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

(TITULO SUGERIDO PELO DAVID: Modeling the role of nutrients for the stability of the Amazon forest in light of climate change)

Resumo

Abstract

1. Introdução

As emissões antropogênicas de CO2 alteram os processos que regulam os balanços de Carbono (C) entre a atmosfera, os oceanos e superfície terrestre (Archer et al. 2009; Bindoff et al. 2013; Le Quéré et al. 2015). As alterações antropogênicas da ciclagem do C impactam direta e indiretamente os ecossistemas terrestres; diretamente, através do aumento da disponibilidade de CO2, um recurso fundamental para a vegetação, e indiretamente por meio das mudanças climáticas e meteorológicas previstas. Estimativas indicam que globalmente os ecossistemas florestais armazenam cerca de 861 ± 66 PgC – Petagramas de Carbono (Pan et al. 2011) e seu funcionamento como reservatório de C é variável e dependente de fatores ambientais que se encontram em mudança (Lenton et al. 2009). Uma quantidade considerável [cerca de 55%, ou 471 ± 93 PgC] do C de ecossistemas florestais encontra-se em florestas tropicais, sendo que, a floresta amazônica constitui a maior extensão continua de floresta tropical armazena entre 150 e 200 PgC (Feldpausch et al. 2012; Liu et al. 2015). A floresta tropical amazônica, que é responsável por 14% da produtividade primária liquida (*Net Primary Productivity-* NPP) dos ecossistemas terrestres, tem um papel fundamental para a ciclagem de carbono, 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 floresta amazônica funciona como um importante agente mitigatório para as emissões antropogênicas de CO2 (Le Quéré et al. 2009), porém a estabilidade deste sumidouro durante o século XXI ainda é incerta frente às alterações ambientais globais (Huntingford et al. 2013; Williams 2013; Hofhansl et al. 2016).

Há quase duas décadas foi postulada a hipótese conhecida como ‘*forest die-back*’, que previa uma diminuição drástica na biomassa e descaracterização da floresta amazônica como bioma florestal, em consequência das mudanças em 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, estudos sugeriram que o efeito de fertilização por CO2 causaria uma manutenção da produtividade e da biomassa deste ecossistema florestal, evitando, ou postergando o ‘forest die-back’ na Amazônia (Lapola et al. 2009; Cox et al. 2013; Huntingford et al. 2013). O efeito de Fertilização por CO2 é observado como aumento da produtividade primária bruta - especialmente das plantas *C3*, em resposta ao aumento da [CO2] na atmosfera (Farquhar 1997). Este aumento de produtividade pode ser resultante, tanto da resposta fisiológica vegetal frente à maior disponibilidade de substrato para a carboxilação da Ribulose- 1,5 bifosfato carboxilase oxidase.(RuBisCO) (Kimball 1983; Friedlingstein 1995), quanto 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 e resultante do fato de que as plantas podem diminuir a condutância estomática para a água em uma situação de maior concentração de CO2 na atmosfera, aumentando a eficiência da planta quanto ao uso de recursos hídricos no processo de 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 hipótese do *forest die-back* permanece indefinida. Esta falta de definição é em parte atribuída a não consideração, de maneira conjunta, de dois importantes aspectos ligados a ciclagem do carbono nos ecossistemas; a (i) limitação do efeito de fertilização por CO2 por nutrientes e as (ii) respostas adaptativas da vegetação frente ao aumento de CO2 na atmosfera. (Hofhansl et al. 2016).

