbon and Ecosystem Trait Evaluation – Dynamic Global Vegetation Model), um modelo baseado em atributos funcionais de plantas (*Trait-based vegetation Model*) e nos trade-offs relacionados a estes atributos.

2.1- Objetivos específicos*:*

Neste projeto buscamos responder às seguintes questões:

1. O efeito de fertilização por CO2, na Floresta amazônica será limitado pela disponibilidade de Nitrogênio e/ou Fósforo no decorrer do séc. XXI?
   * **Hipótese 1** Sem a limitação por nutrientes (N e P) no DGVM CAETÊ, esperamos uma tendência positiva na estocagem e assimilação de C da floresta amazônica, decorrente do efeito de fertilização por CO2 ao longo do século XXI.
   * **Hipótese 2** Com somente a inclusão do ciclo Nitrogênio no DGVM CAETÊ, é esperado que haja pouca ou nenhuma limitação do efeito de fertilização por CO2 na Amazônia, devido à relativa abundância de Nitrogênio em ecossistemas tropicais (Hedin et al. 2009).
   * **Hipótese 3** Com a integração dos submodelos de N e P ao DGVM CAETÊ, espera-se uma forte limitação da produtividade futura, devido à limitação por nutrientes, sobretudo do P.
2. Quais serão os impactos das mudanças ambientais sobre a diversidade funcional da Amazônia durante o século XXI? Como estes impactos podem influenciar o funcionamento ecossistêmico?
   * **Hipótese 1** Esperamos que as perturbações causadas pelas mudanças ambientais globais favoreçam, nas comunidades, a persistência de atributos funcionais relacionados à eficiência no uso de recursos, resultando em diferentes padrões de diversidade funcional no ecossistema amazônico.
   * **Hipótese 2** Uma vez que a diversidade funcional é relacionada aos processos ecossistêmicos, decorre da hipótese ii-1 que mudanças na distribuição de atributos funcionais poderão alterar a dinâmica do C (estocagem e fluxos) na Amazônia, podendo a Amazônia, se tornar ou não uma fonte de CO2 para a atmosfera.
3. Métodos

