

Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Relação entre os fatores edafo-climáticos e os isótopos estáveis de carbono e nitrogênio ao longo do gradiente Pantanal-Cerrado-Caatinga

Fábio Luís de Souza Santos

Brasília-DF
2021

Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Relação entre os fatores edafo-climáticos e os isótopos estáveis de carbono e nitrogênio ao longo do gradiente Pantanal-Cerrado-Caatinga

Fábio Luís de Souza Santos

Tese apresentada ao Instituto de Ciências
Biológicas, Universidade de Brasília como parte
dos requisitos para a obtenção do título de Doutor
em Ecologia.

Orientadora: Profa Dra Gabriela Bielefeld Nardoto

Brasília-DF
2021

Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Relação entre os fatores edafo-climáticos e os isótopos estáveis de carbono e nitrogênio ao longo do gradiente Pantanal-Cerrado-Caatinga

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Gabriela Bielefeld Nardoto / PPG ECL - UnB (Presidente/Orientadora)

Prof. Dr. Cícero Celio de Figueiredo / FAV – UnB (Membro Titular)

Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes / Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (Membro Titular)

Prof. Dr. Plínio Barbosa de Camargo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP (Membro Titular)

Profa. Dra. Mercedes Maria da Cunha Bustamante / PPG ECL - UnB (Membro Suplente)

*Não a nós, Senhor, nenhuma glória para nós, mas sim ao teu nome, por teu amor e
por tua fidelidade!*

Salmos 115:1

À Luana, minha esposa e companheira de todas as horas,

Dedico

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida, pela salvação e pelo favor não merecido que me fez chegar até aqui. Por me ajudar em todos os momentos, sou grato.

A toda minha família, especialmente à minha esposa Luana que suportou todas as minhas conquistas e angústias, alegrias e decepções, me fortalecendo e incentivando. Também agradeço a minha mãe Antonia e aos meus irmãos Gustavo e Caroline por nossa união, pelo incentivo, a paciência e pelo amor incondicional que têm para comigo.

A minha orientadora de tantos anos, Dra. Gabriela Nardoto, pela paciência, amizade, pela confiança em todos os momentos, pelos conselhos, ensinamentos e pela tamanha dedicação aos seus alunos e à sua profissão, que a fazem um brilhante profissional. Com admiração a agradeço.

Sou muito grato aos ensinamentos de todos os professores e pesquisadores que me orientaram até aqui. Farei uma pequena linha do tempo desde Ivanildo (Preto Breu) e Pedro Emílio, do meu Ensino Médio; passando por Dr. Antonio Felipe, Dr. Vinicius Vasconcelos, Dr. Ludgero Vieira na graduação e pós-graduação; Dra. Adriana Reatto e Dr. Éder Martins na EMPBRAPA Cerrados; e chegando ao Dr. Luiz Felipe Salemi, no doutorado. Juntamente com a Dra. Gabriela Nardoto, que esteve comigo desde a graduação, vocês são responsáveis pela minha formação acadêmica, com ensinamentos que ultrapassam os limites do trabalho, mas que refletem por toda a vida.

Ao EIS (Environmental Isotopes Studies) que me fez crescer em relação ao conhecimento científico e por todas as suas produções. Sou grato ao André “Jacaré”, à Juliana Ribeiro e Fábio Costa por todas as contribuições que fizeram ao trabalho. Mayrink, Luiza, Mariana, Emanuel, João Paulo, Renato e todos que contribuíram em algum momento dentro das reuniões semanais. Quero agradecer em especial aos meus amigos João Paulo, Ray Pinheiro, Tiago Kisaka, Glauber das Neves, Vinícius Pompermaier, Giovana Gomes, Jéssica Guimarães, Pedro Martins, Fábio Costa, Henrique Dalton, Elisa Alvim, Diogo Rocha, Gleicon Rocha, pela contribuição, pelas ideias, pelas conversas produtivas e improdutivas, os desabafos e angústias compartilhados que aliviam a tensão e nos ajudam a seguir em frente. É um grupo realmente magnífico e qualificado, cujo me sinto orgulhoso de fazer parte. Aproveito para agradecer aos técnicos, alunos de PIBIC e estagiários que contribuíram ao longo desses anos no laboratório. Não citarei nomes para não correr risco de deixar alguém de fora. Sintam-se todos contemplados. Vocês fazem parte dessa conquista.

Agradeço ao Projeto Origem (23038.006832/2014-11 - Edital CAPES 25/2014 - Pró-Forenses) por possibilitar o trabalho de campo e as análises laboratoriais, mas principalmente por me proporcionar a convivência com pessoas incríveis, ter ótimas experiências e ir a lugares encantadores. Cito alguns que estiveram mais perto: Guilherme “Soninho”, Roni, Érico, Vanessa, professor Renato e todos os seus alunos, e claro toda a equipe de solos do nosso laboratório citados nominalmente em outros trechos deste agradecimento.

Sou grato pelas parcerias que fizemos, especialmente com os professores da UFPE, Rômulo e Everardo e ao pesquisador Jean Ometto. Parte dos dados utilizados nessa tese veio dessas parcerias no âmbito dos projetos: "Impactos de mudanças climáticas sobre a cobertura e uso da terra em Pernambuco: geração e disponibilização de informações para o subsídio a políticas públicas (FACEPE-0077-5.01/09 and FAPESP 2009/52468-0)"; "Consolidação do Núcleo de Pesquisas em Dinâmica da Água e de Carbono em Ecossistemas no Estado de Pernambuco (Edital 08/2014 FACEPE PRONEM, APQ-0532-5.01/14)" e ONDACBC: Observatório Nacional da dinâmica de água e carbono no bioma Caatinga (465764/2014-2).

Agradeço pela oportunidade de ter participado da *School of Advanced Science on Nitrogen Cycling for Environmental Sustainability and Climate Change*, coordenada pelo professor Luiz Antônio Martinelli. Foi uma experiência única e fundamental para quebrar barreiras em minha vida acadêmica.

Agradeço ao CAPES e ao CNPq pelas bolsas concedidas neste período, ao PPG em Ecologia da UnB pela estrutura e ensino, e à Embrapa Cerrados que possibilitou algumas análises do estudo.

Faço menção a pessoas que foram fundamentais para mim antes mesmo de iniciar a vida acadêmica, como Roniel, Azulão, pastores Carlos e Marcos. Todos vocês contribuíram para minha formação pessoal e me possibilitaram alcançar os feitos atuais.

Agradeço todos os meus amigos que me entenderam, respeitaram e apoiaram durante a construção desse trabalho, e aqueles que não fizeram nada disso, mas são meus amigos.

Sou grato pelas pedras que encontrei no caminho, pois se me fizeram tropeçar, também me impulsionaram a ir mais adiante.

A você que leu tudo isso. Obrigado!

Resumo

Isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) têm sido usados mundialmente para avaliar a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), que por sua vez é essencial para o funcionamento do ecossistema. A dinâmica da MOS é condicionada basicamente por fatores edáficos e climáticos. A vegetação de savana, abrangendo Caatinga, Cerrado e Pantanal, forma um gradiente edáfico-climático de leste a leste-oeste do Brasil. Essas savanas são ambientes complexos e heterogêneos, cujos processos que determinam a dinâmica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo nos ecossistemas ainda não estão claros. O objetivo deste trabalho foi caracterizar os aspectos da paisagem que controlam $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal e em suas zonas de transição. Foram coletados dados publicados na literatura de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em solos até 20 cm de profundidade no Brasil para identificar a relação dos isótopos com o clima. Posteriormente, foram avaliadas as variáveis que controlam a MOS no estado de Pernambuco, representando a Caatinga brasileira. Também foram verificadas as diferenças entre as porções norte e sul do Pantanal. Por fim, foram utilizadas 172 amostras de solo coletadas no escopo do presente trabalho ao longo do gradiente edáfico-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal. Para os dados publicados na literatura, foram utilizadas regressões simples e um modelo de regressão linear múltipla. Para o Pantanal, foi realizada uma análise de discriminação linear para separar grupos de diferentes regiões, bem como para dados do gradiente Caatinga-Cerrado-Pantanal, a partir do qual também foi gerado um semivariograma e uma interpolação por meio de krigagem com a distribuição do solo $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$. Os resultados mostraram que as transições entre os biomas seguem um padrão de variação em que o $\delta^{13}\text{C}$ do solo aumenta da Caatinga em direção ao Pantanal e o $\delta^{15}\text{N}$ diminui nessa mesma direção. O clima foi o principal determinante da distribuição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil, entretanto, fatores edáficos e ambientais são importantes em escalas regionais ou locais. O modelo linear com essas variáveis explica 61% da variação dos dados. No Pantanal, a vegetação tem papel fundamental na dinâmica da MOS, controlada principalmente pelos períodos de seca e inundação desses solos. Precipitação, temperatura, razão C/N e NDVI foram as variáveis mais importantes na determinação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal. Portanto, aspectos do solo na Caatinga, como razão C/N e argila, e aspectos da vegetação no Pantanal, como NDVI, são importantes reguladores da dinâmica de C e N do solo em escalas locais. Ainda assim, o clima é o principal controlador da distribuição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal.

Palavras-chave: Precipitação; temperatura; razão C/N; NDVI; argila; savanas.

Abstract

Stable isotopes of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) have been used worldwide to assess the dynamics of soil organic matter (SOM), that in turn is essential for the ecosystem functioning. SOM dynamics is conditioned by basically by edaphic and climatic factors. The Brazilian savannas-like vegetation, encompassing Caatinga, Cerrado and Pantanal, form an edaphic-climatic gradient from east to east-west of Brazil. They are complex and heterogeneous environments, of which the processes determining the dynamics of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ without soil ecosystems are not yet clear. The objective of this work was to characterize the aspects of the landscape that control $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of the soil along the Caatinga-Cerrado-Pantanal edafo-climatic gradient and in its transition zones. We gathered data published in the literature of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the soil up to 20 cm deep in Brazil to identify their relationship with the climate. Subsequently, we evaluated the variables that control SOM in the Pernambuco state, representing the Brazilian Caatinga. Were also verified the differences between the northern and southern portions of the Pantanal. Finally, we used 172 soil samples collected in the scope of the present work along the Caatinga-Cerrado-Pantanal edaphic-climatic gradient. For data published in the literature, we used simple regressions and a linear regression model. For Pantanal, we used a linear discrimination analysis to separate groups from different regions, as well as for data from the Caatinga-Cerrado-Pantanal gradient, from which we also generate a semivariogram and kriging with the distribution of soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$. Our results show smooth transitions along the transect, following a pattern of variation in which the soil $\delta^{13}\text{C}$ decrease of the Caatinga towards the Pantanal and the $\delta^{15}\text{N}$ increases in that same direction. Climate was the main driver of the distribution of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the soil in Brazil, however, edaphic and environmental factors are important at regional or local scales. The linear model with these variables explains 61% of the data variation. In the Pantanal, vegetation plays a fundamental role in the dynamics of SOM, mainly controlled by the periods of drought and flooding of these soils. Precipitation, temperature, C/N ratio and NDVI were the most important variables for determining soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values along the Caatinga-Cerrado-Pantanal edafo-climatic gradient. Therefore, aspects of the soil in the Caatinga, such as C/N ratio and clay, and aspects of vegetation in the Pantanal, such as NDVI, are important regulators of the dynamics of C and N in the soil at local scales. Even so, the climate is the main controller of the distribution of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the soil along the Caatinga-Cerrado-Pantanal edafo-climatic gradient.

Keywords: Precipitation; temperature; C/N ratio; NDVI; clay; savannas.

Sumário

Introdução Geral	11
Objetivos e estrutura	15
Coletas de solo	16
Resultados e Discussão Gerais.....	17
Conclusões	21
Considerações finais	22
Referências	23
Capítulo 1 - Efeito do clima na distribuição espacial do $\delta^{13}\text{C}$ e do $\delta^{15}\text{N}$ em solos do Brasil: Síntese e perspectivas.....	30
Capítulo 2 - Climatic controls on the soil nitrogen isotopic composition in Alisols across the physiographic regions of the Pernambuco state, northeast Brazil	64
Capítulo 3 - Understanding the carbon and nitrogen dynamics in soils of different Pantanal sub-regions, Brazil.....	91
Capítulo 4 - Variação espacial de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo ao longo de um gradiente edafo-climático no Brasil: Caatinga-Cerrado-Pantanal	110

Introdução Geral

O solo suporta a maior parte das espécies animais e vegetais existentes no planeta (Chapin, Matson e Vitousek 2011). Os solos são fundamentais para a dinâmica dos ecossistemas, já que se relacionam à litosfera, biosfera, hidrosfera e atmosfera, sendo a matéria orgânica do solo o elo central dessas relações (Lal 2013a). A formação do solo é condicionada principalmente pelo clima, em conjunto com fatores como geologia, relevo e biota potencial (Jenny 1941). Temperatura e precipitação, portanto, são fundamentais tanto para a formação do solo quanto para a dinâmica da matéria orgânica nos ecossistemas (Lal 2013a). Durante os processos que envolvem a dinâmica da matéria orgânica no solo ocorrem importantes transformações biogeoquímicas que afetam os ciclos globais de carbono (C) e do nitrogênio (N). O solo é o compartimento da paisagem com maior estoque de C, com valor estimado em 1550 Pg de C orgânico e 950 Pg de C inorgânico em 1 m de profundidade considerando toda a superfície terrestre (Lal 2013b). É também no solo que ocorre grande parte das transformações do N, sendo um compartimento fundamental para a ciclagem desse elemento, principalmente no contexto das mudanças ambientais globais (Hogberg 1997; Robinson 2001; Steffen et al. 2015).

Isótopos estáveis de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$) são capazes de resumir informações da ciclagem desses elementos (Ehleringer et al. 2002), por terem caráter integrador do funcionamento dos ecossistemas (Robinson 2001). A origem do C no solo apresenta assinatura isotópica específica que reflete o tipo de fotossíntese empregado por uma planta, já que os diferentes tipos fotossintéticos (C_3 e C_4) exercem influência distinta sobre o processo de fracionamento isotópico observado entre o substrato (CO_2 atmosférico) e o produto final (matéria orgânica vegetal). Enquanto o fracionamento das plantas C_3 varia entre -24‰ e -36‰, as do tipo C_4 varia entre -11‰ e -13‰ (Farquhar, Ehleringer e Hubick 1989). As plantas respondem à variação da precipitação e disponibilidade de água através do processo fotossintético e da respiração, que é refletido no $\delta^{13}\text{C}$ das plantas e do solo (Farquhar, Ehleringer e Hubick 1989; Ometto et al. 2006; Peri et al. 2012).

Os isótopos de nitrogênio no solo podem fornecer informações importantes sobre a ciclagem desse nutriente (Amundson et al. 2003; Martinelli et al. 1999) já que o $\delta^{15}\text{N}$ varia de acordo com as condições ambientais. Vários processos biogeoquímicos

influenciam direta ou indiretamente o $\delta^{15}\text{N}$ do solo. Esses processos incluem mineralização líquida de N, lixiviação, desnitrificação, volatilização, mas também colonização bacteriana, disponibilidade de N no solo, o tipo de fonte de N (orgânica ou inorgânica) e textura do solo (Craine et al. 2015a; Robinson 2001). A razão C/N e as taxas de mineralização do solo N influenciam a dinâmica da MOS e, conseqüentemente, o $\delta^{15}\text{N}$ nos solos. As taxas de transformação de N do solo e as perdas de N na atmosfera, em última análise, regularão a disponibilidade de N em um ecossistema e o $\delta^{15}\text{N}$ no sistema solo-planta (Craine et al. 2015b). Maiores taxas de mineralização e decomposição de N aumentam as perdas do N mais leve (^{14}N) do solo, o que deixa o solo enriquecido com o N mais pesado (^{15}N), aumentando os valores do $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Robinson 2001).

Todos os processos de fracionamento de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo são primariamente controlados pelo clima. A temperatura e a disponibilidade de água são atributos que influenciam a preferência evolutiva das plantas à assimilação do C via C_3 ou C_4 (Ometto et al. 2006). Maior disponibilidade de água significa que os estômatos podem ficar abertos por mais tempo, o que diminui os valores de $\delta^{13}\text{C}$. A maior incidência de luz por sua vez, os estômatos tendem ficar mais fechados e aumentar os valores de $\delta^{13}\text{C}$ na vegetação e, conseqüentemente, no solo (Ehleringer et al. 2000). Luo et al. (2009) realizaram um estudo que compilou dados de precipitação e temperatura em 107 áreas dos principais biomas do planeta. Nesse estudo, o $\delta^{13}\text{C}$ foliar apresentou uma relação negativa com precipitação e temperatura. Quando Luo et al. (2009) consideraram apenas a relação entre $\delta^{13}\text{C}$ foliar e precipitação, encontraram uma relação ainda mais forte. Ehleringer et al. (2000) observaram que o $\delta^{13}\text{C}$ da MOS em florestas cresce com o aumento da latitude, ao passo que os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em áreas cobertas por gramíneas diminuem. Em revisão global, Rao et al. (2017) encontraram uma relação entre $\delta^{13}\text{C}$ e temperatura. Entretanto, essa relação é negativa onde o solo possui valores menores que -24‰ e positiva onde os valores são maiores que -24‰. Deste modo, o $\delta^{13}\text{C}$ das plantas e, conseqüentemente, do solo é influenciado pelo clima (Peterson e Fry 1987).

A fonte dominante de N para o crescimento da vegetação, por exemplo, muda com os padrões de precipitação em florestas tropicais. O nitrato predomina como fonte nos locais mais secos e o amônio nos locais mais úmidos (Houlton et al. 2007), entretanto essa razão pode ser diferente em determinados ambientes. Templer et al. (2012) realizaram uma meta-análise para quantificar quanto os ecossistemas naturais

conseguem reter o ^{15}N enriquecido depositado e mostraram que a aplicação de N reduz a capacidade de retenção do sistema solo-planta e aumenta suas perdas para a atmosfera. Por conta dessas relações com a vegetação e com outros fatores, o clima proporciona condições diferentes de mineralização e decomposição em cada ambiente (Aranibar et al. 2008b). Essas diferenças também são mostradas em escala global por Amundson et al. (2003) e Craine et al. (2015a), que encontraram relação negativa do $\delta^{15}\text{N}$ do solo com a precipitação e relação positiva com a temperatura baseadas em modelos matemáticos gerados com dados da literatura. Dessa forma, entende-se que o $\delta^{15}\text{N}$ do solo varia de acordo com diversos fatores, tendo o clima como principal fator em escala global.