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) e mais recentemente em nível de comunidades e ecossistemas por meio de experimentos de manipulação da [CO2], implementados na maior parte dos casos em regiões extratropicais na forma de experimentos dos tipos Open*-top Chamber* (OTC) e Free Air CO2 Enrichment experiment (FACE)(Norby and Zak 2011; Lapola and Norby 2014). Alguns estudos envolvendo modelos de vegetação e dados observacionais de sensoriamento remoto, oferecem indicativos do efeito da fertilização por CO2, na forma de um aumento de cobertura vegetal (*greening*) em áreas quentes e secas (Donohue et al. 2013; Zhu et al. 2016). Em conjunto com estudos de modelagem dos ecossistemas terrestres, estes experimentos 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 poderá ser atenuada após períodos iniciais de maior produtividade primária, em virtude da limitação progressiva por Nitrogênio (PNL). Muitos modelos que consideram explicitamente a interação C/N projetam uma forte limitação de Nitrogênio (N) sobre a produtividade futura (cerca de 50%) dos ecossistemas terrestres frente ao aumento da [CO2] (Zaehle et al. 2014). Outro importante nutriente que possivelmente limitará os efeitos da fertilização por CO2 é o Fósforo (P) (Norby et al. 2010; Cernusak et al. 2013; Wieder et al. 2015), principalmente em ecossistemas tropicais. Estes ecossistemas apresentam maior disponibilidade de N em relação aos ecossistemas florestais extratropicais (Hedin et al. 2009; Wieder et al. 2015) e, uma vez que poucos modelos incorporam as interações Carbono/N/P (Wang et al. 2010; Goll et al. 2012; Yang et al. 2014; Wieder et al. 2015) pouco se sabe ainda sobre influência dos ciclos do P e do N a e suas relações com o armazenamento e estabilidade do carbono na Amazônia e em outros ecossistemas tropicais (Cernusak et al. 2013).

O segundo importante aspecto ainda pouco explorado em modelos de vegetação, são os impactos da relação entre os efeitos fertilização de CO2, limitação por nutrientes, e respostas adaptativas da vegetação sobre a diversidade funcional da floresta amazônica e outros ecossistemas terrestres (Hofhansl et al. 2016). A diversidade funcional mede a variabilidade (intra ou interespecífica) de atributos funcionais de seres vivos. Os atributos funcionais são, por sua vez qualquer característica comportamental, fenológica, fisiológica ou morfológica (*e.g.* massa da semente) que estão relacionados ao desempenho das funções biológicas dos indivíduos dentro da comunidade, incluindo suas relações com outros organismos. 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. A incorporação da diversidade funcional, através de variáveis de estado independentes, nos modelos de vegetação representa uma recente mudança de paradigma, uma vez que permite simulação mecanística de processos ecológicos de maneira mais efetiva em comparação com a abordagem de PFTs (Kattge et al. 2011; Scheiter et al. 2013).

Atualmente a lógica utilizada na maioria dos modelos para sintetizar a imensa diversidade funcional das plantas se dá pela classificação destas em PFTs - tipos funcionais de plantas (*Plant Funcional Types*) que correspondem a grupos de plantas que são teoricamente similares de acordo com a distribuição geográfica e com 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 relacionados ao funcionamento ecossistêmico (*e.g.* taxa máxima de carboxilação da RuBisCO) são mantidos constantes espacialmente e temporalmente. Tal abordagem afeta negativamente o poder preditivo dos modelos de duas diferentes maneiras. Primeiro, pelo viés ecológico, evidências experimentais (Kattge et al. 2011) 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 representadas pela diversidade de atributos funcionais, é provável que em face as mudanças ambientais as comunidades vegetais sofram mudanças na sua composição (Scheiter et al. 2013) sem necessariamente haver uma alteração de bioma (forest die back) ,isto é, respostas adaptativas poderão resultar na persistência de espécies cujos atributos funcionais são mais adequados às novas condições ambientais, podendo haver mudanças na composição das comunidades florestais, que por sua vez podem ou não contribuir para alteração no tipo de bioma (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 pelos PFTs ignora a variabilidade espacial e temporal destes atributos funcionais, empobrecendo as simulações no que diz respeito ao 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 dinâmicos de vegetação.

Para suprir a deficiência de conhecimento e as incertezas sobre os impactos das mudanças da [CO2] atmosférica no séc. XXI sobre a floresta amazônica, encontra-se em fase de implementação o 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 integra o processo de modelagem à coleta de dados em campo no desenho experimental (Norby et al. 2016). Este projeto pretende gerar simulações computacionais, que incorporem os avanços mais recentes no entendimento da limitação por nutrientes e das possíveis alterações na diversidade funcional da Amazônia, frentes as mudanças previstas para este século. É esperado que estas simulações forneçam material para a formulação de hipóteses sobre a influência que os estoques e fluxos de nutrientes podem ter para a Amazônia, bem como o papel das estratégias de crescimento e sobrevivência das espécies vegetais frente as mudanças climáticas e de concentração atmosférica de dióxido de carbono projetadas para o futuro.