3.1 O DGVM CAETÊ

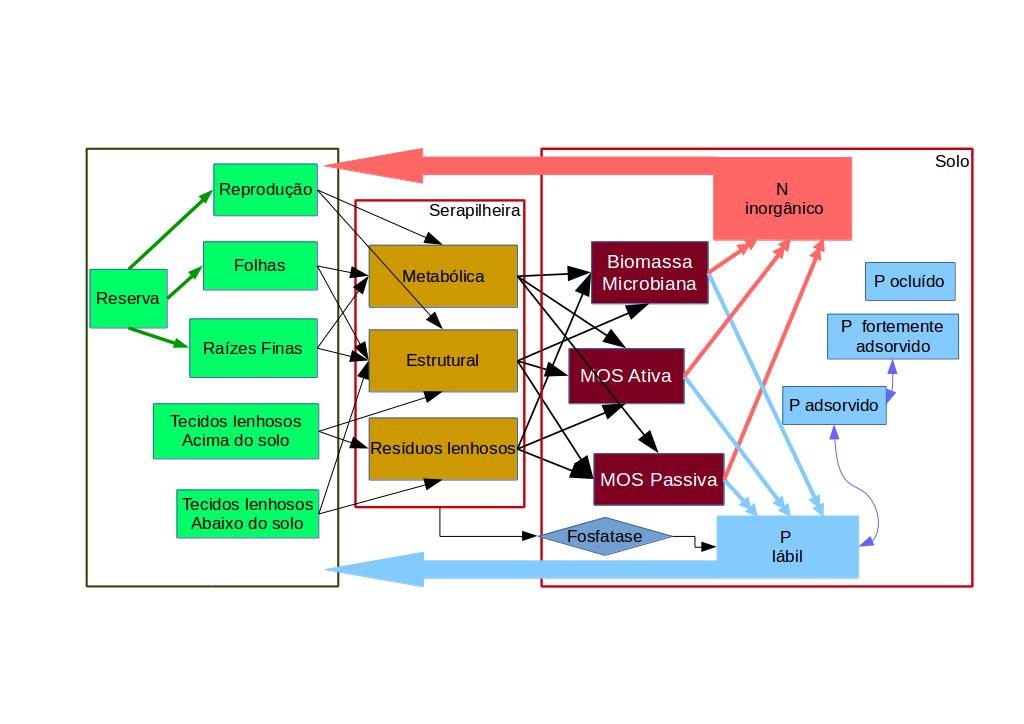
O DGVM CAETÊ está em fase de desenvolvimento no Laboratório de Ciência do Sistema Terrestre e usa como base para desenvolvimento o modelo CPTEC - *Potential Vegetation Model* *2* (Lapola et al. 2009). O CPTEC-PVM-2 é um modelo estacionário (ou de equilíbrio) de vegetação potencial que estima a distribuição de biomas a partir da produtividade primária líquida (NPP) e de variáveis ambientais (temperatura e umidade). Podemos resumir as modificações aplicadas ao CPTEC-PVM-2, e que darão origem ao DGVM CAETÊ, em seis pontos principais: (i) Introdução de um submodelo que simulará a alocação e *turnover* de Carbono para diversos compartimentos da planta (*e.g.* raízes, tronco, folhas e etc.), fundamentado por *tradeoffs* entre parâmetros variantes que representam atributos funcionais das plantas, estritamente relacionados ao funcionamento ecossistêmico e à ciclagem de Carbono (*e.g.* Taxa máxima de carboxilação da RuBisCO, razão C:N nos tecidos vegetais, sensibilidade da fotossíntese à condutância estomática e etc.); (ii) Revisão dos cálculos de fotossíntese; (iii) Introdução de um módulo de fenologia; (iv) Revisão dos cálculos de balanço hídrico; (v) Transformação do modelo obtido nos passos anteriores em um modelo dinâmico, ou seja, um DGVM e (vi) introdução de dois submodelos que simularão os ciclos do Nitrogênio e do Fósforo e a limitação destes nutrientes sobre três processos fundamentais para a ciclagem de C: **Alocação de carbono entre diferentes tecidos vegetais (crescimento), fotossíntese (produtividade) e respiração heterotrófica no solo e serapilheira (mineralização)**. Os passos (i, ii, iii e iv) estão em fase final de desenvolvimento, realizadas por dois projetos mestrado e um projeto de iniciação científica, todos realizados sob a supervisão do orientador deste projeto. O passo (v) será realizado por um técnico em informática capacitado, em concomitância ao passo (vi), que corresponde à tarefa principal deste projeto de pesquisa. A criação do DGVM CAETÊ é um esforço de longo prazo, e o trabalho realizado no projeto aqui proposto representa um passo importante para a conclusão deste esforço.

3.2 Ciclos de C, N e P: Decomposição da matéria orgânica e mineralização de Nutrientes*.*

A estrutura atual do CAETÊ divide o Carbono vegetal em decomposição em dois compartimentos (serapilheira e solo), onde as taxas de *decomposição* são regidas por uma função de decaimento da serapilheira, dependente da evapotranspiração, e uma função de armazenamento de Carbono pelo solo, dependente da temperatura. Esta estrutura simples não permite a simulação dos ciclos de N e P na serapilheira e no solo, bem como é inadequada para a simulação do ciclo de C (Veja Knorr et al. 2005). Para alcançar os objetivos deste projeto, implementaremos, no DGVM-CAETÊ, um ciclo de C baseado no módulo biogeoquímico do modelo CABLE-2.0 (*a.k.a.* CASA-CNP, Wang et al. 2010), que por sua vez é baseado no modelo CASA (Carnegie Ames Stanford Approach, Potter et al. 1993).