Os estudos realizados em escala global, entretanto, podem mascarar padrões espaciais regionais, que expressam relações não lineares entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e variáveis ambientais (Sena-Souza et al. 2020). Isso porque em escalas regionais ou locais, outros fatores ambientais podem ser ainda mais determinantes que o clima para os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo. Esses fatores podem ser biológicos, sendo relacionados à fisiologia das plantas que depositam o material no solo ou à associações com outros organismos acima e abaixo do solo ou tipos de vegetação dominante (Craine et al. 2015a; Hobbie e Ouimette 2009; Ometto et al. 2006). Eles também podem ser fatores físicos e químicos do solo nas mais diversas escalas, como material de origem e relevo (Weintraub et al. 2015), concentração de carbono e teor de argila no solo (Conen et al. 2008; Craine et al. 2015a), mineralogia do solo (Singh et al. 2017); ou razão C/N e o pH do solo (Aranibar et al. 2004; Osborne et al. 2016; Wang et al. 2014).

No Brasil, diversos estudos buscam entender melhor a dinâmica desses elementos no solo, através do $\delta^{13}\text{C}$ e do $\delta^{15}\text{N}$ em diferentes escalas, como na Amazônia (Nardoto et al. 2008; Ometto et al. 2006), no Pantanal (Nascimento et al. 2013; Victoria et al. 1995), no Cerrado (Parron, Bustamante e Camargo 2004; Silva et al. 2010) e na Caatinga (Freitas et al. 2010; 2015; Mendonça et al. 2010). A grande diversidade de características ambientais resulta em diferentes dinâmicas da matéria orgânica nos ecossistemas. Parron et al. (2004) encontraram $\delta^{13}\text{C}$ maior em uma Mata de Galeria seca em comparação com uma mata úmida de áreas florestais de Cerrado, tanto nas folhas quanto no solo. O $\delta^{13}\text{C}$ de folhas em três diferentes áreas na Amazônia com precipitação média anual similar variou em função da sazonalidade (Ometto et al. 2006). Os resultados encontrados por Powell et al. (2012) indicam que regiões mais secas possuem

valores isotópicos mais relacionados ao ciclo C₄ enquanto áreas mais úmidas tendem a ser mais próximas ao ciclo C₃, entretanto, alertam que as áreas de savana no Brasil necessitam de mais estudos devido à complexidade de mapear um ambiente tão heterogêneo.

Em solos da Caatinga, os resultados de Freitas et al. (2015) sugerem que as mesmas espécies de plantas, leguminosas ou não-leguminosas, apresentam valores distintos de $\delta^{15}\text{N}$ dependendo da média de precipitação no semiárido brasileiro e encontram uma relação negativa entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a precipitação média anual. Esse padrão também foi encontrado por Santos et al. (em preparação) no estado de Pernambuco, onde o regime de chuvas concentrado em um curto período de tempo, aliado às condições de pH e razão C/N aumentam os valores de $\delta^{15}\text{N}$ nos solos das áreas mais secas. Na Amazônia brasileira, o gradiente de precipitação influencia o valor do $\delta^{15}\text{N}$ foliar e o valor de $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Nardoto et al. 2008; 2014; Sena-Souza et al. 2020). O Cerrado é um ambiente limitado em nitrogênio, com elevada razão C/N e concentração de NH_4^+ no solo, e baixas taxas de mineralização (Nardoto e Bustamante 2003) e, conseqüentemente, menores valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Sena-Souza et al. 2020). Já o Pantanal possui uma dinâmica própria de alagamento do solo, de acordo com as estações de seca e chuva, o que condiciona a dinâmica da MOS (Cardoso et al. 2016). No período seco, os processos de nitrificação e desnitrificação aumentam no Pantanal. No entanto, a quantidade de ar presente no solo diminui no período de chuva, inibindo as atividades de vários grupos de organismos presentes no solo, reduzindo os processos de decomposição e mineralização do nitrogênio (Liengaard et al. 2012). Isso resulta em valores intermediários de $\delta^{15}\text{N}$ em solos pantanosos (ver capítulo 3).

As savanas brasileiras, englobando Pantanal e Cerrado, formam um gradiente climático de leste a oeste do Brasil. Eles são ambientes complexos e heterogêneos, por isso é necessário considerar suas peculiaridades. Embora alguns estudos já citados apresentem valores de $\delta^{13}\text{C}$ e de $\delta^{15}\text{N}$ nessas áreas, ainda não estão claros quais os processos determinantes da dinâmica desses elementos em cada ecossistema, tampouco se existe um padrão entre eles. Além disso, os modelos para $\delta^{13}\text{C}$ (Powell, Yoo e Still 2012) e $\delta^{15}\text{N}$ (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015a) trazem grandes incertezas justamente nessas regiões.

Objetivos e estrutura

O objetivo desta tese foi investigar a relação entre os fatores edafo-climáticos e os isótopos estáveis de carbono e nitrogênio no solo ao longo do gradiente Caatinga-Cerrado-Pantanal. Para isso, a tese foi dividida em quatro capítulos.

O primeiro capítulo é uma revisão bibliográfica que relaciona os valores de isótopos estáveis de carbono e nitrogênio no solo no Brasil com dados de temperatura e precipitação. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sistemática, pela qual foram compilados valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ até 20cm de profundidade em solos no Brasil. Foi realizada uma análise de distribuição dos termos mais citados para entender o contexto e as tendências temporais dos estudos que utilizam $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil. Foram feitas regressões entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ com temperatura e precipitação abrangendo todo o território brasileiro.

No segundo capítulo foi avaliada a variação $\delta^{15}\text{N}$ do solo em Argissolos ao longo de um gradiente climático que passa por três regiões fisiográficas no nordeste do Brasil: Zona da Mata (úmida, chuvas bem distribuídas ao longo do ano), Agreste (sub-úmida, chuvas concentradas em 5-7 meses) e Sertão (semi-árido, chuvas em eventos de alta intensidade, concentradas em 3-5 meses). As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm de profundidade e analisadas quanto às características físicas e químicas, incluindo o $\delta^{15}\text{N}$ do solo. Um modelo linear com variáveis físicas, químicas e climáticas foi gerado para explicar a distribuição espacial $\delta^{15}\text{N}$ do solo.

O terceiro capítulo teve como objetivo identificar padrões na dinâmica do carbono e do nitrogênio nas porções norte e sul do Pantanal, através dos isótopos estáveis no solo e das relações com variáveis físicas, químicas e ambientais. Essa área de estudo compreende as sub-regiões do Abobral, Aquidauana e Nhecolândia (porção sul); Poconé e Cerrado - área de transição entre o Pantanal e o Cerrado (porção norte). As coletas de solo também foram realizadas de 0 a 20cm de profundidade. Foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) e uma análise discriminante linear (LDA) para verificar o padrão de distribuição de dados e as variáveis mais relacionadas a cada sub-região e as possíveis diferenças entre as porções norte e sul do Pantanal.

No quarto capítulo, o objetivo foi caracterizar os aspectos da paisagem que controlam $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal e em suas zonas de transição. Foram coletadas 172 amostras de solo de 0-20cm

de profundidade ao longo do gradiente. Foi realizada uma krigagem para visualizar a distribuição dos dados de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo, baseado em semivariogramas dessas variáveis. De acordo com a distribuição espacial dos dados, eles foram divididos utilizando os limites dos biomas e as subdivisões de ecorregiões existentes dentro de cada bioma. Variáveis edáficas coletadas em campo e variáveis climáticas adquiridas em bases de dados foram utilizadas em três LDAs: a primeira utilizando somente variáveis edáficas; a segunda utilizando somente variáveis climáticas e de vegetação; e a terceira utilizando todas as variáveis. As variáveis respostas para ambos os modelos foram as ecorregiões.

Coletas de solo

Os capítulos 2, 3 e 4 contaram com coletas de solo em campo padronizadas (Fig. 0.1). As coletas de solo foram realizadas em áreas de vegetação nativa, selecionados através da análise de diferentes aspectos da paisagem. Foram consideradas vegetação, grupos geológicos e geomorfológicos, no intuito de obter uma amostragem que contemple o maior número possível de ambientes ao longo do gradiente. Os grupos geológicos utilizados possuem seus limites disponibilizados gratuitamente através do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), que possui informações de todo território nacional. Da mesma forma as informações geomorfológicas são disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para classificar as formas de terreno será utilizado o método desenvolvido por Vasconcelos (2016), que utiliza uma classificação por árvore de decisão de Wood (1996) das componentes relativas à declividade e uma classificação espectral pelo método Spectral Angle Mapper (SAM) das assinaturas geomorfométricas formadas pelos atributos relativos às curvaturas do terreno. As componentes da declividade, utilizadas como primeira derivada, permitem compartimentar as maiores feições geomorfológicas. Enquanto as curvaturas, por consistirem na segunda derivada do terreno, são mais sensíveis às variações sendo adequadas para detectar subclasses dentro das áreas identificadas na primeira etapa. Portanto, é possível se obter uma classificação hierárquica considerando as distintas características dos atributos de terreno.



Fig. 0.1: Fotos de coletas de solo nas campanhas de campo.

Esses dados foram gerados ou baixados antes de cada campanha de campo. Eles foram sobrepostos em mapas e utilizados para escolha dos pontos em navegação em tempo real. Essa navegação foi realizada conectando o GPS ao computador com os mapas. A cada novo aspecto da paisagem considerando vegetação, geologia, geomorfologia ou forma de terreno, era coletado um ou mais pontos, desde que houvesse uma faixa contínua de vegetação natural naquela região.

Resultados e Discussão Gerais

No Capítulo 1 foi identificado que estudos com $\delta^{13}\text{C}$ estão mais relacionados às mudanças de uso da terra, estoque de carbono e paleoecologia, enquanto os estudos com $\delta^{15}\text{N}$ no solo servem como base para determinar dieta de animais e cadeias tróficas, atributos funcionais e funcionamento dos ecossistemas. O $\delta^{13}\text{C}$ do solo apresentou relação negativa e o $\delta^{15}\text{N}$ apresentou relação positiva com a temperatura do ar. Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo aumentam à medida que o N passa pelos processos de mineralização ou decomposição. Ambos os processos ocorrem com maior intensidade em locais com temperaturas mais elevadas (Martinelli et al. 1999), o que explica essa relação positiva entre $\delta^{15}\text{N}$ e MAT. Por outro lado, a ausência de relação com MAP difere dos padrões globais encontrados até então (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015a). A disponibilidade de água também é um fator essencial para que esses processos ocorram (Ometto et al. 2006). Essa ausência de relação com a precipitação pode ser explicada pelo acréscimo de pontos amostrais em ecossistemas estratégicos para entender esse padrão, como o Cerrado e a Caatinga. O Brasil possui uma alta

variabilidade de ecossistemas associados à diferentes regimes de precipitação. A maior quantidade de amostras de $\delta^{15}\text{N}$ do solo em diferentes regiões do Brasil pode revelar relações regionais não-lineares com a precipitação e outras variáveis ambientais (Sena-Souza et al. 2020). Os modelos lineares de $\delta^{13}\text{C}$ ($R^2 = 0,53$) e de $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0,48$) foram significativos. A razão C/N do solo tem relação positiva com o $\delta^{13}\text{C}$ e negativa com o $\delta^{15}\text{N}$. Concentração de carbono e precipitação influenciaram negativamente os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, respectivamente. Isso demonstra a importância da disponibilidade dos nutrientes, da qualidade da matéria orgânica depositada no solo e das condições ambientais no controle dos processos de fotossíntese e decomposição. Além disso, a limitação do ambiente por nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica são essenciais para a ciclagem do nitrogênio (Bustamante et al. 2004), especialmente em escalas regionais e locais, onde esse fator é mais importante que os fatores climáticos (Osborne et al. 2016). Embora o clima tenha se mostrado importante, outros fatores ambientais contribuem para os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil, principalmente a razão C/N do solo.

Os resultados do capítulo 1 sugerem que existem relações específicas entre as variáveis ambientais e climáticas e a MOS em escalas regionais e locais. Por isso, no capítulo 2, foi gerado um modelo linear a fim de entender a dinâmica de nitrogênio no solo ao longo de um gradiente climático no estado de Pernambuco, Caatinga. De acordo com o modelo empregado, as variáveis preditoras mais importantes para a dinâmica de nitrogênio no solo na Caatinga brasileira são: pH, teor de argila, temperatura média, precipitação média e potencial de evapotranspiração. O $\delta^{15}\text{N}$ do solo foi positivamente relacionado ao teor de argila e negativamente relacionado ao pH, temperatura, precipitação e evapotranspiração, expressando diferenças na dinâmica do nitrogênio ao longo do gradiente climático. Nossos resultados mostram um padrão crescente de leste a oeste, seguindo um padrão consistente com o regime climático e as regiões fisiográficas do estado. Solos de áreas mais secas podem perder mais N por volatilização, o que fornece alto fracionamento e aumenta os valores de $\delta^{15}\text{N}$ (Houlton, Marklein e Bai 2015; Wang et al. 2014). Porém, para que isso ocorra é necessário que o pH do solo seja maior que 7.0. No presente estudo, os valores de pH em regiões semi-áridas chegam até 6,5 e o pH foi negativamente relacionado ao $\delta^{15}\text{N}$ do solo. Portanto, as perdas de N por volatilização nessas regiões não são a única razão para o $\delta^{15}\text{N}$ ser maior nas áreas secas. Alguns Neossolos sob vegetação nativa da Caatinga emitem em média $0,23 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

de N₂O com base em coletas realizadas entre os anos de 2013 e 2014 (Ribeiro et al. 2016). Embora essa emissão seja pontual em tempo e limitado a um tipo de solo, ela indica, ela indica que há perdas de N nessas regiões por meio da atividade biológica, aumentando o $\delta^{15}\text{N}$ do solo (Wang et al. 2014). Diversos estudos indicam que maiores concentrações de argila no solo estabilizam a matéria orgânica e contribuem no aumento dos valores de $\delta^{15}\text{N}$ (Conen et al. 2008; Craine et al. 2015a). Além disso, na região semi-árida (Sertão), a precipitação é caracterizada por eventos de alta intensidade concentrados em um curto período em áreas com alto potencial de evapotranspiração. Essas características, combinadas ao pH do solo entre 5,0 e 6,5, fornecem condições adequadas para as transformações de nitrogênio e causa maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo na região semi-árida (Fig. 0.2).

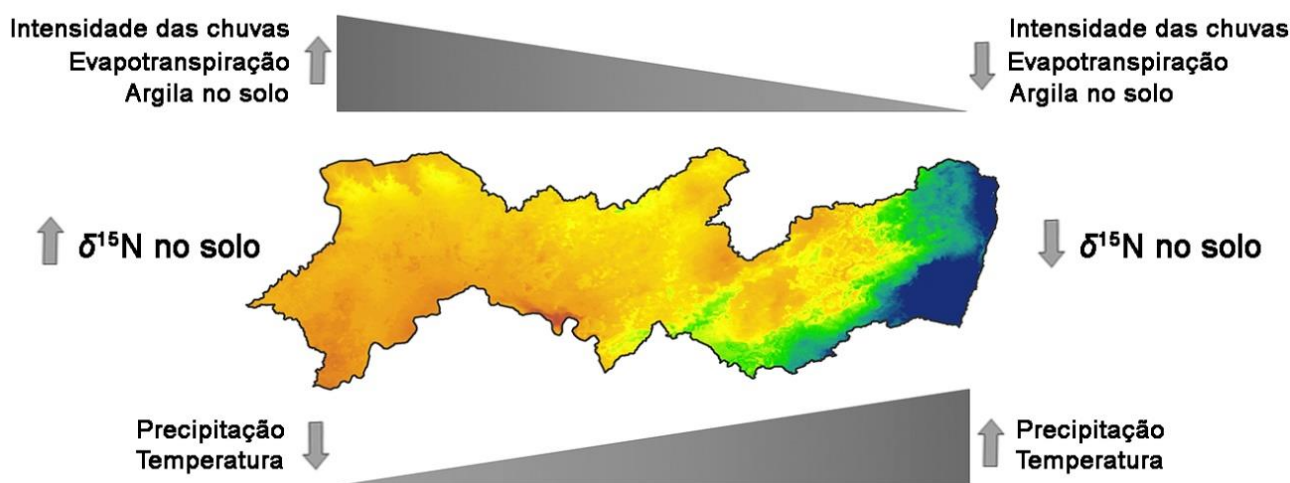


Fig. 0.2: Distribuição espacial de $\delta^{15}\text{N}$ no solo até 20cm de profundidade ao longo de um gradiente climático no estado do Pernambuco, Brasil. Setas indicam maiores ou menores valores das variáveis utilizadas no estudo com efeito significativo nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo ($p < 0,05$).