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 diversidade florística amazônicas frente às mudanças ambientais globais* (elevada [CO2] na atmosfera e mudanças climáticas) por meio da utilização de um DGVM baseado em atributos funcionais de plantas e trade-offs relacionados. Este estudo proporcionará informações que guiarão as medições em campo, durante a execução do projeto piloto do experimento AmazonFACE. Com isso, esse projeto irá fornecer hipóteses-base, indicando inclusive as variáveis e processos a se prestar atenção a serem verificadas pelo experimento (Lapola and Norby 2014; Medlyn et al. 2016; Norby et al. 2016). A formulação e integração dos submodelos de N e P dentro do DGVM CAETÊ (veja a seção Métodos) é premente diante das evidências de que a disponibilidade de nutrientes deve afetar de maneira conclusiva o papel dos ecossistemas terrestres, no ciclo do carbono, como sumidouros/fontes de CO2 atmosférico durante o século XXI

2.1- Objetivos específicos*:*

Esta seção descreve os objetivos específicos deste projeto de pesquisa. Estes objetivos pretendem responder as seguintes questões:

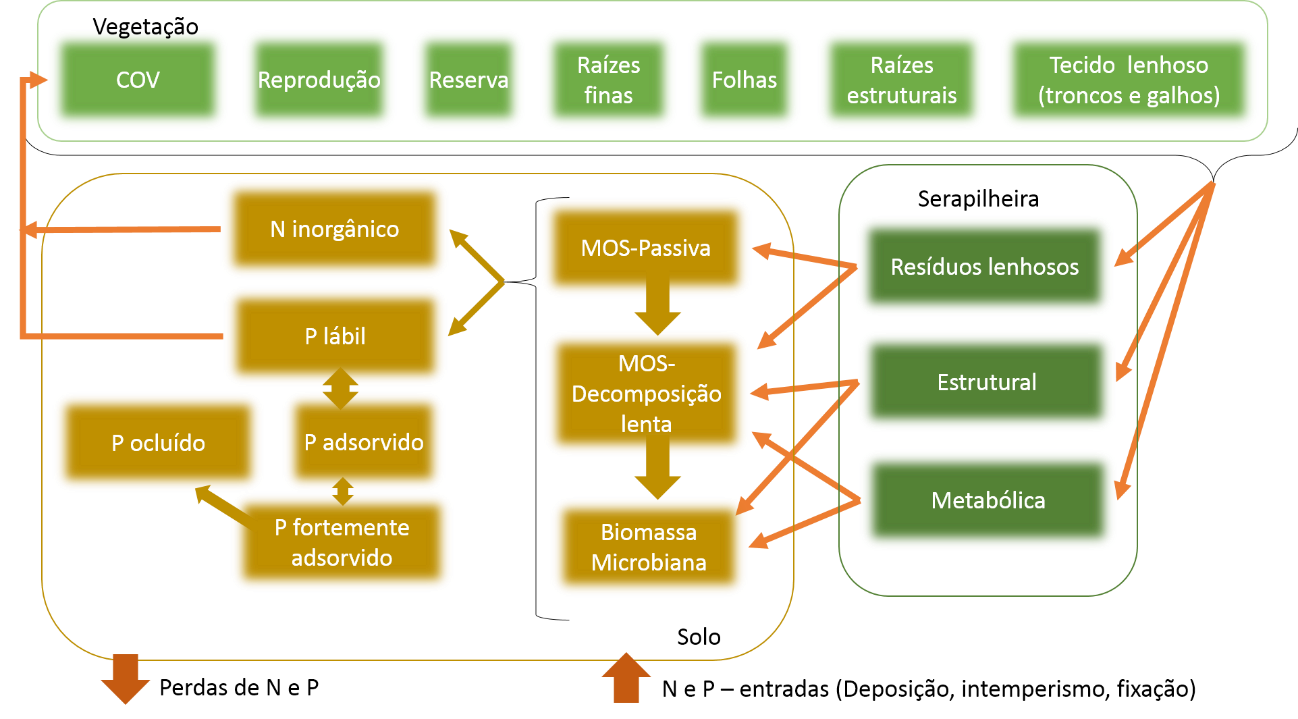
1. Quais são os efeitos das mudanças ambientais globais sobre a ciclagem do carbono nas florestas tropicais? O efeito de fertilização por CO2 será limitado pela disponibilidade de nutrientes?
   * **Hipótese 1** Sem a limitação por nutrientes (N e P) no DGVM CAETÊ, esperamos uma tendência positiva na estocagem e assimilação de C da floresta amazonica ao efeito de fertilização por CO2 ao longo do século XXI.
   * **Hipótese 2** Quando apenas o ciclo do Nitrogênio estiver incluído no DGVM CAETÊ, é esperado que haja pouca ou nenhuma limitação do efeito de fertilização por CO2 na Amazônia, devido 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, devida a limitação por nutrientes, sobretudo do P.
2. Quais serão os impactos das mudanças ambientais globais sobre a diversidade funcional na Amazônia durante o século XXI? Como estes impactos podem influenciar o funcionamento ecossistêmico?
   * **Hipótese 1** É possível 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.
3. Métodos