O CASA-CNP divide a MOS (Matéria Orgânica no solo) em uma série de compartimentos: Resíduos lenhosos, serapilheira estrutural e serapilheira metabólica, MOS Passiva, MOS de Decomposição lenta (Ativa) e Biomassa Microbiana (Veja a Figura 1). No CASA-CNP a vegetação é dividida em três compartimentos (Raízes, Tecido Lenhoso, Folhas). As equações diferenciais que governam os fluxos de carbono nos três compartimentos de C do CASA-CNP estão descritas em Wang et al. (2010; apêndice B - p. 2227; eqns. B1, B2, B3) e são facilmente adaptáveis à estrutura do CAETÊ, que possui sete compartimentos de C na vegetação (Figura-1).

A distribuição da matéria morta originada dos compartimentos vegetais entre cada um dos 3 compartimentos de serapilheira é definida pela qualidade deste material, representada pela razão Lignina:Nitrogênio, como em Parton et al. (1987) (Wang et al. 2010)⁠. As taxas de turnover de C na serapilheira e no solo são dependentes da temperatura e umidade e textura do solo e qualidade da matéria orgânica como em Wang et al. (2010). As taxas de turnover nos compartimentos da vegetação são consideradas atributos funcionais das plantas, e serão definidos pelo módulo de alocação de carbono do DGVM-CAETÊ.

**Figura** 1**: Esquema simplificado do modelo de ciclo de carbono que será implementado no DGVM CAETÊ. Este modelo é baseado no ciclo de carbono implementado no modelo CASA-CNP (Wang et al. 2010)**

Esta nova estrutura permitirá que os ciclos de N e P sejam ligados ao ciclo de Carbono por meio das razões estequiométricas em cada um dos compartimentos de carbono. De maneira similar ao ciclo de Carbono, a transferência de N e P entre os reservatórios é regida por equações diferenciais (Wang et al. 2010 : Apêndices B e C), com coeficientes de transferência e taxas de turnover específicas para cada compartimento (Parton et al. 1987; Fung et al. 2005; Wang et al. 2010). As taxas de decomposição de Carbono e de mineralização bruta de N estão ligadas pelas razões estequiométricas N:C nos compartimentos do solo e da serapilheira, sendo a mineralização bruta proporcional ao carbono liberado na respiração heterotrófica e a razão estequiométrica N:C em cada compartimento. A mineralização liquida de N corresponde a diferença entre mineralização bruta de N e imobilização de N. Quando não há N disponível para a imobilização, as taxas de respiração heterotrófica são limitadas. (Wang et al. 2010).

A mineralização biológica do P segue o mesmo padrão da mineralização biológica do N. Porém, o P também pode ser mineralizado bioquimicamente, de maneira desacoplada do ciclo de C, através da produção de fosfatases, tanto pelos vegetais, quanto pelos microrganismos decompositores (Chapin et al. 2002; Wang et al. 2007). Na abordagem do CASA-CNP, a mineralização bioquímica do P é proporcional à quantidade de matéria orgânica nos compartimentos do solo e pode ser limitada pela disponibilidade de N para a produção de Fosfatases, dado que a produção de fosfatases demanda N, a mineralização bioquímica de P é dependente da razão P:N dos compartimentos do solo e da disponibilidade de N no compartimento de N inorgânico (Wang et al. 2007). O processo de mineralização (bioquímica e biológica) no solo e serapilheira alimenta dois compartimentos: N inorgânico e P lábil. São entradas para estes dois compartimentos, além da mineralização, a deposição de N e P, intemperismo da rocha parental (apenas para o P) e fixação de N. As saídas de N e P do ecossistema se dão por lixiviação de N e P, perda de P fortemente adsorvido para o compartimento de P ocluído, perda de compostos de N por volatilização, imobilização (para N e P) e captação de N e P pelas plantas.

É importante mencionar que o ciclo de carbono aqui proposto é inteiramente baseado em modelos de ciclagem de C amplamente utilizados, difundidos e que possuem código aberto ou licenças que permitem a sua utilização (Parton et al. 1987; Potter et al. 1993; Wang et al. 2007; Wang et al. 2010)⁠. Julgamos que esta estratégia é mais segura, diante da complexidade desta classe de modelos e do fato que que o foco principal deste projeto é a construção de um modelo baseado em atributos funcionais de plantas que considere a limitação por nutrientes em sua lógica e não a construção de um modelo de ciclo de carbono a partir do zero.