Assim como no capítulo 2 para a Caatinga, o objetivo do capítulo 3 foi compreender melhor a dinâmica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no Pantanal. Foi encontrada uma diferença na dinâmica da MOS entre as porções norte e sul do Pantanal. Os atributos físicos, químicos e nutricionais presentes nos solos das sub-regiões Cerrado e Poconé, ao norte, são diferentes dos solos das sub-regiões da porção sul do Pantanal (Abobral, Aquidauana e Nhecolândia). A porção norte tem valores de solo mais baixos $\delta^{13}\text{C}$ que a porção sul: -26‰ e -22‰, respectivamente. O $\delta^{15}\text{N}$ do solo não apresentou diferenças

entre as sub-regiões, mas apresentou grande variabilidade dentro de cada sub-região. Temperatura (MAT), precipitação (MAP) e índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) são os principais fatores discriminantes das sub-regiões do Pantanal. Essas variáveis estão relacionados à dinâmica de inundação do solo (Lienggaard et al. 2011; Nascimento et al. 2015) e ao processo de fotossíntese e vegetação estrutura de cada sub-região (Miranda et al. 2018). Usando os valores de NDVI, Miranda et al. (2018) concluíram que Poconé e Aquidauana estão entre as sub-regiões mais complexas do Pantanal. Os resultados da análise discriminante mostram que as sub-regiões de Poconé e Aquidauana foram as que mais se destacaram das demais, desconsiderando a sub-região do Cerrado. Isso reforça a diferença de funcionamento em cada ecossistema. As pequenas diferenças de MAP e MAT entre as sub-regiões são suficientes para influenciar o comportamento fisiológico da vegetação, que possui espécies adaptadas à sazonalidade hidrológica do Pantanal (Dalmagro et al. 2016). Esses fatores, combinados com a dinâmica hidrológica sazonal, determinam a estrutura e a fisiologia da vegetação, que parece ser o motor da dinâmica da MOS no Pantanal.

No capítulo 4, a análise discriminante usando apenas fatores edáficos apresentou uma explicação de 51,2% da separação das ecorregiões, enquanto com fatores climáticos explicou 86,6% e com todas as variáveis juntas, a explicação foi de 87,2%. Variáveis climáticas possuem maior poder de explicação na separação dos grupos, pois influenciam direta ou indiretamente as variáveis ambientais (Craine et al. 2015a; Osborne et al. 2017), enquanto as variáveis edáficas conseguem distinguir as ecorregiões Agreste/Sertão, Planalto Central e Pantanal. Os resultados um padrão de variação em que o $\delta^{13}\text{C}$ do solo aumenta da Caatinga em direção ao Pantanal e o $\delta^{15}\text{N}$ diminui nessa mesma direção (Fig. 0.3). Os solos de Caatinga e Pantanal apresentaram funcionamentos distintos, enquanto as áreas do Cerrado apresentaram alta variabilidade na dinâmica da MOS, com algumas ecorregiões mais similares ao Pantanal e outras à Caatinga. As variáveis edáficas são importantes principalmente em escalas locais (Osborne et al. 2016), mas os fatores climáticos controlam a distribuição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente Caatinga-Cerrado-Pantanal. Esse padrão parece acompanhar os limites das ecorregiões da Caatinga e do Cerrado (IBGE 2017; Sano et al. 2019), que são delimitados por aspectos fisiográficos de cada região.

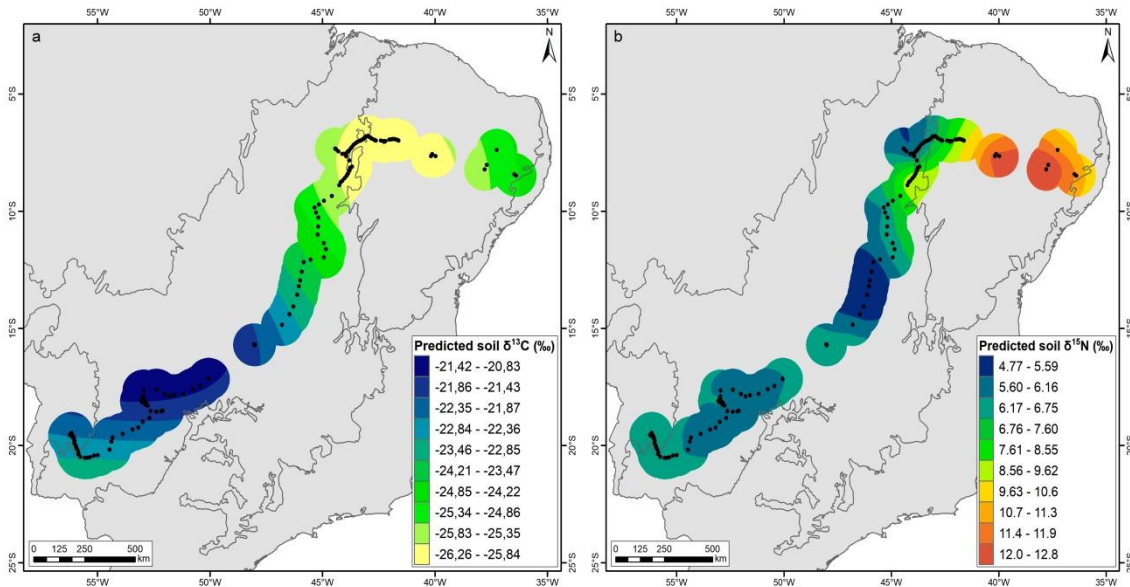


Fig. 0.3: Distribuição espacial de $\delta^{13}\text{C}$ (a) e $\delta^{15}\text{N}$ (b) do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal, gerados através de krigagem com buffer de 100 km e isotropia.

Conclusões

O uso do $\delta^{13}\text{C}$ do solo em trabalhos científicos no Brasil está relacionado ao estoque de carbono e mudanças no uso da terra, enquanto o $\delta^{15}\text{N}$ está relacionado a dinâmica desse nutriente no ambiente e ao longo da cadeia trófica. Nos últimos anos o foco das pesquisas está nos atributos funcionais das espécies e no funcionamento dos ecossistemas, além de estoque de carbono no solo. Todos esses fatores estão vinculados às mudanças ambientais globais, o que fortalece a importância dos estudos com $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo para o funcionamento dos ecossistemas.

O clima é o principal controlador da distribuição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil, tanto utilizando dados publicados na literatura em todo o país, quanto usando dados coletados ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal. As relações encontradas entre o clima e os isótopos estáveis se diferem de acordo com os biomas e as ecorregiões, mostrando que a MOS se comporta de maneira específica para cada local. Temperatura e precipitação foram as variáveis mais significativas para os padrões de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ encontrados, mas outros fatores contribuem para a formação desses valores, principalmente em escalas locais e regionais.

Os eventos de chuva na região mais seca da Caatinga (Sertão) são concentrados num curto período do ano. Com um elevado potencial de evapotranspiração, baixa razão C/N e um pH do solo entre 5,0 e 6,5, os solos dessas áreas possuem condições adequadas para elevadas taxas de mineralização e decomposição da MOS no período de chuva, aumentando os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo. Além disso, essas áreas possuem maior teor de argila, que contribui para a estabilização dessa MOS. Sendo assim, além do clima, esses fatores ambientais contribuem para a distribuição do $\delta^{15}\text{N}$ nos solos da Caatinga. No Pantanal também existe uma variação no comportamento da MOS de acordo com as sub-regiões. Temperatura, precipitação e NDVI são os fatores mais significativos para a separação dessas sub-regiões. Isso indica que a vegetação tem um papel fundamental no comportamento dos solos do Pantanal, controlado principalmente pelos períodos de seca e inundação desses solos, corroborado pela diferença dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ nas sub-regiões.

O Cerrado apresentou grande variabilidade na distribuição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo. A discriminação das ecorregiões indica que a porção nordeste do Cerrado se assemelha às áreas da Caatinga, enquanto a região central e sudoeste do Cerrado são mais similares ao Pantanal. De maneira geral, precipitação, temperatura, razão C/N e NDVI foram as variáveis mais significativas para a determinação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal. Esses resultados indicam que o clima e os processos de fotossíntese e decomposição são fundamentais para o entendimento da dinâmica de C e N ao longo desse gradiente.

Considerações finais

Existe uma alta variabilidade no bioma Cerrado e em suas transições com Caatinga e Pantanal. Embora existam outros trabalhos com isótopos estáveis de C e N nesse bioma, é fundamental uma maior investigação da dinâmica da MOS com foco principalmente nessas zonas de transição com outros biomas. Esses estudos devem considerar fatores físicos, químicos e biológicos em diferentes escalas (ex. geologia, relevo, vegetação, textura do solo, pH e a própria MOS) para abranger a complexidade da dinâmica da matéria orgânica nesses ecossistemas.

O presente estudo pode servir como base para identificação de padrões espaciais de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil. Além de contribuir na compreensão da dinâmica da matéria orgânica no solo ao longo do gradiente edafo-climático estudado, nossos resultados são importantes para melhor entender as relações das variáveis climáticas e ambientais em cada região. Num contexto de mudanças climáticas, mudanças no uso da terra e eventos intensos de secas e chuvas, nosso trabalho pode contribuir para direcionar esforços em novos estudos e na gestão de áreas nativas e antropizadas. Além disso, o levantamento de uma base de dados robusta feito aqui pode contribuir para novas pesquisas nos mais diferentes campos da ciência.

Referências

Amundson, R G, A T Austin, E A G Schuur, K Yoo, V Matzek, C Kendall, A Uebersax, D Brenner, and W T Baisden. 2003. "Global Patterns of the Isotopic Composition of Soil and Plant Nitrogen." *Global Biogeochemical Cycles* 17 (1): 10. <https://doi.org/10.1029/2002GB001903>.

Aranibar, J N, I C Anderson, H E Epstein, C J W Feral, R J Swap, J Ramontsho, and S A Macko. 2008. "Nitrogen Isotope Composition of Soils, C3 and C4 plants along Land Use Gradients in Southern Africa." *Journal of Arid Environments* 72 (4): 326–37. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.007>.

Aranibar, J N, L Otter, S A Macko, C J W Feral, H E Epstein, P R Dowty, F Eckardt, H H Shugart, and R J Swap. 2004. "Nitrogen Cycling in the Soil-Plant System along a Precipitation Gradient in the Kalahari Sands." *Global Change Biology*, 259–373. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2003.00698.x>.

Bustamante, M M C, L A Martinelli, D A Silva, P B Camargo, C A Klink, T F Domingues, and R V Santos. 2004. " ^{15}N Natural Abundance in Woody Plants and Soils of Central Brazilian Savannas (Cerrado)." *Ecological Applications* 14 (4 SUPPL.). <https://doi.org/10.1890/01-6013>.

Cardoso, E L, S A Santos, C Urbanetz, A Carvalho Filho, U J Naime, M L N Silva, and N Curi. 2016. "Relação Entre Solos e Unidades Da Paisagem No Ecossistema Pantanal." *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51 (9): 1231–40. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900023>.

Chapin, F S, P A Matson, P Vitousek. 2011. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer s.

Conen, F, M Zimmermann, J Leifeld, B Seth, and C Alewell. 2008. “Relative Stability of Soil Carbon Revealed by Shifts in $\delta^{15}\text{N}$ and C : N Ratio.” *Biogeosciences* 5: 123–28.

Craine, J M, E N J Brookshire, M D Cramer, N J Hasselquist, K Koba, E Marin-Spiotta, and L Wang. 2015b. “Ecological Interpretations of Nitrogen Isotope Ratios of Terrestrial Plants and Soils.” *Plant and Soil* 396 (1–2): 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2542-1>.

Craine, J M, A J Elmore, L Wang, L Augusto, W T Baisden, E N J Brookshire, M D Cramer, N J Hasselquist, E A Hobbie, A Kahmen, et al. 2015a. “Convergence of Soil Nitrogen Isotopes across Global Climate Gradients.” *Scientific Reports* 5: 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep08280>.

Dalmagro, H J, M J Lathuillière, G L Vourlitis, R C Campos, O B Pinto, M S Johnson, C E R Ortíz, F A Lobo, and E G Couto. 2016. “Physiological Responses to Extreme Hydrological Events in the Pantanal Wetland: Heterogeneity of a Plant Community Containing Super-Dominant Species.” *Journal of Vegetation Science* 27 (3): 568–77. <https://doi.org/10.1111/jvs.12379>.

Ehleringer, J R, D R Bowling, L B Flanagan, J Fessenden, B Helliker, L A Martinelli, and J P Ometto. 2002. “Stable Isotopes and Carbon Cycle Processes in Forests and Grasslands.” *Plant Biology* 4: 181–89.

Ehleringer, J R, N Buchmann, and L B Flanagan. 2000. “Carbon Isotope Ratios in Belowground Carbon Cycle Processes.” *Ecological Applications* 10 (2): 412–422. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0412:CIRIBC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0412:CIRIBC]2.0.CO;2).

Farquhar, G D, J R Ehleringer, and K T Hubick. 1989. “Carbon Isotope Discrimination and Photosynthesis.” *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40 (1): 503–37. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.40.060189.002443>.

Freitas, A D S, E V Sampaio, A P S Ramos, M R V Barbosa, R P Lyra, and E L Araújo. 2015. “Nitrogen Isotopic Patterns in Tropical Forests along a Rainfall Gradient in Northeast Brazil.” *Plant and Soil* 391 (1–2): 109–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2417-5>.

- Freitas, A D S, E V S B Sampaio, R S C Menezes, and H Tiessen. 2010. "15N Natural Abundance of Non-Fixing Woody Species in the Brazilian Dry Forest (Caatinga)." *Isotopes in Environmental and Health Studies* 46 (2): 210–18. <https://doi.org/10.1080/10256016.2010.488805>.
- Hobbie, E A, and A P Ouimette. 2009. "Controls of Nitrogen Isotope Patterns in Soil Profiles." *Biogeochemistry* 95 (2): 355–71. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9328-6>.
- Hogberg, P. 1997. "15N Natural Abundance in Soil-Plant Systems." *New Phytologist* 137: 179–203. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00808.x>.
- Houlton, B Z, D M Sigman, E A G Schuur, and L O Hedin. 2007. "A Climate-Driven Switch in Plant Nitrogen Acquisition within Tropical Forest Communities." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (21): 8902–6. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0609935104>.
- Houlton, B Z, A R Marklein, and E Bai. 2015. "Representation of Nitrogen in Climate Change Forecasts." *Nature Climate Change* 5 (5): 398–401. <https://doi.org/10.1038/nclimate2538>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2017. Divisão Regional Do Brasil Em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. https://www.ibge.gov.br/apps/regioes_geograficas/.
- Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation A System of Quantitative Pedology*. Edited by Ronald Amundson. New York.
- Lal, R. 2013a. "Intensive Agriculture and the Soil Carbon Pool." *Journal of Crop Improvement* 27 (September): 735–52. <https://doi.org/10.1080/15427528.2013.845053>.
- . 2013b. "Soil Carbon Management and Climate Change." *Carbon Management* 4 (September): 439–62. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.31>.
- Liengaard, L, L P Nielsen, N P Revsbech, B Elberling, A Priemé, A E Prast, and M Kühl. 2011. "Effects of Flooding Cycles in the Pantanal on the Turnover of Soil Nitrogen Pools and Emission of N₂O." *Biogeosciences Discussions* 8 (3): 5991–6030. <https://doi.org/10.5194/bgd-8-5991-2011>.

Lienggaard, L, L P Nielsen, N P Revsbech, A Priemé, B Elberling, A Enrich-Prast, and M Köhl. 2012. “Extreme Emission of N₂O from Tropical Wetland Soil (Pantanal, South America).” *Frontiers in Microbiology* 3 (JAN): 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00433>.

Luo, T, L Zhang, H Zhu, C Daly, M Li, and J Luo. 2009. “Correlations between Net Primary Productivity and Foliar Carbon Isotope Ratio across a Tibetan Ecosystem Transect.” *Ecography* 32 (3): 526–38. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05735.x>.

Martinelli, L A, M C Piccolo, A R Townsend, P M Vitousek, E Cuevas, W McDowell, G P Robertson, O C Santos, and K Treseder. 1999. “Nitrogen Stable Isotopic Composition of Leaves and Soil: Tropical versus Temperate Forests.” *Biogeochemistry* 46 (1–3): 45–65. <https://doi.org/10.1007/BF01007573>.

Mendonça, L, H Frischkor, M Snatiago, P B de Camargo, J O G Lima, and J Mendes Filho. 2010. “Identificação de Mudanças Florestais Por ΔC e ΔN Dos Solos Da Chapada Do Araripe. Ceará.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14 (March): 314–19. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000300012>.

Miranda, C S, R M Gamarra, C L Miotto, N M Silva, A P Conceição Filho, and A Pott. 2018. “Analysis of the Landscape Complexity and Heterogeneity of the Pantanal Wetland.” *Brazilian Journal of Biology* 78 (2): 318–27. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.08816>.

Nardoto, G B, and M M C Bustamante. 2003. “Effects of Fire on Soil Nitrogen Dynamics and Microbial Biomass in Savannas of Central Brazil.” *Pesq. Agropec. Bras.* 38 (1): 955–62.

Nardoto, G B, J P H B Ometto, J R Ehleringer, N Higuchi, M M C Bustamante, and L A Martinelli. 2008. “Understanding the Influences of Spatial Patterns on N Availability Within the Brazilian Amazon Forest.” *Ecosystems* 11 (April): 1234–46. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9189-1>.

Nardoto, G B, C A Quesada, S Patiño, G Saiz, T R Baker, M Schwarz, F Schrodte, et al. 2014. “Basin-Wide Variations in Amazon Forest Nitrogen-Cycling Characteristics as

Inferred from Plant and Soil 15N:14N Measurements.” *Plant Ecology and Diversity* 7 (1–2): 173–87. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.807524>.

Nascimento, A F, S A C Furquim, E G Couto, R M Beirigo, J C O Júnior, P B Camargo, and P V Vidal-Torrado. 2013. “Genesis of Textural Contrasts in Subsurface Soil Horizons in the Northern Pantanal - Brazil.” *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, no. 37: 1113–27.

Nascimento, A F, S A C Furquim, R C Graham, R M Beirigo, J C Oliveira Junior, E G Couto, and P Vidal-Torrado. 2015. “Pedogenesis in a Pleistocene Fluvial System of the Northern Pantanal - Brazil.” *Geoderma* 255–256: 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.025>.

Ometto, J P, J R Ehleringer, T F Domingues, J A Berry, F Y Ishida, E Mazzi, N Higuchi, L B Flanagan, G B Nardoto, and L A Martinelli. 2006. “The Stable Carbon and Nitrogen Isotopic Composition of Vegetation in Tropical Forests of the Amazon Basin, Brazil.” *Biogeochemistry* 79 (July): 251–74. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5517-1>.