3.1 O DGVM CAETÊ

O DGVM CAETÊ está em fase de desenvolvimento no Laboratório de Ciência do Sistema Terrestre e será resultado de modificações realizadas no modelo estacionário CPTEC - *Potential Vegetation Model* *2* *(Lapola et al. 2009)*. O CPTEC-PVM-2 é um modelo de vegetação potencial que estima a distribuição de biomas a partir da produtividade primária líquida e de variáveis relacionadas ao balanço hídrico. Podemos resumir as modificações aplicadas ao CPTEC-PVM-2, e que darão origem ao DGVM CAETÊ, em três pontos principais: (i) Introdução de um submodelo 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 dos vegetais terrestres, que são estritamente relacionados ao funcionamento ecossistêmico e a 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) Transformação do Modelo obtido em (i) em um Modelo dinâmico, ou seja, um DGVM. (iii) 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: Fotossíntese, alocação de carbono entre diferentes tecidos vegetais e respiração heterotrófica. O passo (i) está sendo desenvolvido em dois mestrados realizados no LabTerra. Esta fase encontra-se em sua parte final de implementação. O passo (ii) será realizado por um técnico capacitado em concomitância ao passo (iii), que é o principal objetivo deste projeto de pesquisa. Antes da incorporação dos ciclos de N e P, o CAETÊ será aferido (durante o passo 1) através do protocolo *I-LAMB* [*International Land Model Benchmarking-* [*http://www.ilamb.org/*](http://www.ilamb.org/)]. O *I-LAMB* é um projeto de inter-comparação de resultados gerados por diversos modelos que simulam processos ecossistêmicos terrestres, e visa melhorar a performance e, consequentemente, reduzir as incertezas associadas a processos terrestres-chave simulados por estes modelos (Luo et al. 2012).

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 *turnover* são regidas por uma função de decaimento da serapilheira, que é dependente da evapotranspiração e uma função de armazenamento de Carbono pelo solo, que é dependente da temperatura. Fechando o ciclo de C o modelo calcula a respiração heterotrófica em cada compartimento. Para alcançar os objetivos deste projeto, pretendemos implementar uma estrutura mais avançada para a ciclagem de C no solo e serapilheira no CAETÊ (Figura 1), dividindo a matéria orgânica na serapilheira em três compartimentos: Resíduos lenhosos, serapilheira estrutural e serapilheira metabólica, e a Matéria Orgânica do Solo – MOS, também em três compartimentos: MOS Passiva, MOS de Decomposição lenta e Biomassa Microbiana. Os novos compartimentos de solo e serapilheira e os cálculos das taxas transferência de Carbono entre os compartimentos da serapilheira e o solo, bem como as taxas de turn-over de C em cada compartimento são baseados nos modelos CASA-CNP (Wang et al. 2010) e CENTURY (Parton et al. 1993).