3.3 Ciclos de C, N e P: Alocação de Carbono nos tecidos vegetais

No CAETÊ, a demanda de N e P pela vegetação será dependente das razões N:C e P:C, das taxas de turnover e dos coeficientes de alocação para cada um dos seguintes compartimentos da vegetação: (i) raízes finas, (ii) folhas, (iii) tecidos lenhosos acima do solo e (iv) tecidos lenhosos abaixo do solo, (v) reserva, (vi) reprodução e (vii) Compostos Orgânicos Voláteis. A estrutura para a alocação de C na vegetação encontra-se em fase final de implementação no Laboratório de Ciências do Sistema Terrestre, como mencionado na seção 3.1. A vegetação terá acesso apenas aos compartimentos ‘N inorgânico’ e ‘P lábil‘, sendo que, se a demanda vegetal for maior do que a disponibilidade de nutrientes nos compartimentos inorgânicos, a alocação de C vegetal será proporcional às razões estequiométricas para cada compartimento da vegetação. Assim, a alocação de C será limitada pela razão mais limitante nos compartimentos vegetais: N:C ou P:C.

3.4 Ciclos de C, N e P: Processos Foliares.

Além da limitação na alocação de C e da respiração heterotrófica (seção 3.2), a limitação por N e P também será incorporada nos cálculos da fotossíntese.

O CAETÊ calcula a fotossíntese em nível foliar através do uso do modelo bioquímico de Farquhar (Farquhar et al. 1980), com algumas modificações listadas em Lapola 2007. Propomos aqui um conjunto de alterações, neste modelo, que permitirão inserir a limitação por nutrientes através do (i) cálculo dinâmico dos parâmetros Vcmax (Taxa máxima de Carboxilação da RuBisCO), Jmax (Capacidade máxima de transporte de Elétrons), ambos correlacionados com o conteúdo de N e P nos tecidos foliares (Kattge et al. 2009; Domingues et al. 2010); e (ii) adição de uma nova equação no sistema modificado de Farquhar et al. (1980) do CAETÊ. Esta equação é parte do modelo original de Farquhar et al. (1980) e implementa a fotossíntese limitada pela Triose fosfato, um produto da fotorrespiração, importante na recuperação de ortofosfato dentro do ciclo de Calvin. Esta equação pode ser incorporada ao modelo como limitação da fotossíntese por P (Harley and Sharkey 1991; Ellsworth et al. 2015). Para tanto, novos atributos funcionais [além daqueles relacionados a alocação de C e razões estequiométricas N:C, P:C para cada um dos compartimentos vegetais e daqueles relacionados ao processo fotossintético e de respiração autotrófica (Estes atributos funcionais foram incorporados ao CAETÊ no passo (ii) da seção 3.1)], serão incorporados à lógica do CAETÊ: razão P foliar:Massa foliar e razão N foliar:Massa foliar (Tabela 1). O cálculo da fotossíntese, respiração autotrófica, respiração heterotrófica e alocação da NPP para cada célula de grade serão baseados nestes atributos funcionais.

Tabela 1: Atributos funcionais que serão mantidos como variáveis dento do CAETÊ

|  |  |
| --- | --- |
| **Atributo Funcional** | **Unidade** |
| Área Foliar Específica | m2gC-1 |
| Vcmax | mol CO2 m-2s-1 |
| Jmax | mol Elétrons E-1 |
| Sensibilidade da condutância estomática à assimilação de C | mol CO2 m-2 s-1 |
| Razões estequimétricas N:C para compartimentos vegetais | adimendsional |
| Razões estequimétricas P:C para compartimentos vegetais | adimendsional |
| Razão P foliar : Massa foliar | adimendsional |
| Razão N foliar : Massa foliar | adimendsional |