Osborne, B B, M K Nasto, G P Asner, S Christopher, C C Cleveland, B W Sullivan, P G Taylor, A R Townsend, and S Porder. 2016. “Climate, Topography, and Canopy Chemistry Exert Hierarchical Control Over Soil N Cycling in a Neotropical Lowland Forest.” *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0095-7>.

Parron, L M, M M C Bustamante, and P B Camargo. 2004. “Composição Isotópica de Carbono e Nitrogênio Em Solos e Plantas de Uma Mata de Galeria: Efeito Do Gradiente Topográfico.” *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Cerrados* 127: 24.

Peri, P L, B Ladd, D A Pepper, S P Bonser, S W Laffan, and W Amelung. 2012. “Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and Nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) Stable Isotope Composition in Plant and Soil in Southern Patagonia’s Native Forests.” *Global Change Biology* 18 (1): 311–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02494.x>.

Peterson, B J, and B Fry. 1987. “Stable Isotopes in Ecosystem Studies.” *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 18, 293–320. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.18.110187.001453>.

- Powell, R, E H Yoo, and C J Still. 2012. "Vegetation and Soil Carbon-13 Isoscapes for South America : Integrating Remote Sensing and Ecosystem Isotope Measurements." *Ecosphere* 3 (November): 25. art109. <https://doi.org/10.1890/es12-00162.1>.
- Rao, Z, W Guo, J Cao, F Shi, H Jiang, and C Li. 2017. "Relationship between the Stable Carbon Isotopic Composition of Modern Plants and Surface Soils and Climate: A Global Review." *Earth-Science Reviews* 165 (December): 110–19. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.007>.
- Ribeiro, K, E R Sousa-Neto, J A Carvalho Junior, J R S Lima, R S C Menezes, P J Duarte-Neto, G S Guerra, and J P H B Ometto. 2016. "Land Cover Changes and Greenhouse Gas Emissions in Two Different Soil Covers in the Brazilian Caatinga." *Science of the Total Environment* 571: 1048–57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>.
- Robinson, D. 2001. "Δ15N as an Integrator of the Nitrogen." *Trends in Ecology & Evolution* 16 (3): 153–62.
- Sano, E E, A A.R, E S Martins, G M Bettiol, M M C Bustamante, A S Bezerra, A F Couto Junior, V Vasconcelos, J Schüler, and E L Bolfe. 2019. "Cerrado Ecoregions: A Spatial Framework to Assess and Prioritize Brazilian Savanna Environmental Diversity for Conservation." *Journal of Environmental Management* 232 (July 2018): 818–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>.
- Santos, F L S, V Vasconcelos, K Jesus, G Neves, A F Couto Junior, E V Sampaio, J P Ometto, R S C Menezes, and G B Nardoto. n.d. "Climatic Controls on the Soil Nitrogen Isotopic Composition across the Physiographic Regions of the Pernambuco State, Northeast Brazil." *Geoderma Regional*.
- Sena-Souza, J P, B Z Houlton, L A Martinelli, and G B Nardoto. 2020. "Reconstructing Continental-Scale Variation in Soil Δ15N: A Machine Learning Approach in South America." *Ecosphere* 11 (8). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3223>.
- Silva, A S A, R S C Menezes, O A Rosso, B Stosic, and T Stosic. 2021. "Complexity entropy-analysis of monthly rainfall time series in northeastern Brazil." *Chaos, Solitons and Fractals* 143. 110623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110623>.

- Silva, L C R, M Haridasan, L S L Sternberg, A C Franco, and W A Hoffmann. 2010. "Not All Forests Are Expanding over Central Brazilian Savannas." *Plant and Soil* 333 (1): 431–42. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0358-6>.
- Singh, M, B Sarkar, S Sarkar, J Churchman, N Bolan, S Mandal, M Menon, TJ Purakayastha, and DJ Beerling. 2017. *Stabilization of Soil Organic Carbon as Influenced by Clay Mineralogy*. Advances in Agronomy. 1st ed. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.001>.
- Steffen, W, K Richardson, J Rockström, S Cornell, I Fetzer, E Bennett, R Biggs, and S Carpenter. 2015. "Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet." *Science* (New York, N.Y.) 348 (6240): 1217. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9629>.
- Templer, P H, M C Mack, F S Chapin, L M Christenson, J E Compton, H D Crook, W S Currie, et al. 2012. "Sinks for Nitrogen Inputs in Terrestrial Ecosystems : A Meta-Analysis of 15 N Tracer Field Studies." *Ecology* 93 (June 2011): 1816–29.
- Vasconcelos, V. 2016. "Classificação e Fragmentação Das Formas de Terreno Na Análise Do Relevo Tropical." http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/22435/1/2016_ViniciusVasconcelosdeSouza.pdf.
- Victoria, R L, F Fernandes, L A Martinelli, M C Piccolo, P B Camargo, and S Trumbore. 1995. "Past Vegetation Changes in the Brazilian Pantanal Arboreal–Grassy Savanna Ecotone by Using Carbon Isotopes in the Soil Organic Matter." *Global Change Biology* 1 (3): 165–71. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00018.x>.
- Wang, C, X Wang, D Liu, H Wu, X Lu, Y Fang, and W Cheng. 2014. "Aridity Threshold in Controlling Ecosystem Nitrogen Cycling in Arid and Semi-Arid Grasslands." *Nature Communications* 5: 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms5799>.
- Weintraub, S R, P G Taylor, S Porder, C C Cleveland, G P Asner, and A R Townsend. 2015. "Topographic Controls on Soil Nitrogen Availability in a Lowland Tropical Forest." *Ecology* 96 (6): 1561–74.
- Wood, J D. 1996. "The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models." [https://doi.org/10.1016/S0065-230X\(09\)04001-9](https://doi.org/10.1016/S0065-230X(09)04001-9).

Capítulo 1 - Efeito do clima na distribuição espacial do $\delta^{13}\text{C}$ e do $\delta^{15}\text{N}$ em solos do Brasil: Síntese e perspectivas

Effect of climate on the spatial distribution of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in Brazilian soils:
Synthesis and perspectives

Fábio Luís de Souza Santos, João Paulo Sena Souza, Glauber Neves, Gabriela Bielefeld
Nardoto

Artigo submetido para a *Revista Fronteiras* em maio de 2020

Resumo

Isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) no solo fornecem informações integradas da dinâmica da matéria orgânica nos ecossistemas. O clima é um dos principais condicionantes de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo em escala global, mas essa relação não é clara para o Brasil. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi verificar como temperatura do ar e precipitação afetam o $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil e identificar as tendências existentes com base nos dados da literatura. Através de pesquisa sistemática, foram compilados valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ até 20cm de profundidade em solos no Brasil. Foi realizada uma análise de distribuição dos termos mais citados para entender o contexto e as tendências temporais dos estudos que utilizam $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil. Foram feitas regressões entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ com temperatura e precipitação abrangendo todo o território brasileiro. O pH do solo, razão C/N e concentração de carbono foram incluídas em um modelo de regressão linear. Estudos com $\delta^{13}\text{C}$ estão mais relacionados às mudanças de uso da terra, estoque de carbono e paleoecologia, enquanto os estudos com $\delta^{15}\text{N}$ no solo servem como base para determinar dieta de animais e cadeias tróficas, atributos funcionais e funcionamento dos ecossistemas. O $\delta^{13}\text{C}$ do solo apresentou relação negativa e o $\delta^{15}\text{N}$ apresentou relação positiva com a temperatura do ar. Os modelos lineares de $\delta^{13}\text{C}$ ($R^2 = 0,53$) e de $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0,48$) em função de temperatura, precipitação, pH do solo, razão C/N e concentração de carbono, foram significativos. A razão C/N do solo tem relação positiva com o $\delta^{13}\text{C}$ e negativa com o $\delta^{15}\text{N}$. Concentração de carbono e precipitação influenciaram negativamente os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, respectivamente. Embora o clima tenha se mostrado importante, outros fatores ambientais contribuem para os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil, principalmente a razão C/N do solo.

Palavras-chave: Isótopos estáveis; temperatura; precipitação; razão C/N

Abstract

Stable isotopes of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) in the soil provide integrated information on the dynamics of organic matter in ecosystems. The climate is one of the main determinants of the values of soil $\delta^{13}\text{C}$ and soil $\delta^{15}\text{N}$ on a global scale, but this relationship is not clear for Brazil. In this context, the objective of this study was to verify how air temperature and precipitation affect the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of the soil in Brazil, and to identify existing trends based on literature data. Through systematic research, values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were compiled up 20cm deep in soils in Brazil. An analysis of the distribution of the most cited terms was carried out to understand the context and temporal trends of studies using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of soil in Brazil. Regressions were made between the values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ with temperature and precipitation covering all Brazilian territory. The pH of soil, C/N ratio and carbon concentration were included in a linear regression model. Studies with $\delta^{13}\text{C}$ are more related to changes in land use, carbon stock and paleoecology, while studies with soil $\delta^{15}\text{N}$ serve as a basis for determining animal diet and food chains, functional attributes and ecosystem functioning. Soil $\delta^{13}\text{C}$ showed a negative relationship and $\delta^{15}\text{N}$ showed a positive relationship with temperature. The linear models of $\delta^{13}\text{C}$ ($R^2_{\text{adj}} = 0.53$) and $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2_{\text{adj}} = 0.48$) were significant. The C/N ratio of the soil has a positive relationship with $\delta^{13}\text{C}$ and negative with $\delta^{15}\text{N}$. Carbon concentration and precipitation negatively influenced the values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$, respectively. Although the climate has been shown to be important, other environmental factors contribute to the values of soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in Brazil, mainly the C/N ratio.

Keywords: Stable isotopes, temperature, precipitation, C/N ratio

Introdução

O solo suporta a maior parte das espécies animais e vegetais existentes no planeta (Chapin, Matson e Vitousek 2011). Os solos são fundamentais para a dinâmica dos ecossistemas, já que se relacionam à litosfera, biosfera, hidrosfera e atmosfera, sendo a MOS o elo central dessas relações (Lal 2013b). A formação do solo e a dinâmica da MOS são condicionados principalmente pelo clima, em conjunto com

fatores como tempo, geologia, relevo e biota potencial (Jenny 1941). Temperatura e precipitação, portanto, são fundamentais tanto para a formação do solo quanto para a dinâmica da matéria orgânica nos ecossistemas (Lal 2013b).

Durante os processos que envolvem a dinâmica da matéria orgânica no solo ocorrem importantes transformações biogeoquímicas que afetam os ciclos globais de carbono (C) e do nitrogênio (N). O solo é o compartimento da paisagem que mais estoca C, com valor estimado em 1550 Pg de C orgânico e 950 Pg de C inorgânico em 1 m de profundidade considerando toda a superfície terrestre (Lal 2013a). A efeito de comparação, a atmosfera possui cerca de 800 Pg e a biota cerca de 560 Pg de carbono (Lal 2013a). É também no solo que ocorre grande parte das transformações do N, sendo um compartimento fundamental para a ciclagem desse elemento, principalmente no contexto das mudanças ambientais globais (Hogberg 1997; Robinson 2001; Steffen et al. 2015).

Nesse contexto, tem aumentado os estudos que utilizam razões isotópicas de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$) da MOS para compreensão da dinâmica dos ecossistemas (Brüggemann et al. 2011). As razões isotópicas de C e N do solo são ferramentas capazes de fornecer informações do funcionamento de ecossistemas (Ehleringer et al. 2002), por ter caráter integrador, que resume o funcionamento desses elementos no sistema solo-planta-serapilheira (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015b; Powell et al. 2012; Robinson 2001).

O $\delta^{13}\text{C}$ do solo reflete o $\delta^{13}\text{C}$ da cobertura vegetal predominante. Esse valor representa a assinatura isotópica específica do tipo de caminho metabólico para a absorção do CO_2 em cada planta no processo de fotossíntese (C_3 , CAM ou C_4). A temperatura e a disponibilidade de água são atributos que influenciam a preferência evolutiva das plantas à assimilação do carbono via C_3 ou C_4 (Ometto et al. 2006). Maior disponibilidade de água significa que os estômatos podem ficar abertos por mais tempo, o que diminui os valores de $\delta^{13}\text{C}$. A maior incidência de luz por sua vez, os estômatos tendem ficar mais fechados e aumentar os valores de $\delta^{13}\text{C}$ na vegetação e, conseqüentemente, no solo. Luo et al. (2009) realizaram um estudo que compilou dados de precipitação e temperatura em 107 áreas dos principais biomas do planeta. Nesse estudo, o $\delta^{13}\text{C}$ foliar apresentou uma relação negativa com precipitação e temperatura. Quando Luo et al. (2009) consideraram apenas a relação entre $\delta^{13}\text{C}$ foliar e precipitação, encontraram uma relação ainda mais forte. Em revisão global, Rao et al. (2017)

encontraram uma relação entre $\delta^{13}\text{C}$ e temperatura. Entretanto, essa relação é negativa onde o solo possui valores menores que -24‰ e positiva onde os valores são maiores que -24‰. Deste modo, o $\delta^{13}\text{C}$ das plantas e, conseqüentemente, do solo é influenciado pelo clima (Peterson e Fry 1987).

No Brasil, Parron et al. (2004) encontraram $\delta^{13}\text{C}$ maior em uma Mata de Galeria seca em comparação com uma mata úmida de áreas florestais de Cerrado, tanto nas folhas quanto no solo. O $\delta^{13}\text{C}$ de folhas em três diferentes áreas na Amazônia com precipitação média anual similar variou em função da sazonalidade (Ometto et al. 2006). Os resultados encontrados por Powell et al. (2012) indicam que regiões mais secas possuem valores isotópicos mais relacionados ao ciclo C_4 enquanto áreas mais úmidas tendem a ser mais próximas ao ciclo C_3 , entretanto, alertam que as áreas de savana no Brasil necessitam de mais estudos devido à complexidade de mapear um ambiente tão heterogêneo, que resulta numa grande diversidade de características ambientais e diferentes dinâmicas da matéria orgânica nos ecossistemas.

O $\delta^{15}\text{N}$ integra as transformações do N no solo (Craine et al. 2015b). Os solos com maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ podem indicar maiores taxas de mineralização ou decomposição, já que cada transformação possui um índice de fracionamento, que aumenta o valor de $\delta^{15}\text{N}$ (Hogberg 1997; Robinson 2001). Em geral, esse enriquecimento de $\delta^{15}\text{N}$ ocorre em ecossistemas com menores limitações por N, pois neles existem maior disponibilidade de nitrogênio inorgânico e conseqüentemente, maiores taxas de transformação (Martinelli et al. 1999; Houlton et al. 2007; Nardoto et al. 2008). A fonte dominante de N para o crescimento da vegetação, por exemplo, muda com os padrões de precipitação em florestas tropicais. O nitrato predomina como fonte nos locais mais secos e o amônio nos locais mais úmidos (Houlton et al. 2007), entretanto essa razão pode ser diferente em determinados ambientes. Templer et al. (2012) realizaram uma meta-análise para quantificar quanto os ecossistemas naturais conseguem reter o ^{15}N enriquecido depositado e mostraram que a aplicação de nitrogênio reduz a capacidade de retenção do sistema solo-planta e aumenta suas perdas para a atmosfera. Por conta dessas relações com a vegetação e com outros fatores, o clima proporciona condições diferentes de mineralização e decomposição em cada ambiente (Aranibar et al. 2008). Essas diferenças também são mostradas em escala global por Amundson et al. (2003) e Craine et al. (2015a), que encontraram relação negativa do $\delta^{15}\text{N}$ do solo com a precipitação e relação positiva com a temperatura

baseadas em modelos matemáticos gerados com dados da literatura. Dessa forma, entende-se que o $\delta^{15}\text{N}$ do solo varia de acordo com diversos fatores, tendo o clima como principal fator em escala global.

Muitas vezes os padrões de variabilidade espacial do $\delta^{15}\text{N}$ do solo encontrados em escala global são confirmados em estudos locais e regionais. Em solos da Caatinga, os resultados de Freitas et al. (2015) sugerem que as mesmas espécies de plantas, leguminosas ou não-leguminosas, apresentam valores distintos de $\delta^{15}\text{N}$ dependendo da média de precipitação no semiárido brasileiro e encontram uma relação negativa entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a precipitação média anual. Esse padrão também foi encontrado por Santos et al. (em preparação) no estado de Pernambuco, onde o regime de chuvas concentrado em um curto período de tempo, aliado às condições de pH e razão C/N aumentam os valores de $\delta^{15}\text{N}$ nos solos das áreas mais secas. Na Amazônia brasileira, o gradiente de precipitação influencia o valor do $\delta^{15}\text{N}$ foliar e o valor de $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Nardoto et al. 2008; 2014). Entretanto, os estudos realizados em escala global podem mascarar padrões espaciais regionais, que expressam relações não lineares entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e variáveis ambientais (Sena-Souza et al. 2020).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é verificar como a temperatura e a precipitação afetam o $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil e identificar as tendências e lacunas existentes na literatura.

Material e métodos

Pesquisa bibliográfica

Foi realizada uma revisão sistemática. Foram usadas duas bases de dados on-line, Scopus e ISI Web of Science. A pesquisa de banco de dados on-line foi complementada com pesquisas no Banco de Teses e Dissertações e utilizando as referências citadas em artigos-chave. Alguns autores foram contatados eletronicamente para fornecimento de dados complementares, quando suas publicações apresentaram somente parte dos resultados ou dados derivados dos valores de nosso interesse. Publicações previamente conhecidos pelo grupo de pesquisa também foram inclusas. As buscas foram realizadas em inglês e português. A busca foi realizada no dia 08 de janeiro de 2019 e refeita em 28 de outubro de 2019, para inserção de artigos publicados

recentemente. Consideramos como biomas: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal.