Esta nova estrutura permitirá que os ciclos de N e P sejam ligados ao ciclo de Carbono por meio de razões estequiométricas em cada compartimento. De maneira similar ao ciclo de Carbono, a transferência de N e P entre os reservatórios é regida por equações diferenciais, com coeficientes de transferência e taxas de turnover específicas para cada compartimento.(Parton et al. 1993; 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 nos compartimentos do solo e serapilheira. A mineralização liquida de N corresponde a diferença entre mineralização bruta de N e imobilização de N (Imobilização é o processo em que os microrganismos decompositores assimilam os nutrientes (*e.g.* N e P) do solo, tornando estes nutrientes temporariamente indisponíveis para a vegetação). Quando não há N disponível para a imobilização as taxas de respiração heterotrófica diminuem. (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 CAETÊ a mineralização bioquímica do P será proporcional a quantidade de matéria orgânica nos compartimentos do solo e poderá ser limitada pela disponibilidade N para imobilização, 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.

3.3 Ciclos de C, N e P: Processos na vegetação

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) raízes estruturais e (iv) tecidos lenhosos, a estrutura para a alocação de C na vegetação se encontra 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 que a disponibilidade de nutrientes nos compartimentos inorgânicos a alocação de C vegetal será proporcional razões estequiométricas N:C para cada compartimento da vegetação. 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). Propomos aqui um conjunto de alterações, neste modelo, que permitirão inserir a limitação por nutrientes através do cálculo dinâmico dos parâmetros Vmax (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 adicionando uma nova equação no sistema modificado de Farquhar et al. 1980 implementado no 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, serão incorporados à lógica do CAETÊ: razão carboxilação/oxidação da RuBisCO; razão P foliar:Massa foliar e razão N foliar:Massa foliar. O cálculo da fotossíntese será baseado nestes atributos funcionais.

O DGVM CAETÊ receberá como inputs dados de precipitação, temperatura e radiação incidente, 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 utilizadas no IPCC-AR5 visando testar as questões levantadas por este projeto. O modelo CAETÊ conta com uma estrutura baseada em atributos funcionais e tradeoffs relacionados a alocação de carbono para os diferentes compartimentos da vegetação. A inserção de um ciclo de carbono que permita a simulação da limitação de N e P em um modelo que já incorpora uma lógica baseada em atributos funcionais e trade-offs é pioneira, apesar do fato de que as duas abordagens já foram utilizadas de maneira independente (Wang et al. 2010; Pavlick et al. 2012; Yang et al. 2014)

1. **Cronograma e Plano de trabalho**

A fim de realizar os objetivos propostos nesta pesquisa dividimos o trabalho em cinco 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 *I-LAMB* *(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 dos fatores que levam ou não a savanização da floresta amazonica dentro do DGVM CAETÊ. Enquadram-se aqui, tantos os fatores originados pelas possíveis alterações na diversidade funcional [Favorecimento de atributos funcionais relacionados à Eficiência no Uso de Recursos] deste ecossistema (serve ao objetivo 2), quanto fatores relacionados a mudanças climáticas e limitação do efeito de fertilização por CO2 pela disponibilidade de nutrientes (serve ao objetivo 1). *(Objetivos 1 e 2)*
5. 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 DVGMs.
6. Participação do beneficiário nos cursos e workshops do AmazonFACE Model-Experiment Integration Project (Lapola and Norby 2014; Norby et al. 2016).
7. Publicação de dois artigos em revistas de alto impacto da área, sendo o beneficiário o primeiro autor. O primeiro artigo abarcará os pontos 1 e 2 desta seção, o segundo, os pontos 3 e 4 desta seção.

Tabela 1: 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 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1. Teste de influência dos ciclos de N e P na hipótese de savanização da Amazônia |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1. Intercâmbio |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Redação da Tese/Artigos científicos |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Relatórios Científicos |  |  |  |  |  |  |  |  |

1. **Referencias**

Archer D, Eby M, Brovkin V, et al (2009) Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. Annu Rev Earth Planet Sci 37:117–134. doi: 10.1146/annurev.earth.031208.100206

Bindoff N, Stott P, AchutaRao K, et al (2013) Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovenermnetal Panel on Climate Change. Cambridge University Press., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., pp 867–952

Brienen RJ., Phillips OL, Al E (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. Nature 519:344–348. doi: 10.1038/nature14283

Cernusak LA, Winter K, Dalling JW, et al (2013) Tropical forest responses to increasing atmospheric CO2: Current knowledge and opportunities for future research. Funct Plant Biol 40:531–551. doi: 10.1071/FP12309

Chapin FS, Matson P a, Mooney H a (2002) Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology.