**3.6 Protocolo de Aplicação e Avaliação**

O DGVM CAETÊ receberá como inputs dados de precipitação, temperatura, radiação incidente e pressão atmosférica [ISIMIP-2 (Hempel et al. 2013)], bem como concentração atmosférica de CO2 e disponibilidade de Nitrogênio de Fósforo (Wang et al. 2010; Yang et al. 2013; NOAA ESRL 2016). Para os processos de parametrização e avaliação do modelo serão utilizados dados experimentais originados em estudos prévios sobre estes nutrientes (*e.g.* CANIF [*Carbon and Nitrogen Cycling in Forest Ecosystems*], LBA, e experimentos FACE). Rodadas do DGVM CAETÊ devem ser efetuadas utilizando-se climatologias do CMIP-5 (IPCC-AR5), visando testar as questões levantadas por este projeto. Na fase final o modelo deve ser avaliado através do protocolo de avaliação ILAMB (International Land Model Benchmarking Project) Luo et al. (2012).

1. **Cronograma e Plano de trabalho**

A fim de realizar os objetivos propostos nesta pesquisa dividimos o trabalho em uma série de tarefas a serem realizadas:

1. Adaptação e inserção dos modelos propostos para os ciclos de Nitrogênio e Fósforo no DGVM CAETÊ. *(Objetivos 1 e 2)*
2. Analise de Sensibilidade (variando inputs), Parametrização (utilizando dados experimentais de estudos prévios) e Validação do modelo seguindo o Protocolo *ILAMB (Luo et al. 2012)*. *(Objetivos 1 e 2)*
3. Experimentação do CAETÊ com climatologias do CMIP5 [Coupled Model Intercomparison Phase 5] gerados a partir dos cenários de forçantes climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 (Moss et al. 2010). *(Objetivos 1 e 2).*
4. Análise da diversidade funcional por meio de índices adequados (Schleuter et al. 2010), dos outputs obtidos no item anterior. A diversidade funcional será mensurada a partir dos atributos funcionais considerados no CAETÊ. Esta tarefa serve à hipótese 1 do objetivo (ii)
5. Efetuar uma rodada do modelo com os atributos funcionais do CAETÊ mantidos fixos para um conjunto de PFTs a serem definidos no decorrer do projeto, e subsequente comparação dos fluxos e estoques de C desta rodada com os resultados obtidos no item 3 desta seção.
6. O intercâmbio na fase de conclusão da pesquisa permitirá a interação do beneficiário com pesquisadores de um centro de excelência em modelagem a ser definido durante o desenvolvimento da pesquisa (*e.g.* ORNL – Oak Ridge National Laboratory - EUA). Do ponto de vista científico, um intercambio possibilitará que as tarefas conclusivas sejam realizadas sob supervisão de pessoal com larga experiência em modelagem de ecossitemas.
7. Participação do beneficiário nos cursos e workshops do AmazonFACE Model-Experiment Integration Project (Lapola and Norby 2014; Norby et al. 2016).
8. Publicação de três artigos em revistas de alto impacto da área, sendo o beneficiário o primeiro autor. O primeiro artigo abarcará os pontos 1 ,2 e 3 desta seção, com foco na região amazônica, o segundo artigo abarcará, os pontos 4 e 5 desta seção, com foco também na região amazônica e o terceiro, fazendo uma síntese geral da pesquisa em escala global.

Tabela 2: CRONOGRAMA

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Semestres** | | | | | | | |
| **Tarefas** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** |
| 1. Desenvolvimento dos Ciclos de N e P no CAETÊ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1. Análise de Sensibilidade/Parametrização/Validação |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1. Análise com forçantes climáticas do CMIP5 e da influência dos ciclos de N e P na hipótese de savanização da Amazônia |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1. Análise da diversidade funcional dentro do modelo CAETÊ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1. Intercâmbio |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Redação da Tese/Artigos científicos |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Relatórios Científicos |  |  |  |  |  |  |  |  |

Bibliografia

A inserir

1. ‘*Missing carbon sink*’ é um termo que faz referência a diferença entre todo o carbono emitido por atividades antrópicas e a soma do que é acumulado nos oceanos e na atmosfera. Atualmente esta diferença é atribuída, com certo grau de incerteza, a acumulação de carbono nos ecossistemas terrestres (Le Quéré et al. 2013). [↑](#footnote-ref-2)