A busca foi realizada usando os termos para o Brasil e para cada bioma: $\delta^{13}\text{C}$ do solo com variáveis, usando os termos: “Soil carbon” OR “Soil C” OR “carbon in soil” OR “ ^{13}C ” AND “isotopic” OR “isotope” OR “stable isotopes” AND "Brazilian" OR "Brazil" OR "Brasil" OR "Brazilian Amazonia" OR "Amazonia" OR "Brazilian Amazon" OR "Brazilian northeast" OR "Caatinga" OR "Brazilian semiarid" OR "Brazilian savanna" OR "Cerrado" OR "Brazilian Cerrado" OR "Brazilian atlantic forest" OR "Atlantic Forest" OR "Mata Atlântica" OR "Brazilian Pampa" OR "Pampa" OR "Brazilian swamp" OR "Brazilian Pantanal" OR "Pantanal" OR "Charco" OR "Pantanal Brasileiro". A mesma metodologia foi empregada para os trabalhos que relacionam o $\delta^{15}\text{N}$ “Soil nitrogen” OR “Soil N” OR “nitrogen in soil” OR “ ^{15}N ” AND “isotopic” OR “isotope” OR “stable isotopes” AND "Brazilian" OR "Brazil" OR "Brasil" OR "Brazilian Amazonia" OR "Amazonia" OR "Brazilian Amazon" OR "Brazilian northeast" OR "Caatinga" OR "Brazilian semiarid" OR "Brazilian savanna" OR "Cerrado" OR "Brazilian Cerrado" OR "Brazilian atlantic forest" OR "Atlantic Forest" OR "Mata Atlântica" OR "Brazilian Pampa" OR "Pampa" OR "Brazilian swamp" OR "Brazilian Pantanal" OR "Pantanal" OR "Charco" OR "Pantanal Brasileiro". A busca pelos termos foi feita nos resumos, palavras-chave e títulos dos estudos.

Seleção dos trabalhos e processamento de dados

Foram utilizados os seguintes critérios de inclusão para a triagem de resumo e título: estar presente os termos $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ou similares como isótopos de C ou N no solo. Foram usados os seguintes critérios de triagem para o texto completo: a) O estudo deveria conter as coordenadas geográficas dos pontos de coleta ou mapa do qual possam ser extraídas; b) Conter resultados dentro do limite geográfico do Brasil; c) Apresentar resultados de $\delta^{13}\text{C}$ ou $\delta^{15}\text{N}$ no solo ao menos entre 0 e 20 cm de profundidade; d) Apresentar resultados de $\delta^{13}\text{C}$ ou $\delta^{15}\text{N}$ em áreas naturais. Publicações que possuíam pontos dentro e fora do limite geográfico do Brasil foram mantidos, mas apenas os resultados dentro do território brasileiro foram usados. Não foram descartadas publicações que não possuem informações de temperatura e precipitação, pois esses dados podem ser obtidos em bases de dados específicas usando as coordenadas geográficas dos pontos de coleta.

Cada estudo incluído recebeu um identificador único (ID) para facilitar o rastreamento. Além dos resultados de $\delta^{13}\text{C}$ ou $\delta^{15}\text{N}$ no solo, foram extraídas as seguintes informações relatadas no texto completo e materiais complementares: primeiro autor do estudo, ano de publicação, coordenadas geográficas, bioma e fitofisionomia onde o estudo foi realizado. Também reunidos dados de percentual de C e N, razão C/N e pH do solo quando os trabalhos traziam essas informações. O software de extração de dados WebPlot Digitizer também foi usado para obter dados úteis de dados exibidos em Figs publicadas (Rohatgi 2018).

Os valores isotópicos de áreas naturais e antrópicas (agricultura, pastagem e florestas secundárias) dentro de cada bioma foram comparados com teste t ou teste de Wilcoxon, de acordo com a distribuição dos dados. Todos os biomas, exceto Amazônia, apresentaram diferenças significativas entre áreas naturais e antrópicas ($p < 0,05$). Por isso, mantivemos apenas áreas sob vegetação natural no estudo. Foram comparadas as médias e desvio padrão dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$ do solo de cada bioma através de análise de variância (ANOVA) à significância de 5%. Também foram gerados boxplots para apresentação dos valores de mediana dessas variáveis em cada bioma. As análises foram realizadas no programa R (R core team, 2019).

Todos os dados utilizados e suas respectivas referências estão disponibilizados em uma Tab. “prévia” no seguinte link do Mendeley: <https://data.mendeley.com/datasets/9ctvttjmwm/draft?a=d20c1e64-e412-4b29-90ad-2b94ec16edcd>.

Variáveis climáticas

As variáveis climáticas utilizadas neste estudo foram temperatura média anual (MAT) e precipitação média anual (MAP). Esses dados foram extraídos da plataforma WorldClim, versão 2.0 (www.worldclim.org), com uma resolução espacial de 30 segundos, onde cada pixel corresponde a uma área de aproximadamente 1 km^2 . Esses dados foram capturados por satélites em todo o mundo, durante uma série histórica de 30 anos, entre 1970 e 2000. Os dados foram compilados em médias mensais nesse período.

Foram testadas relações entre MAT e MAP com $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo por meio de regressões lineares. Essas regressões foram realizadas em duas escalas: escala do

Brasil - utilizando todo o conjunto de dados; e escala do bioma: utilizando os dados dentro do limite geográfico de cada bioma. As análises foram realizadas no programa R (R core team, 2019).

Foi gerado um modelo de regressão linear adicional com todo conjunto de dados, considerando $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo como variáveis respostas e adicionando percentual de C e N, razão C/N e pH do solo, além de MAP e MAT como variáveis preditoras. Dentre as variáveis preditoras, os percentuais de C e N apresentaram correlação entre si, por isso apenas o percentual de C foi usado nos modelos. Esses modelos consideram a interação entre as variáveis preditoras. A seleção de modelos foi realizada através do critério de Akaike no programa R (R core team, 2019).

Análises de contexto e tendências

Com os títulos e resumos de toda a busca realizada nas plataformas de pesquisa salvos em um documento de texto, foi gerada a estatística descritiva dos dados, utilizando o programa VosViewer. Essa estatística foi gerada através dos termos contidos nos títulos e nos resumos (abstracts) de todos estudos selecionados pelas bases no momento da busca, mesmo os que não atendiam aos critérios de seleção citados acima. Foram excluídos os rótulos de resumos estruturados e os direitos autorais. Foi utilizado o método de contagem total e foram excluídos os termos que se repetiam menos de 15 vezes em todo documento de texto. Também foram excluídos manualmente as preposições, artigos e unidades de medida.

A partir disso, o programa seleciona os termos mais relevantes e os separa em grupos com os termos mais associados entre si. Isso possibilita visualizar os assuntos mais retratados nas publicações e as relações entre eles. Foram separados ainda os termos por data de publicação, considerando os trabalhos publicados entre 2006 e 2018, para verificar a tendência nos assuntos retratados nas publicações em escala temporal. Os resultados são apresentados em inglês, devido à padronização dos resumos, que são escritos em inglês na maior parte dos trabalhos.

Resultados

Distribuição dos dados

Foram usados 87 trabalhos entre artigos científicos (80), teses de doutorado (2) e dissertações de mestrado (5). Destes, 74 contribuíram com dados de $\delta^{13}\text{C}$ e 42 com dados de $\delta^{15}\text{N}$ no solo até 20 cm e profundidade ao longo de todos os biomas brasileiros (Fig. 1.1). As informações de cada trabalho utilizado se encontram no material suplementar do presente estudo.

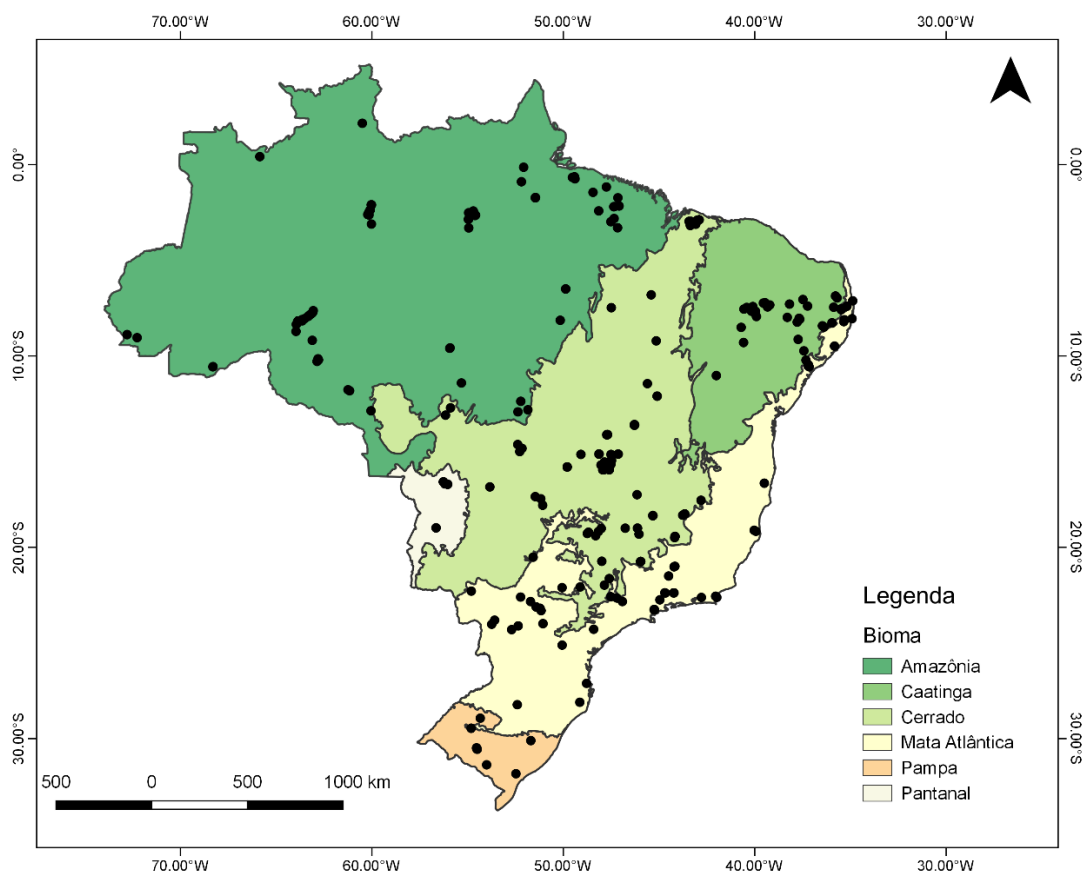


Fig. 1.1: Pontos de coleta com dados de $\delta^{13}\text{C}$ e/ou $\delta^{15}\text{N}$ no solo encontradas na literatura nos diferentes biomas brasileiros.

Linhas de pesquisa e tendências temporais

Os termos mais encontrados em títulos e resumos de trabalhos publicados que possuem dados de $\delta^{13}\text{C}$ no solo no Brasil ficaram divididos em seis grupos distintos, representados por diferentes cores (Fig. 1.2a). Os termos mais utilizados em trabalhos publicados com dados de $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil foram divididos em quatro grupos (Fig. 1.2b).

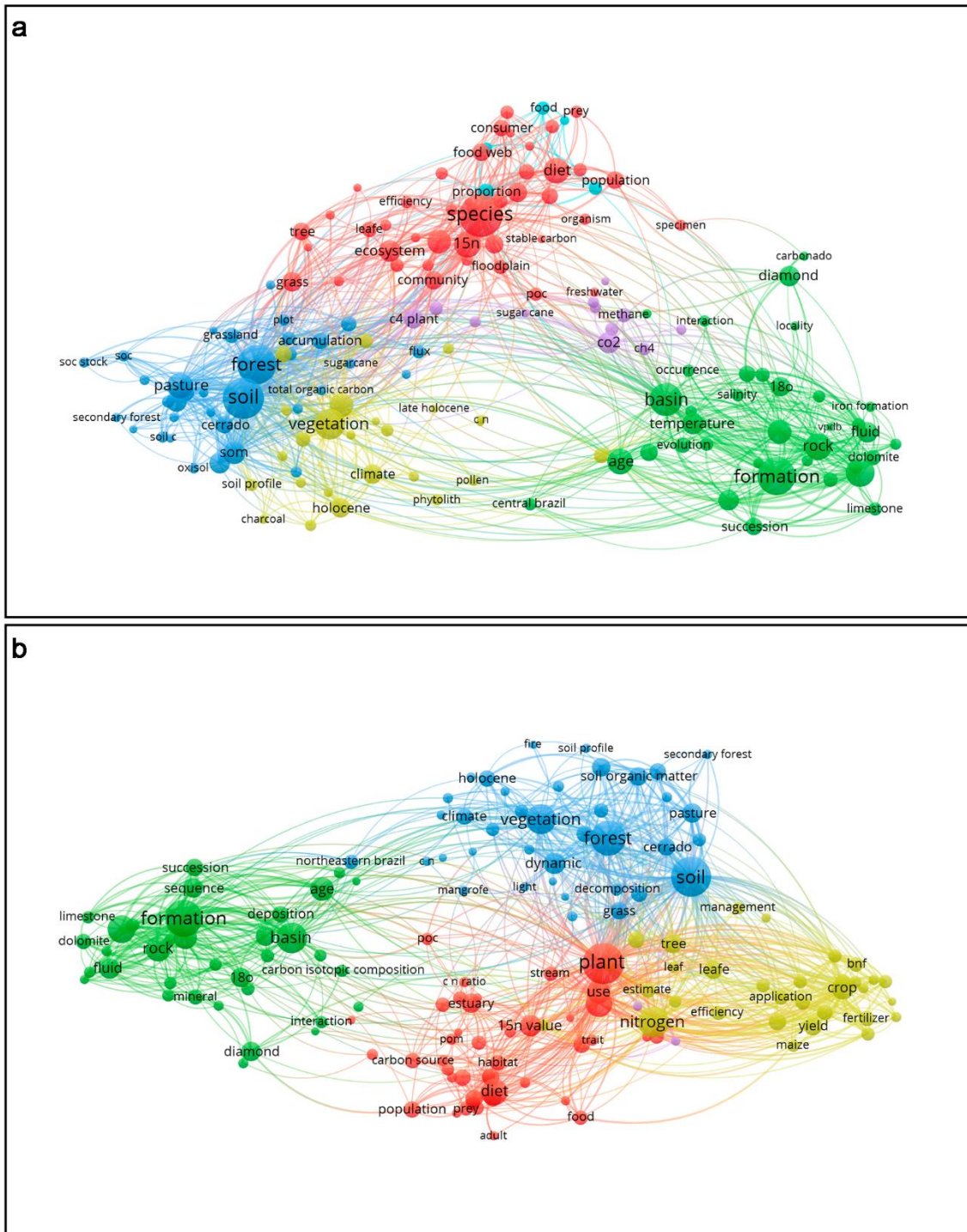


Fig. 1.2: Termos mais encontrados em resumos de trabalhos publicados que possuem dados de a) $\delta^{13}\text{C}$ e b) $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil. Maiores círculos indicam maior frequência com que o termo é citado. Cores diferentes indicam grupos de termos mais relacionados. Linhas mais fortes indicam termos comumente encontrados na mesma publicação.

A Fig. 1.3 apresenta os termos mais encontrados em títulos e resumos de trabalhos publicados que possuem dados de $\delta^{13}\text{C}$ (Fig. 1.3a) e $\delta^{15}\text{N}$ (Fig. 1.3b) no solo no Brasil entre 2006 e 2018. Os dados estão separados por cores relacionados a ocorrência dos termos em cada ano.

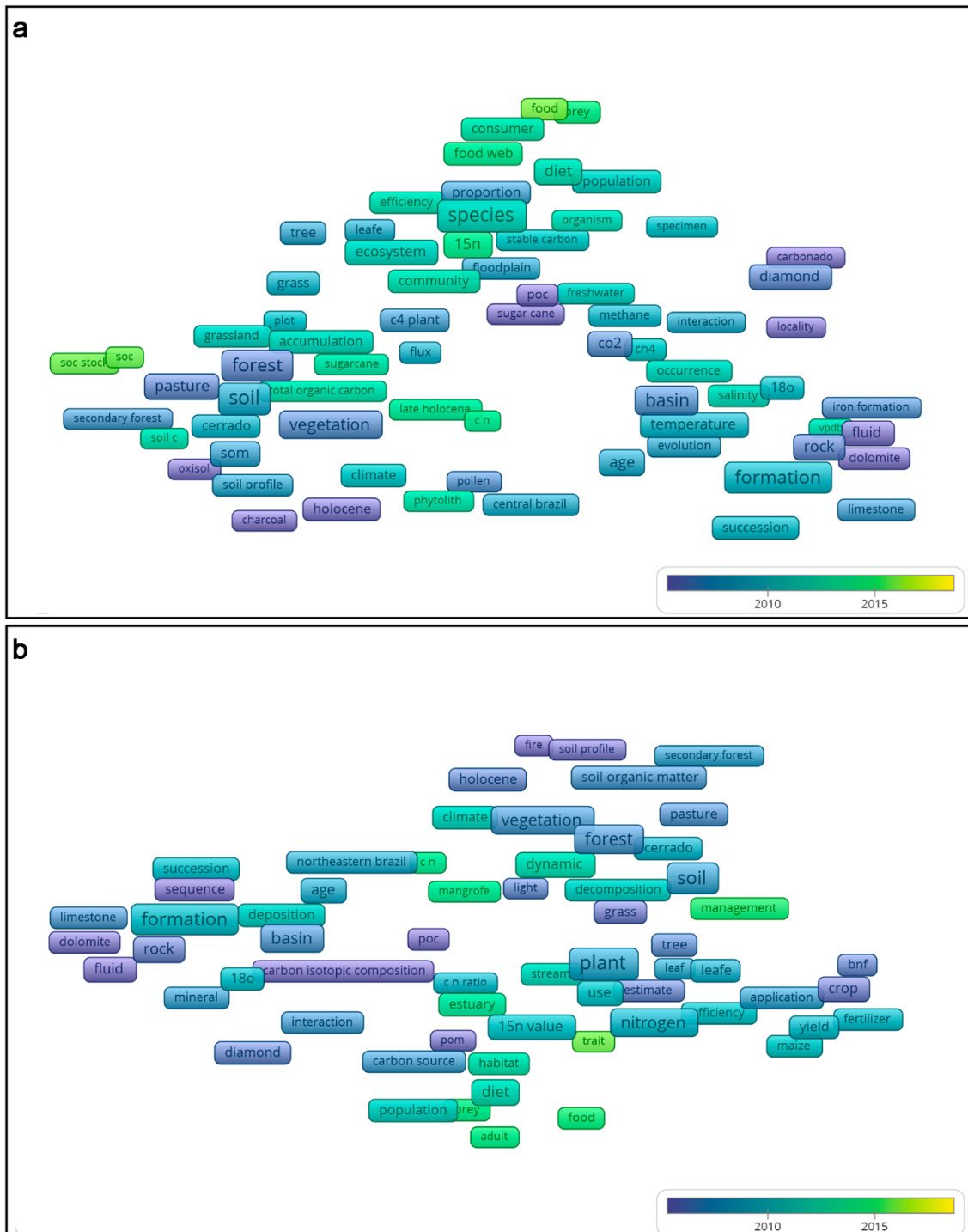


Fig. 1.3: Termos mais encontrados em resumos de trabalhos publicados que possuem dados de a) $\delta^{13}\text{C}$ e b) $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil entre 2006 e 2018. Termos em retângulos

azuis foram mais usados nos primeiros anos e nos retângulos amarelos foram mais usados nos últimos anos.