Cook KH, Vizy EK (2008) Effects of twenty-first-century climate change on the Amazon rain forest. J Clim 21:542–560. doi: 10.1175/2007JCLI1838.1

Cox PM, Betts R a, Jones CD, et al (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature 408:184–187. doi: 10.1038/35041539

Cox PM, Betts RA, Collins M, et al (2004) Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. Theor Appl Climatol 78:137–156. doi: 10.1007/s00704-004-0049-4

Cox PM, Pearson D, Booth BB, et al (2013) Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. Nature 494:341–4. doi: 10.1038/nature11882

Domingues TF, Meir P, Feldpausch TR, et al (2010) Co-limitation of photosynthetic capacity by nitrogen and phosphorus in West Africa woodlands. Plant, Cell Environ 33:959–980. doi: 10.1111/j.1365-3040.2010.02119.x

Donohue RJ, Roderick ML, McVicar TR, Farquhar GD (2013) Impact of CO2 fertilization on maximum foliage cover across the globe’s warm, arid environments. Geophys Res Lett 40:3031–3035. doi: 10.1002/grl.50563

Eamus D, Jarvis PG (1989) The direct effects of increase in the global atmospheric CO2 concentration on natural and commercial temperature trees and forests. Adv Ecol Res 19:1–55.

Ellsworth DS, Crous KY, Lambers H, Cooke J (2015) Phosphorus recycling in photorespiration maintains high photosynthetic capacity in woody species. Plant, Cell Environ 38:1142–1156. doi: 10.1111/pce.12468

Farquhar GD (1997) Carbon Dioxide and Vegetation. Science (80- ) 278:1411. doi: 10.1126/science.278.5342.1411

Farquhar GD, von Caemmerer S, Berry JA (1980) A biochemical model of photosynthetic CO2 assimilation in leaves of C3 species. Planta 149:78–90. doi: 10.1007/BF00386231

Feldpausch TR, Lloyd J, Lewis SL, et al (2012) Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. Biogeosciences 9:3381–3403. doi: 10.5194/bg-9-3381-2012

Friedlingstein P (1995) On the contribution of CO2 fertilization to the missing biospheric sink. Global Biogeochem Cycles 9:541–556. doi: 10.1029/95GB02381

Fung IY, Doney SC, Lindsay K, John J (2005) Evolution of carbon sinks in a changing climate. Proc Natl Acad Sci U S A 102:11201–11206. doi: 10.1073/pnas.0504949102

Goll DS, Brovkin V, Parida BR, et al (2012) Nutrient limitation reduces land carbon uptake in simulations with a model of combined carbon, nitrogen and phosphorus cycling. Biogeosciences 9:3547–3569. doi: 10.5194/bg-9-3547-2012

Groenendijk M, Dolman AJ, van der Molen MK, et al (2011) Assessing parameter variability in a photosynthesis model within and between plant functional types using global Fluxnet eddy covariance data. Agric For Meteorol 151:22–38. doi: 10.1016/j.agrformet.2010.08.013

Harley PC, Sharkey TD (1991) An improved model of C3 photosynthesis at high CO2: Reversed O2 sensitivity explained by lack of glycerate reentry into the chloroplast. Photosynth Res 27:169–178. doi: 10.1007/BF00035838

Hedin LO, Brookshire ENJ, Menge DNL, Barron AR (2009) The Nitrogen Paradox in Tropical Forest Ecosystems. Annu Rev Ecol Evol Syst 40:613–635. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110246

Hempel S, Frieler K, Warszawski L, et al (2013) A trend-preserving bias correction &ndash; The ISI-MIP approach. Earth Syst Dyn 4:219–236. doi: 10.5194/esd-4-219-2013