Clima e isótopos estáveis de C e N no Brasil

O bioma Pampa possui os maiores valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ no solo (Tab. 1.1). O Pampa possui maiores valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo que os do Cerrado ($p < 0,05$), que por sua vez apresenta maiores valores que Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal ($p < 0,05$). Amazônia e Caatinga possuem os maiores valores médios de $\delta^{15}\text{N}$ no solo e não diferem entre si. O Pampa, por sua vez, possui valores menores que da Caatinga e maiores que da Mata Atlântica e Pantanal ($p < 0,05$), e similar ao Cerrado. Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo do Cerrado não diferem estatisticamente dos valores na Mata Atlântica e no Pantanal (Material suplementar 1.1).

Tab. 1.1: Valores médios \pm (desvio padrão), mediana e número amostral de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de solos até 20cm de profundidade, em diferentes biomas no Brasil.

Bioma	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)			$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		
	Média (dp)	Mediana	<i>n</i> amostral	Média (dp)	Mediana	<i>n</i> amostral
Amazônia	-26,1 (4,1)	-26,0	91	8,2 (2,2)	8,9	65
Caatinga	-25,4 (0,9)	-25,3	41	9,3 (4,3)	8,6	50
Cerrado	-21,9 (3,3)	-21,8	278	5,6 (1,3)	5,6	166
Mata Atlântica	-24,4 (3,4)	-25,4	97	6,1 (1,9)	5,9	79
Pampa	-18,2 (4,2)	-15,4	14	6,9 (0,9)	6,6	5
Pantanal	-24,8 (3,2)	-26,2	38	5,3 (2,0)	5,1	32

Considerando todos os pontos amostrados no Brasil, houve relação significativa ($p < 0,05$) entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e MAT, apesar do baixo $R^2 = 0,04$ (Fig. 1.4a), e não houve relação significativa entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e MAP (Fig. 1.4b). O $\delta^{15}\text{N}$ do solo também apresentou relação significativa ($p < 0,05$) com MAT também com baixo $R^2 = 0,03$ (Fig. 1.4c), e não com MAP (Fig. 1.4d).

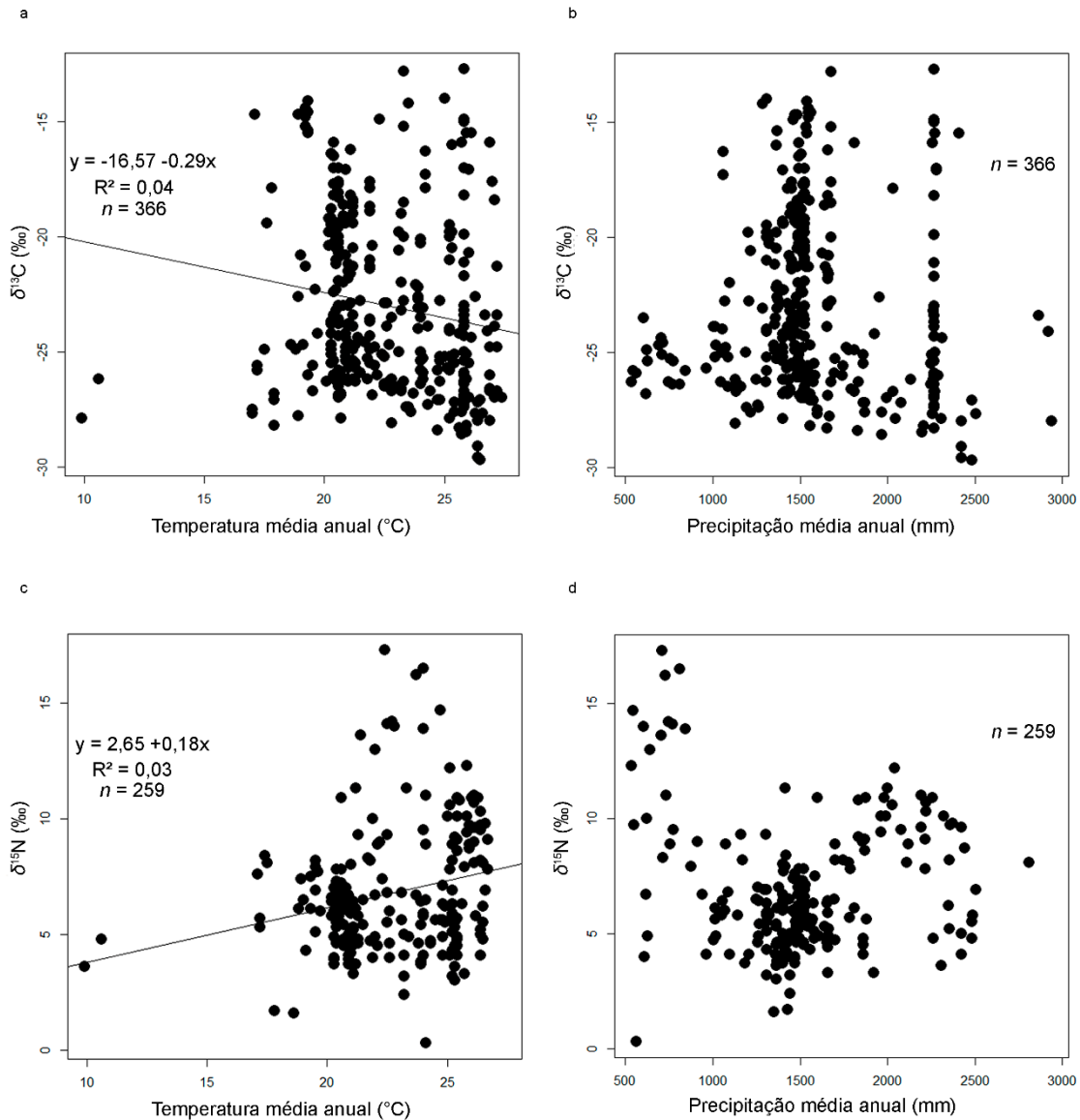


Fig. 1.4: Relação entre $\delta^{13}\text{C}$ no solo, até 20cm de profundidade, com a) temperatura média anual; e b) precipitação média anual; e relação entre $\delta^{15}\text{N}$ no solo, até 20cm de profundidade, e c) temperatura média anual; e d) precipitação média anual no Brasil. Linhas de tendências indicam que houve relação significativa entre as variáveis ($p < 0,05$). Dados de temperatura e precipitação foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.

Apesar do baixo poder explicativo, foi encontrada uma relação significativa ($p < 0,05$) entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e MAT na Caatinga ($R^2 = 0,15$, $y = -19,17 - 0,27x$). Para os outros biomas não foram encontradas relações significativas entre essas variáveis

(Material suplementar 1.2). Não houve relação significativa entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e MAP quando os pontos foram divididos pelos biomas onde estão inseridos (Material suplementar 1.3).

O $\delta^{15}\text{N}$ do solo apresentou relação significativa ($p < 0,05$) com a MAT, mas com baixo poder explicativo, no Cerrado ($R^2 = 0,07$, $y = 10,98 - 0,25x$) e no Pantanal ($R^2 = 0,21$, $y = 131,89 - 5,00x$). Nos outros biomas não foi encontrada relação significativa entre essas variáveis (Material suplementar 1.4). O $\delta^{15}\text{N}$ do solo apresentou relação significativa ($p < 0,05$) com MAP na Caatinga ($R^2 = 0,11$, $y = 15,99 - 0,01x$), na Mata Atlântica ($R^2 = 0,10$, $y = 9,77 - 0,00x$) e no Pantanal ($R^2 = 0,28$, $y = -52,60 + 0,05x$). Para os outros biomas não foram encontradas relações significativas entre essas variáveis (Material suplementar 1.5).

Modelos lineares

O modelo de $\delta^{13}\text{C}$ do solo no Brasil foi significativo ($p < 0,05$, $F = 8,11$ on 5 and 27 DF, R^2 ajustado = 0,53). Razão C/N do solo (Fig. 1.5b) e carbono no solo (Fig. 1.5c) apresentaram relação significativa ($p < 0,05$) com o $\delta^{13}\text{C}$ do solo individualmente. Os resíduos do modelo apresentaram distribuição normal (Teste de Shapiro-Wilk: 0,95, $p = 0,15$). Segundo o teste de Cook não há *outliers* na amostragem. Os dados possuem auto-correlação espacial (índice de Moran: 0,26, $p = 0,00$).

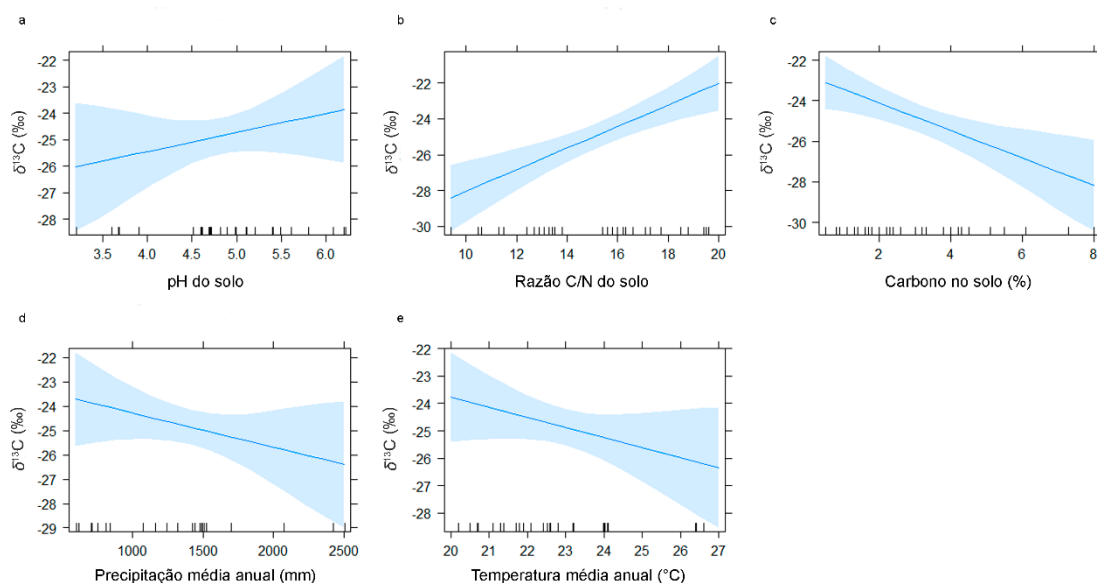


Fig. 1.5: Modelo linear entre $\delta^{13}\text{C}$ do solo e a) pH do solo; b) razão C/N do solo; c) Percentual de carbono no solo; d) precipitação média anual; e) temperatura média anual no Brasil. Relações “b” e “c” são significativas ($p < 0,05$). Linhas indicam a interseção e área colorida o erro padrão a 95% de confiança. As marcas internas no eixo X indicam a distribuição dos dados. Dados de precipitação e temperatura foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.

O modelo de $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil também foi significativo ($p < 0,05$, $F = 11,04$ on 5 and 49 DF, R^2 ajustado = 0,48). Razão C/N do solo (Fig. 1.6b) e MAP (Fig. 1.6d) apresentaram relação significativa ($p < 0,05$) com o $\delta^{15}\text{N}$ do solo individualmente. Os resíduos do modelo apresentaram distribuição normal (Teste de Shapiro-Wilk: 0,99, $p = 0,85$). Segundo o teste de Cook não há *outliers* na amostragem. Os dados possuem auto-correlação espacial (índice de Moran: 0,55, $p = 0,00$).

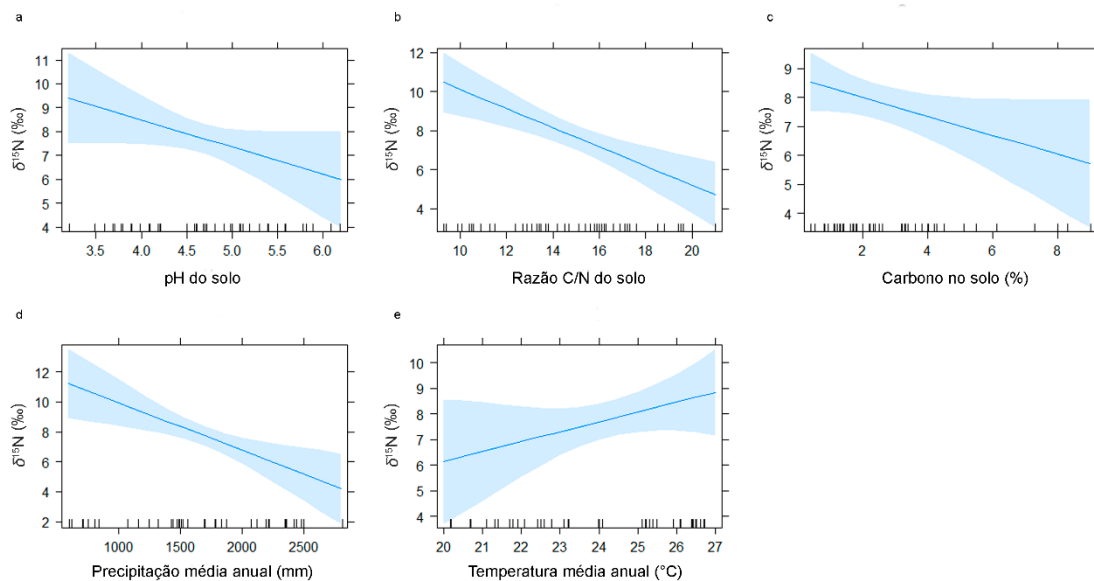


Fig. 1.6: Modelo linear entre $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a) pH do solo; b) razão C/N do solo; c) Percentual de carbono no solo; d) precipitação média anual; e) temperatura média anual no Brasil. Relações “b” e “d” são significativas ($p < 0,05$). Linhas indicam a interseção e área colorida o erro padrão a 95% de confiança. As marcas internas no eixo X indicam a distribuição dos dados. Dados de precipitação e temperatura foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.

Discussão

A capacidade dos isótopos estáveis de C e N do solo integrarem informação sobre o funcionamento dos ecossistemas explica a amplitude de linhas de pesquisa e tendência encontradas na literatura. Existem ao menos quatro grandes linhas de pesquisa, com outras duas secundárias, utilizando o $\delta^{13}\text{C}$ no solo. São as principais: mudanças de uso da terra, clima e vegetação, funcionamento de ecossistemas, e estudos geológicos. As duas primeiras estão relacionadas à estoques e fluxos de carbono no contexto das mudanças ambientais e climáticas, o que influencia na ligação dessas áreas com a emissão de gases do efeito estufa (Brüggemann et al. 2011; Lal 2013a). A linha de funcionamento de ecossistemas está focada no comportamento das espécies em relação ao meio em que vivem. Por isso a utilização frequente de $\delta^{15}\text{N}$, que contribui para entendimento da cadeia trófica e alimentação dos organismos. A linha de estudos geológicos é utilizada para identificar vegetação e clima no Brasil em períodos pristinos. O $\delta^{13}\text{C}$ em camadas mais profundas do solo podem dar importantes informações paleoecológicas (Pessenda et al. 1998; Gomes et al. 2017; Lorente et al. 2018). Em geral, esses estudos estão relacionados a bacias hidrográficas e formações geológicas.

Em estudos com $\delta^{13}\text{C}$, estoque de carbono no solo e alimentação são os termos utilizados com maior frequência recentemente na literatura. Isso demonstra a preocupação da comunidade científica com a ciclagem de C no contexto das mudanças climáticas e a importância do solo no estoque desse elemento. Essas tendências mostram o interesse na possível consequência dessas mudanças para os organismos, já que alimentação e atributos funcionais também estão entre os termos mais usados nos estudos com $\delta^{15}\text{N}$. Esses resultados também podem estar sendo influenciados pelos estudos sobre cadeia trófica, que utilizam os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo como valor basal. Os ambientes costeiros estuarinos também são frequentemente citados atualmente, pois têm sofrido grande influência das mudanças ambientais globais (Reis et al. 2019).

Existe uma relação negativa entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo e a temperatura do ar no Brasil, seguindo um padrão já encontrado em trabalhos anteriores (Luo et al. 2009). Plantas C_4 tendem a ser mais tolerantes à ambientes áridos e semiáridos. Entretanto, os valores encontrados em solos da região mais árida do Brasil, a Caatinga, são típicos de plantas C_3 . Por isso, nesse bioma também existe uma relação negativa entre o $\delta^{13}\text{C}$ no solo e a temperatura, tal qual encontrada por Luo et al. (2009) e Rao et

al. (2017). Fatores intrínsecos de cada ambiente, como as fontes de luz e de CO₂ são relacionados com a temperatura e influenciam o processo fotossintético das plantas (M. M.C. Bustamante et al. 2004).

Nossos resultados mostram que o $\delta^{13}\text{C}$ do solo nos biomas apresenta diferentes relações com as variáveis climáticas. De forma geral, a precipitação não é um fator determinante para o $\delta^{13}\text{C}$ do solo no Brasil, embora a disponibilidade de água tenha uma relação com o $\delta^{13}\text{C}$ das plantas (Ometto et al. 2006; Luo et al. 2009), que depois são depositadas no solo na forma de serapilheira com fracionamento de cerca de 2‰ (Martinelli et al. 1994). Estudos globais mostram uma correlação negativa entre precipitação e $\delta^{13}\text{C}$ de solos com valores C₃, $\leq -24\text{‰}$, mas essa correlação não existe quando são utilizados solos com valores acima de -24‰ , que representam mistura entre C₃ e C₄ ou predomínio de C₄ (Rao et al. 2017). Os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ são encontrados justamente nas áreas mais chuvosas, entretanto, os biomas brasileiros são muito heterogêneos em composição de espécies, e podem depositar no solo uma matéria orgânica muito variável mesmo em uma área pequena (Parron et al. 2004; Ometto et al. 2006). Isso também é corroborado pela ausência de relação significativa entre MAP e $\delta^{13}\text{C}$ dentro de cada bioma.

O $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil está relacionado positivamente à temperatura do ar, ainda que com baixo poder explicativo. Em modelos globais, existe relação similar com MAT (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015a). Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo aumentam à medida que o N passa pelos processos de mineralização ou decomposição. Ambos processos ocorrem com maior intensidade em locais com temperaturas mais elevadas (Martinelli et al. 1999), o que explica essa relação positiva entre $\delta^{15}\text{N}$ e MAT. Por outro lado, o modelo utilizando variáveis edafo-climáticas mostra uma relação negativa do $\delta^{15}\text{N}$ do solo com MAP, num padrão também encontrado globalmente até então (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015a). A disponibilidade de água também é um fator essencial para que esses processos ocorram (Ometto et al. 2006). Essa baixa relação com temperatura e precipitação pode ser explicada pelo acréscimo de pontos amostrais em ecossistemas estratégicos para entender esse padrão, como o Cerrado e a Caatinga. O Brasil possui uma alta variabilidade de ecossistemas associados à diferentes regimes de precipitação. A maior quantidade de amostras de $\delta^{15}\text{N}$ do solo em diferentes regiões do Brasil pode revelar relações regionais não-lineares com a precipitação e outras variáveis ambientais (Sena-Souza et al. 2020).

A dinâmica da MOS é diferente em cada bioma no Brasil. Florestas tropicais úmidas (Amazônia e Mata Atlântica) são predominantemente arbóreas, com ciclo fotossintético C₃, e por isso possuem valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo mais baixos que os outros biomas (Silva Neto et al. 2018). Exceções existem em manchas de savanas ou campos dentro dessas florestas (Freitas et al. 2001; Vidotto et al. 2007; Lins et al. 2016). No presente estudo a Caatinga e o Pantanal apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ similares aos da Amazônia e da Mata Atlântica, proveniente de matéria orgânica oriunda de plantas C₃ e de plantas CAM comuns na região. Outros estudos também mostram que a Caatinga possui valores de $\delta^{13}\text{C}$ em torno de -26‰ nas camadas superficiais do solo, menores que áreas de Cerrado e de transição entre eles (Mendonça et al. 2010). Possivelmente isso ocorre devido aos solos terem sido coletados em locais com vegetação predominantemente arbórea. Outra possível explicação é que as espécies herbáceas são rapidamente consumidas por rebanhos que acessam áreas nativas e, posteriormente, pela biota do solo, o que faz os solos da Caatinga armazenarem a matéria orgânica oriunda de espécies arbóreas. No Pantanal existe uma variação causada pela fitofisionomia que varia entre -29‰ e -20‰, que nesse caso está relacionado à posição na paisagem e à dinâmica de alagamento dos solos (Nascimento et al. 2013). A concentração de amostragem em áreas com vegetação mais adensada pode contribuir para os valores médios serem semelhantes aos de florestas tropicais.

As diferenças entre os biomas também são encontradas nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo. Ambientes florestais, com altas temperatura e umidade possuem taxas de decomposição mais acelerada, o que deixa os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo mais altos que em ambientes de savana (Martinelli et al. 1999). Na Amazônia, os valores mais elevados de $\delta^{15}\text{N}$ são encontrados entre 2000 mm e 2400 mm de precipitação média anual, faixa similar ao encontrado por Sena-Souza et al. (no prelo), mostrando que não há uma relação linear entre precipitação e $\delta^{15}\text{N}$ do solo nesse bioma, corroborado pelos resultados encontrados no presente estudo. O $\delta^{15}\text{N}$ do solo na Amazônia diminui de leste a oeste (Nardoto et al. 2008; 2014; Sena-Souza et al. 2020). Isso porque na região da Amazônia ocidental pode ocorrer uma completa desnitrificação, anulando o efeito do fracionamento e diminuindo os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Houlton et al. 2006). Além disso, a maior quantidade de chuvas também tende a aumentar as perdas de N por erosão e lixiviação, processos que não causam fracionamento.

Na Mata Atlântica, temperatura e precipitação não são tão elevados quanto na Amazônia, resultando em taxa de mineralização menos acelerada e menor $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Martinelli et al. 1999). Já os ambientes semiáridos, como a Caatinga, possuem valores ainda mais altos que as florestas tropicais, devido ao ciclo mais aberto do N em áreas secas (Martinelli et al. 1999), que aumentam as perdas por volatilização, quando o pH é elevado (Aranibar et al. 2004; Menezes et al. 2012; Ribeiro et al. 2016; Wang et al. 2014). Além disso, as chuvas concentradas em um breve período de tempo, aliadas às condições de pH e razão C/N adequadas, permite uma intensificação das transformações do N nesses ambientes, aumentando os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Santos et al. em preparação).

Na Mata Atlântica e na Caatinga os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo diminuem com o aumento da precipitação. Esse padrão é apresentado na literatura em escala global (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015a), em savanas africanas (Aranibar et al. 2008b) e na própria Caatinga (Freitas et al. 2015). Isso ocorre porque em áreas secas a matéria orgânica está mais associada aos minerais e é mais enriquecida em ^{15}N que a matéria orgânica particulada, mais comum em ambientes mais úmidos (Craine et al. 2015a; Conen et al. 2008). Vitória et al. (2018) mostraram que o $\delta^{15}\text{N}$ das folhas tem diferentes relações com o ambiente de acordo com a variação da precipitação na Mata Atlântica. No entanto, essa relação não ocorre considerando todo o Brasil por conta dos valores altos de $\delta^{15}\text{N}$ encontrados na Amazônia e pela variação local e regional dos processos que controlam a dinâmica no nitrogênio. No Brasil existe uma variedade de ambientes que impedem a linearidade dessa relação. Os valores mais altos, por exemplo, estão nos locais mais áridos e mais chuvosos no Brasil, Caatinga e Amazônia, respectivamente.

No Pantanal, a dinâmica da MOS e sua relação com as variáveis climáticas difere dos outros biomas. A relação do $\delta^{15}\text{N}$ do solo é positiva com a precipitação e negativa com a temperatura. O Pantanal possui uma dinâmica própria de alagamento do solo, de acordo com as estações de seca e chuva bem da região, o que condiciona a dinâmica da MOS (Cardoso et al. 2016). No período seco, os processos de nitrificação e desnitrificação aumentam, tornando o Pantanal uma possível fonte de emissão de N_2O . No entanto, a quantidade de ar presente no solo diminui no período de chuva, inibindo as atividades de vários grupos de organismos presentes no solo, reduzindo os processos

de decomposição e mineralização do nitrogênio (Liengaard et al. 2012). Isso resulta em menores valores de $\delta^{15}\text{N}$ em solos pantanosos.

No Cerrado, o estrato herbáceo contribui ativamente para a formação da MOS, embora também haja contribuição dos estratos arbustivos e arbóreos. Por conta disso, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ desse bioma ficam em torno de -22‰ (Guareschi et al. 2014; Sant-Anna et al. 2017). Solos sob fitofisionomias florestais do Cerrado apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo em torno de entre -29‰ e -26‰ (Miranda et al. 2016; Parron et al. 2004), e nos campos sob vegetação arbustiva ou herbácea entre -20‰ e -14‰ (Lloyd et al. 2008).

O Cerrado é um ambiente limitado em nitrogênio, com elevada razão C/N e concentração de NH_4^+ no solo, e baixas taxas de mineralização (Nardoto e Bustamante 2003). Além disso, possui solos profundos e bem drenados e períodos de seca e chuva bem definidos. Por isso, há um déficit de água no solo na maior parte do tempo, que não permite uma atividade tão intensa dos organismos quanto em florestas e, conseqüentemente, menores valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo do Cerrado (Sena-Souza et al. no prelo). Esse mesmo processo aliado à fixação biológica de N, associação das plantas com os organismos do solo e profundidade das raízes que acessam diferentes fontes de N do solo, propicia uma variedade de estratégias das plantas, que se reflete na grande amplitude de valores de $\delta^{15}\text{N}$ foliar depositada no solo em diferentes fitofisionomias do Cerrado (Parron et al. 2004; Bustamante et al. 2004; Catão et al. 2016).

No Pampa, o estrato herbáceo predomina em relação ao arbóreo-arbustivo, por isso os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo ficam maiores. Em solos superficiais ao longo de um gradiente de vegetação, Andriollo et al. (2017) encontraram valores entre -24‰ em áreas florestais e -14‰ em áreas campestres do Pampa. Em geral, as médias de temperatura do Pampa são menores que dos outros biomas brasileiros, devido às maiores latitudes. Além disso, o bioma possui baixa disponibilidade de N no solo. Por esses motivos, as taxas de decomposição nesse ambiente são menores e, conseqüentemente, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo são mais baixos (Assad et al. 2013).

Precipitação e temperatura possuem baixo poder de explicação da distribuição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos solos do Brasil, sendo que somente MAT apresentou uma relação significativa com esses isótopos. Isso indica que existem outros fatores, intrínsecos à cada ambiente, influenciando esses valores (Craine et al. 2015a; Osborne et al. 2016; Rasmussen et al. 2018). Esses fatores podem ser biológicos, sendo relacionados à

fisiologia das plantas que depositam o material no solo ou à associações com outros organismos acima e abaixo do solo (Ometto et al. 2006; Hobbie e Ouimette 2009; Craine et al. 2015b). Eles também podem ser fatores físicos e químicos do solo nas mais diversas escalas, como material de origem e relevo (Weintraub et al. 2015), concentração de carbono e teor de argila no solo (Craine et al. 2015a; Conen et al. 2008), mineralogia do solo (Singh et al. 2017); ou razão C/N e o pH do solo (Aranibar et al. 2004; Osborne et al. 2016; Wang et al. 2014).

O modelo empregado em nosso estudo mostra que o poder de explicação aumenta drasticamente quando fatores ambientais são usados como preditores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos solos do Brasil. A razão C/N e a concentração de C no solo influenciaram o $\delta^{13}\text{C}$ do solo. Isso demonstra a importância da disponibilidade dos nutrientes, da qualidade da matéria orgânica depositada no solo e das condições ambientais no controle dos processos de fotossíntese e decomposição. Além disso, a razão C/N do solo influenciou negativamente os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil, numa relação já relatada em outros ambientes (Aranibar et al. 2004; Conen et al. 2008; Osborne et al. 2016). A limitação do ambiente por nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica são essenciais para a ciclagem do nitrogênio, especialmente em escalas regionais e locais, onde esse fator se sobrepõe aos fatores climáticos.

Conclusões

O uso do $\delta^{13}\text{C}$ está relacionado ao estoque de carbono e mudanças no uso da terra, enquanto o $\delta^{15}\text{N}$ está relacionado a dinâmica desse nutriente no ambiente e ao longo da cadeia trófica. Nos últimos anos o foco das pesquisas está nos atributos funcionais das espécies e no funcionamento dos ecossistemas, além de estoque de carbono no solo. Todos esses fatores estão vinculados às mudanças ambientais globais, o que fortalece a importância dos estudos com $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo para o funcionamento dos ecossistemas.

O clima influencia o $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$ no solo de biomas brasileiros de maneiras distintas. Embora temperatura e precipitação tenham se mostrado importantes, outros fatores contribuem para os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil, principalmente a razão C/N do solo.

Utilizar variáveis climáticas aliadas a variáveis ambientais se mostrou uma ferramenta útil para o entendimento da dinâmica da MOS no Brasil. Ambas as variáveis mostraram importantes relações com o $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$, principalmente quando inseridas em um mesmo modelo.

Considerações finais

É fundamental que mais estudos sejam realizados considerando variáveis climáticas e ambientais em diferentes regiões para entender a dinâmica de cada ecossistema, especialmente em locais pouco amostrados. Os biomas Pampa e Pantanal, por exemplo, possuem as menores amostragens e as mais concentradas dentre os estudos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil. A amplitude dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ encontrada nesses biomas sugere uma variação na dinâmica da matéria orgânica nesses ambientes. Sendo assim, entender seu funcionamento e as variações existentes dentro do bioma necessita mais estudos. A Caatinga apresenta um padrão característico de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo e também necessita de outros estudos para melhor compreensão do seu funcionamento.

Sugerimos ainda um estudo que abranja as diferentes savanas do Brasil (Caatinga, Cerrado e Pantanal), considerando a chamada “diagonal seca”. Essas savanas apresentam vegetação e médias de temperatura e precipitação semelhantes, mas possuem comportamentos distintos em seu funcionamento. Além disso, o funcionamento nas transições (ecótonos) desses biomas são pouco conhecidos. Esse estudo deve considerar fatores físicos, químicos e biológicos em diferentes escalas (ex. geologia, relevo, vegetação, textura do solo, pH, entre outras) para abranger a complexidade da dinâmica da matéria orgânica nesses ecossistemas.

Referências

Amundson, R G, A T Austin, E A G Schuur, K Yoo, V Matzek, C Kendall, A Uebersax, D Brenner, and W T Baisden. 2003. “Global Patterns of the Isotopic Composition of Soil and Plant Nitrogen.” *Global Biogeochemical Cycles* 17 (1): 10. <https://doi.org/10.1029/2002GB001903>.

Andriollo, D D, C G Redin, J M Reichert, and L S Silva. 2017. “Soil Carbon Isotope

Ratios in Forest-Grassland Toposequences to Identify Vegetation Changes in Southern Brazilian Grasslands.” *Catena* 159 (August): 126–35. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.08.012>.

Aranibar, J N, I C Anderson, H E Epstein, C J W Feral, R J Swap, J Ramontsho, and S A Macko. 2008. “Nitrogen Isotope Composition of Soils, C₃ and C₄ plants along Land Use Gradients in Southern Africa.” *Journal of Arid Environments* 72 (4): 326–37. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.007>.

Aranibar, J N, L Otter, S A Macko, C. J.W. Feral, H. E. Epstein, P R Dowty, F Eckardt, H H Shugart, and R. J. Swap. 2004. “Nitrogen Cycling in the Soil-Plant System along a Precipitation Gradient in the Kalahari Sands.” *Global Change Biology*, 259–373. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2003.00698.x>.

Assad, E D, H S Pinto, S C Martins, J D Groppo, P R Salgado, B Evangelista, E Vasconcellos, et al. 2013. “Changes in Soil Carbon Stocks in Brazil Due to Land Use : Paired Site Comparisons and a Regional Pasture Soil Survey.” *Biogeosciences* 10: 6141–60. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6141-2013>.

Brüggemann, N., A. Gessler, Z. Kayler, S. G. Keel, F. Badeck, M. Barthel, P. Boeckx, et al. 2011. “Carbon Allocation and Carbon Isotope Fluxes in the Plant-Soil-Atmosphere Continuum: A Review.” *Biogeosciences* 8 (11): 3457–89. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3457-2011>.

Bustamante, M. M.C., L. A. Martinelli, D. A. Silva, P. B. Camargo, C. A. Klink, T. F. Domingues, and R. V. Santos. 2004. “¹⁵N Natural Abundance in Woody Plants and Soils of Central Brazilian Savannas (Cerrado).” *Ecological Applications* 14 (4 SUPPL.). <https://doi.org/10.1890/01-6013>.

Cardoso, E L, S A Santos, C Urbanetz, A Carvalho Filho, U J Naime, M L N Silva, and N Curi. 2016. “Relação Entre Solos e Unidades Da Paisagem No Ecossistema Pantanal.” *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 51 (9): 1231–40. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900023>.

Catão, E. C.P., F. A.C. Lopes, M. R. Rubini, G. B. Nardoto, J. I. Prosser, and R. H. Krüger. 2016. “Short-Term Impact of Soybean Management on Ammonia Oxidizers in a Brazilian Savanna under Restoration as Revealed by Coupling Different Techniques.” *Biology and Fertility of Soils* 52 (3): 401–12. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1086->

0.

Chapin, F. S., Matson, P. A., Vitousek, P. 2011. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer s.

Conen, F, M Zimmermann, J Leifeld, B Seth, and C Alewell. 2008. “Relative Stability of Soil Carbon Revealed by Shifts in $\delta^{15}\text{N}$ and C : N Ratio.” *Biogeosciences* 5: 123–28.

Craine, J M, E N J Brookshire, M D Cramer, N J Hasselquist, K Koba, E Marin-Spiotta, and L Wang. 2015b. “Ecological Interpretations of Nitrogen Isotope Ratios of Terrestrial Plants and Soils.” *Plant and Soil* 396 (1–2): 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2542-1>.

Craine, J M, A J Elmore, L Wang, L Augusto, W T Baisden, E N J Brookshire, M D Cramer, N J Hasselquist, E A Hobbie, A Kahmen, et al. 2015a. “Convergence of Soil Nitrogen Isotopes across Global Climate Gradients.” *Scientific Reports* 5: 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep08280>.