Hofhansl F, Andersen KM, Fleischer K, et al (2016) Amazon Forest Ecosystem Responses to Elevated Atmospheric CO2 and Alterations in Nutrient Availability: Filling the Gaps with Model-Experiment Integration. Front Earth Sci 4:1–9. doi: 10.3389/feart.2016.00019

Huntingford C, Zelazowski P, Galbraith D, et al (2013) Simulated resilience of tropical rainforests to CO2-induced climate change. Nat Geosci 6:268–273. doi: 10.1038/ngeo1741

Kattge J, Díaz S, Lavorel S, et al (2011) TRY - a global database of plant traits. Glob Chang Biol 17:2905–2935. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02451.x

Kattge J, Knorr W, Raddatz T, Wirth C (2009) Quantifying photosynthetic capacity and its relationship to leaf nitrogen content for global-scale terrestrial biosphere models. Glob Chang Biol 15:976–991. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01744.x

Kimball BA (1983) Carbon Dioxide and Agricultural Yield: An Assemblage and Analysis of 430 Prior Observations1. Agron J. doi: 10.2134/agronj1983.00021962007500050014x

Lapola DM, Norby RJ (2014) Assessing the effects of increased atmospheric CO2 on the ecology and resilience of the Amazon forest. SCIENCE PLAN & IMPLEMENTATION STRATEGY. 51.

Lapola DM, Oyama MD, Nobre CA (2009) Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: The role of CO2 fertilization and seasonality. Global Biogeochem Cycles 23:1–16. doi: 10.1029/2008GB003357

Le Quéré C, Moriarty R, Andrew RM, et al (2015) Global Carbon Budget 2015. Earth Syst Sci Data 7:349–396. doi: 10.5194/essd-7-349-2015

Le Quéré C, Raupach MR, Canadell JG, Al. GM (2009) Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nat Geosci 2:831 – 836. doi: 10.1038/ngeo689

Lenton T, Foottit A, Dlugoglecki A (2009) Major Tipping Points in the Earth ’ s Climate System and Consequences for the Insurance Sector. Text 97.

Liu YY, van Dijk AIJM, de Jeu R a M, et al (2015) Recent reversal in loss of global terrestrial biomass. Nat Clim Chang 5:1–5. doi: 10.1038/nclimate2581

Luo YQ, Randerson JT, Abramowitz G, et al (2012) A framework for benchmarking land models. Biogeosciences 9:3857–3874. doi: 10.5194/bg-9-3857-2012

Medlyn B, De Kauwe M, Walker A, et al (2016) Using models to guide experiments: a priori predictions for the CO2 response of a nutrient- and water-limited mature Eucalypt woodland. Glob Chang Biol 1–18. doi: 10.1111/gcb.13268

Moss RH, Edmonds J a, Hibbard K a, et al (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463:747–756. doi: 10.1038/nature08823

NOAA ESRL (2016) Global Monitoring Division. http://esrl.noaa.gov/gmd/. Accessed 24 Feb 2016

Norby RJ, De Kauwe MG, Domingues TF, et al (2016) Model-data synthesis for the next generation of forest free-air CO2 enrichment (FACE) experiments. New Phytol 209:17–28. doi: 10.1111/nph.13593

Norby RJ, Delucia EH, Gielen B, et al (2005) Forest response to elevated CO2 is conserved across a broad range of productivity. Proc Natl Acad Sci U S A 102:18052–6. doi: 10.1073/pnas.0509478102

Norby RJ, Gunderson CA, Wullschleger SD, et al (1992) Productivity and Compensatory Responses of Yellow-Poplar Trees in Elevated Co2. Nature 357:322–324. doi: Doi 10.1038/357322a0

Norby RJ, O’neill EG, Luxmoore RJ (1986) Effects of Atmospheric CO(2) Enrichment on the Growth and Mineral Nutrition of Quercus alba Seedlings in Nutrient-Poor Soil. Plant Physiol 82:83–89. doi: 10.1104/pp.82.1.83

Norby RJ, Warren JM, Iversen CM, et al (2010) CO2 enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. Proc Natl Acad Sci U S A 107:19368–19373. doi: 10.1073/pnas.1006463107

Norby RJ, Zak DR (2011) Ecological Lessons from Free-Air CO2 Enrichment (FACE) Experiments. Annu Rev Ecol Evol Syst 42:181–203. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-102209-144647

Oyama MD (2003) A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. Geophys Res Lett 30:10–13. doi: 10.1029/2003GL018600

Pan Y, Birdsey R a, Fang J, et al (2011) A large and persistent carbon sink in the world’s forests. Science (80- ) 333:988–993. doi: 10.1126/science.1201609

Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, et al (1993) Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. Glob Biogeochem Cycles 7:785–809. doi: 10.1029/93gb02042

Pavlick R, Drewry DT, Bohn K, et al (2013) The Jena Diversity-Dynamic Global Vegetation Model (JeDi-DGVM): a diverse approach to representing terrestrial biogeography and biogeochemistry based on plant functional trade-offs. Biogeosciences 10:4137–4177. doi: 10.5194/bg-10-4137-2013

Pavlick R, Drewry DT, Bohn K, et al (2012) The Jena Diversity-Dynamic Global Vegetation Model (JeDi-DGVM): a diverse approach to representing terrestrial biogeography and biogeochemistry based on plant functional trade-offs. Biogeosciences Discuss 9:4627–4726. doi: 10.5194/bgd-9-4627-2012

Phillips OL, Phillips OL, Aragão LEOC, et al (2009) of the Amazon Rainforest. Science (80- ) 1344:1344–1348. doi: 10.1126/science.1164033

Prentice I, Farquhar G, Fasham M (2001) The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. Clim Chang 2001 Sci Basis 183 – 237. doi: 10.1256/004316502320517344

Prentice IC, Cramer W, Harrison SP, et al (1992) A global biome model based on plant physiology and sominance, soil properties and climate. J Biogeogr 19:117–134. doi: 10.2307/2845499

Scheiter S, Langan L, Higgins SI (2013) Next-generation dynamic global vegetation models: learning from community ecology. New Phytol 198:957–69. doi: 10.1111/nph.12210

Steffen W, Canadell P (2005) Carbon Dioxide Fertilisation and Climate Change Policy. 36.

Tilman D, Reich PB, Knops JMH (2006) Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. Nature 441:629–632. doi: 10.1038/nature04742

Wang YP, Houlton BZ, Field CB (2007) A model of biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, and phosphorus including symbiotic nitrogen fixation and phosphatase production. Global Biogeochem Cycles 21:1–15. doi: 10.1029/2006GB002797

Wang YP, Law RM, Pak B (2010) A global model of carbon, nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere. Biogeosciences 7:2261–2282. doi: 10.5194/bg-7-2261-2010

White A, Cannell M, Friend A (1999) Climate change impacts on ecosystems and the terrestrial carbon sink: a new assessment. Glob Environ Chang 9:S21–S30. doi: 10.1016/S0959-3780(99)00016-3

Wieder WR, Cleveland CC, Smith WK, Todd-Brown K (2015) Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability. Nat Geosci 8:441–444. doi: 10.1038/ngeo2413

Williams JN (2013) Humans and biodiversity : population and demographic trends in the hotspots. 510–523. doi: 10.1007/s11111-012-0175-3

Yang X, Post WM, Thornton PE, Jain A (2013) The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. Biogeosciences 10:2525–2537. doi: 10.5194/bg-10-2525-2013

Yang X, Thornton PE, Ricciuto DM, Post WM (2014) The role of phosphorus dynamics in tropical forests - A modeling study using CLM-CNP. Biogeosciences 11:1667–1681. doi: 10.5194/bg-11-1667-2014

Zaehle S, Medlyn BE, De Kauwe MG, et al (2014) Evaluation of 11 terrestrial carbon-nitrogen cycle models against observations from two temperate Free-Air CO2 Enrichment studies. New Phytol 202:803–822. doi: 10.1111/nph.12697

Zhu Z, Piao S, Myneni RB, et al (2016) Greening of the Earth and its drivers. Nat Clim Chang 1–6. doi: 10.1038/nclimate3004

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