Ehleringer, J R, D R Bowling, L B Flanagan, J Fessenden, B Helliker, L A Martinelli, and J P Ometto. 2002. “Stable Isotopes and Carbon Cycle Processes in Forests and Grasslands.” *Plant Biology* 4: 181–89.

Ehleringer, J R, N Buchmann, and L B Flanagan. 2000. “Carbon Isotope Ratios in Belowground Carbon Cycle Processes.” *Ecological Applications* 10 (2): 412–422. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0412:CIRIBC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0412:CIRIBC]2.0.CO;2).

Freitas, A D S, E V Sampaio, A P S Ramos, M R V Barbosa, R P Lyra, and E L Araújo. 2015. “Nitrogen Isotopic Patterns in Tropical Forests along a Rainfall Gradient in Northeast Brazil.” *Plant and Soil* 391 (1–2): 109–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2417-5>.

Freitas, H A, L C R Pessenda, R Aravena, S E Gouveia, A Ribeiro, and R Boulet. 2001. “Late Quaternary Vegetation Dynamics in the Southern Amazon Basin Inferred from Carbon Isotopes in Soil Organic Matter.” *Quaternary Research* 55 (1): 39–46. <https://doi.org/10.1006/qres.2000.2192>.

Gomes, M O S, K E B Meyer, and L C R Pessenda. 2017. “Reconstituição Paleoambiental Da Vereda Carrasco Da Raposa , Parque Es- Tadual Da Serra Do Cabral

, MG , Brasil , Por Meio de Estudos Palinológico e Isotópico.” *Pesquisas Em Geociências* 44 (1): 41–62.

Guareschi, R F, M G Pereira, and A Perin. 2014. “Carbono, Nitrogênio e Abundância Natural de $\Delta^{13}\text{C}$ e $\Delta^{15}\text{N}$ Em Uma Cronossequência de Agricultura Sob Plantio Direto No Cerrado Goiano.” *Revista Brasileira de Ciência Do Solo* 38: 1135–42.

Hobbie, E A, and A P Ouimette. 2009. “Controls of Nitrogen Isotope Patterns in Soil Profiles.” *Biogeochemistry* 95 (2): 355–71. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9328-6>.

Hogberg, P. 1997. “ ^{15}N Natural Abundance in Soil-Plant Systems.” *New Phytologist* 137: 179–203. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00808.x>.

Houlton, B Z, D M Sigman, and L O Hedin. 2006. “Isotopic Evidence for Large Gaseous Nitrogen Losses from Tropical Rainforests.” *PNAS* 23 (6): 8745–50.

Houlton, B Z, D M Sigman, E A G Schuur, and L O Hedin. 2007. “A Climate-Driven Switch in Plant Nitrogen Acquisition within Tropical Forest Communities.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (21): 8902–6. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0609935104>.

Jenny, H. 1941. *FACTORS OF SOIL FORMATION A System of Quantitative Pedology*. Edited by Ronald Amundson. New York.

Lal, R. 2013a. “Intensive Agriculture and the Soil Carbon Pool.” *Journal of Crop Improvement* 27 (September): 735–52. <https://doi.org/10.1080/15427528.2013.845053>.

———. 2013b. “Soil Carbon Management and Climate Change.” *Carbon Management* 4 (September): 439–62. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.31>.

Liengaard, L, L P Nielsen, N P Revsbech, A Priemé, B Elberling, A Enrich-Prast, and M Köhl. 2012. “Extreme Emission of N_2O from Tropical Wetland Soil (Pantanal, South America).” *Frontiers in Microbiology* 3 (JAN): 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00433>.

Lins, S R M, L D Coletta, E C Ravagnani, J G Gragnani, E A Mazzi, and L A Martinelli. 2016. “Stable Carbon Composition of Vegetation and Soils across an Altitudinal Range in the Coastal Atlantic Forest of Brazil.” *Trees - Structure and Function* 30 (4): 1315–29. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1368-7>.

- Lloyd, J, M I Bird, L Vellen, A C Miranda, E M Veenendaal, G Djagbletey, H S Miranda, G Cook, and G D Farquhar. 2008. “Contributions of Woody and Herbaceous Vegetation to Tropical Savanna Ecosystem Productivity: A Quasi-Global Estimate.” *Tree Physiology* 28 (3): 451–68. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.3.451>.
- Lorente, F L, L C R Pessenda, F Oboh-Ikuenobe, A A Buso Junior, D F Rossetti, P C F Giannini, M C L Cohen, et al. 2018. “An 11,000-Year Record of Depositional Environmental Change Based upon Particulate Organic Matter and Stable Isotopes (C and N) in a Lake Sediment in Southeastern Brazil.” *Journal of South American Earth Sciences* 84 (July): 373–84. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.04.006>.
- Luo, T, L Zhang, H Zhu, C Daly, M Li, and J Luo. 2009. “Correlations between Net Primary Productivity and Foliar Carbon Isotope Ratio across a Tibetan Ecosystem Transect.” *Ecography* 32 (3): 526–38. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05735.x>.
- Martinelli, L. A., M. C. Piccolo, A. R. Townsend, P. M. Vitousek, E. Cuevas, W. McDowell, G. P. Robertson, O. C. Santos, and K. Treseder. 1999. “Nitrogen Stable Isotopic Composition of Leaves and Soil: Tropical versus Temperate Forests.” *Biogeochemistry* 46 (1–3): 45–65. <https://doi.org/10.1007/BF01007573>.
- Martinelli, L A, R L Victoria, B R Forsberg, and J E Richey. 1994. “Isotopic Composition of Majors Carbon Reservoirs in the Amazon Floodplain.” *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 20: 31–46.
- Mendonça, L, H Frischkor, M Snatiago, P B de Camargo, J O G Lima, and J Mendes Filho. 2010. “Identificação de Mudanças Florestais Por ΔC e ΔN Dos Solos Da Chapada Do Araripe. Ceará.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14 (March): 314–19. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000300012>.
- Menezes, R S C, E V Sampaio, V Giongo, and A M Pérez-Marin. 2012. “Biogeochemical Cycling in Terrestrial Ecosystems of the Caatinga Biome.” *Brazilian Journal of Biology* 72 (3 suppl): 643–53. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>.
- Miranda, E, J Carmo, E Couto, and P B Camargo. 2016. “Long-Term Changes in Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado under Commercial Soybean.” *Land Degradation and Development* 27 (6): 1586–94. <https://doi.org/10.1002/ldr.2473>.

Nardoto, G B, and M M C Bustamante. 2003. "Effects of Fire on Soil Nitrogen Dynamics and Microbial Biomass in Savannas of Central Brazil." *Pesq. Agropec. Bras.* 38 (1): 955–62.

Nardoto, G B, J P H B Ometto, J R Ehleringer, N Higuchi, M M C Bustamante, and L A Martinelli. 2008. "Understanding the Influences of Spatial Patterns on N Availability Within the Brazilian Amazon Forest." *Ecosystems* 11 (April): 1234–46. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9189-1>.

Nardoto, Gabriela B., Carlos A. Quesada, Sandra Patiño, Gustavo Saiz, Tim R. Baker, Michael Schwarz, Franziska Schrodte, et al. 2014. "Basin-Wide Variations in Amazon Forest Nitrogen-Cycling Characteristics as Inferred from Plant and Soil $^{15}\text{N}:\text{^{14}N}$ Measurements." *Plant Ecology and Diversity* 7 (1–2): 173–87. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.807524>.

Nascimento, A. F., S. A. C. Furquim, E. G. Couto, R. M. Beirigo, J.C. O. Júnior, P.B. Camargo, and P. V. Vidal-Torrado. 2013. "Genesis of Textural Contrasts in Subsurface Soil Horizons in the Northern Pantanal - Brazil." *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, no. 37: 1113–27.

Ometto, J P, J R Ehleringer, T F Domingues, J A Berry, F Y Ishida, E Mazzi, N Higuchi, L B Flanagan, G B Nardoto, and L A Martinelli. 2006. "The Stable Carbon and Nitrogen Isotopic Composition of Vegetation in Tropical Forests of the Amazon Basin , Brazil." *Biogeochemistry* 79 (July): 251–74. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5517-1>.

Osborne, B B, M K Nasto, G P Asner, S Christopher, C C Cleveland, B W Sullivan, P G Taylor, A R Townsend, and S Porder. 2016. "Climate, Topography, and Canopy Chemistry Exert Hierarchical Control Over Soil N Cycling in a Neotropical Lowland Forest." *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0095-7>.

Parron, L M, M M C Bustamante, and P B Camargo. 2004. "Composição Isotópica de Carbono e Nitrogênio Em Solos e Plantas de Uma Mata de Galeria: Efeito Do Gradiente Topográfico." *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Cerrados* 127: 24.

Pessenda, L C R, B M Gomes, R Aravena, A S Ribeiro, R Boulet, and S E M Gouveia. 1998. "The Carbon Isotope Record in Soils along a Forest-Cerrado Ecosystem Transect:

Implications for Vegetation Changes in the Rondonia State, Southwestern Brazilian Amazon Region.” *Holocene* 8 (5): 599–603. <https://doi.org/10.1191/095968398673187182>.

Peterson, B. J., and B. Fry. 1987. “Stable Isotopes in Ecosystem Studies.” *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 18, 293–320. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.18.110187.001453>.

Powell, R, E H Yoo, and C J Still. 2012. “Vegetation and Soil Carbon-13 Isoscapes for South America: Integrating Remote Sensing and Ecosystem Isotope Measurements.” *Ecosphere* 3 (November): 25.

Rao, Z, W Guo, J Cao, F Shi, H Jiang, and C Li. 2017. “Relationship between the Stable Carbon Isotopic Composition of Modern Plants and Surface Soils and Climate: A Global Review.” *Earth-Science Reviews* 165 (December): 110–19. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.007>.

Rasmussen, C, K Heckman, W R Wieder, M Keiluweit, C R Lawrence, A A Berhe, J C Blankinship, et al. 2018. “Beyond Clay: Towards an Improved Set of Variables for Predicting Soil Organic Matter Content.” *Biogeochemistry* 137 (3): 297–306. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>.

Reis, C R G, S C Reed, R S Oliveira, and G B Nardoto. 2019. “Isotopic Evidence That Nitrogen Enrichment Intensifies Nitrogen Losses to the Atmosphere from Subtropical Mangroves.” *Ecosystems*, 19. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0327-0>.

Ribeiro, K, E R Sousa-Neto, J A Carvalho Junior, J R S Lima, R S C Menezes, P J Duarte-Neto, G S Guerra, and J P H B Ometto. 2016. “Land Cover Changes and Greenhouse Gas Emissions in Two Different Soil Covers in the Brazilian Caatinga.” *Science of the Total Environment* 571: 1048–57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>.

Robinson, D. 2001. “ $\Delta^{15}\text{N}$ as an Integrator of the Nitrogen.” *Trends in Ecology & Evolution* 16 (3): 153–62.

Sant-Anna, S A C, C P Jantalia, J M Sá, L Vilela, R L Marchão, B J R Alves, S Urquiaga, and R M Boddey. 2017. “Changes in Soil Organic Carbon during 22 Years of Pastures, Cropping or Integrated Crop/Livestock Systems in the Brazilian Cerrado.” *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 108 (1): 101–20. <https://doi.org/10.1007/s10705->

016-9812-z.

Santos, F L S, V Vasconcelos, K Jesus, G Neves, A F Couto Junior, E V Sampaio, J P Ometto, R S C Menezes, and G B Nardoto. n.d. “Climatic Controls on the Soil Nitrogen Isotopic Composition across the Physiographic Regions of the Pernambuco State, Northeast Brazil.” *Geoderma Regional*.

Sena-Souza, João Paulo, Benjamin Z. Houlton, Luiz Antônio Martinelli, and Gabriela Bielefeld Nardoto. 2020. “Reconstructing Continental-Scale Variation in Soil $\delta^{15}\text{N}$: A Machine Learning Approach in South America.” *Ecosphere* 11 (8). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3223>.

Silva Neto, Eduardo Carvalho da, Marcia Regina Calegari, Marcos Gervasio Pereira, Deyvid Diego Carvalho Maranhão, Jolimar Antonio Schiavo, Ademir Fontana, and Júlio César Feitosa Fernandes. 2018. “Phytoliths as Indicators of Pedogenesis and Paleoenvironmental Changes in Spodosols of the State of Rio de Janeiro, Brazil.” *Science of the Total Environment* 636: 1070–80. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.313>.

Singh, M, B Sarkar, S Sarkar, J Churchman, N Bolan, S Mandal, M Menon, TJ Purakayastha, and DJ Beerling. 2017. *Stabilization of Soil Organic Carbon as Influenced by Clay Mineralogy*. *Advances in Agronomy*. 1st ed. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.001>.

Steffen, W, K Richardson, J Rockström, S Cornell, I Fetzer, E Bennett, R Biggs, and S Carpenter. 2015. “Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet.” *Science (New York, N.Y.)* 348 (6240): 1217. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9629>.

Templer, P H, M C Mack, F S Chapin, L M Christenson, J E Compton, H D Crook, W S Currie, et al. 2012. “Sinks for Nitrogen Inputs in Terrestrial Ecosystems: A Meta-Analysis of ^{15}N Tracer Field Studies.” *Ecology* 93 (June 2011): 1816–29.

Vidotto, E, L C R Pessenda, A S Ribeiro, H A De Freitas, and J A Bendassolli. 2007. “Dinâmica Do Ecótono Floresta-Campo No Sul Do Estado Do Amazonas No Holoceno, Através de Estudos Isotópicos e Fitosociológicos.” *Acta Amazonica* 37 (3): 385–400. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000300010>.

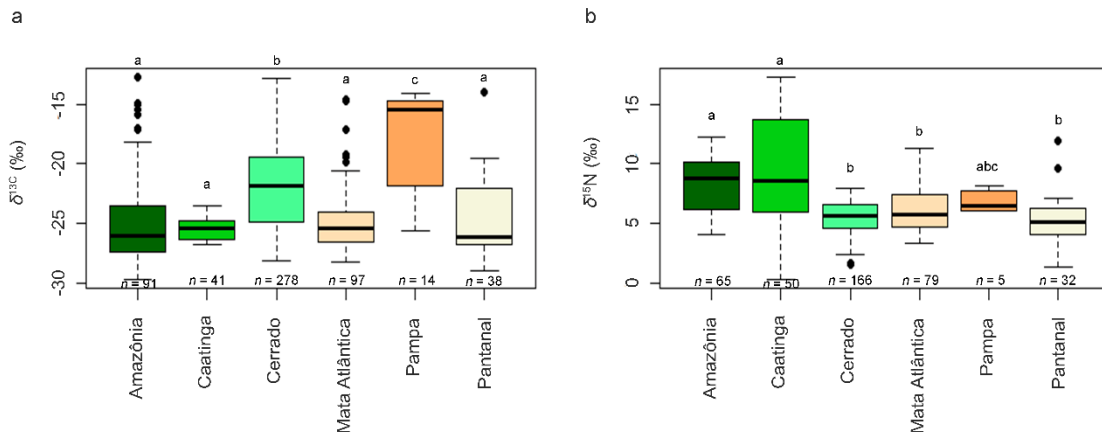
Vitória, A P, E Ávila-Lovera, T Oliveira Vieira, A P L Couto-Santos, T J Pereira, L S

Funch, L Freitas, et al. 2018. "Isotopic Composition of Leaf Carbon ($\Delta^{13}\text{C}$) and Nitrogen ($\Delta^{15}\text{N}$) of Deciduous and Evergreen Understorey Trees in Two Tropical Brazilian Atlantic Forests." *Journal of Tropical Ecology* 34 (2): 145–56. <https://doi.org/10.1017/S0266467418000093>.

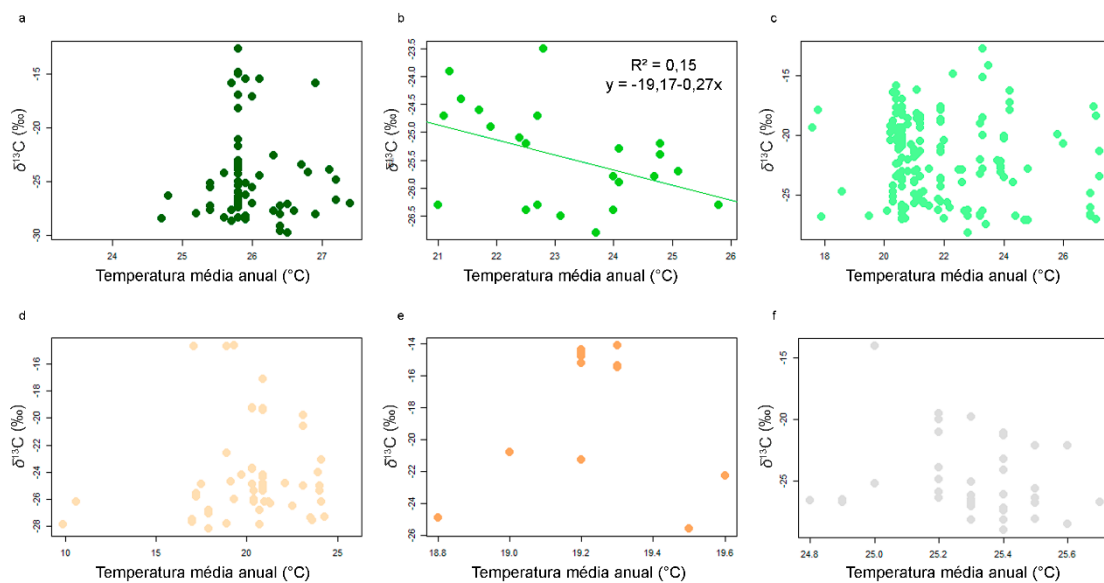
Wang, C, X Wang, D Liu, H Wu, X Lu, Y Fang, and W Cheng. 2014. "Aridity Threshold in Controlling Ecosystem Nitrogen Cycling in Arid and Semi-Arid Grasslands." *Nature Communications* 5: 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms5799>.

Weintraub, S R, P G Taylor, S Porder, C C Cleveland, G P Asner, and A R Townsend. 2015. "Topographic Controls on Soil Nitrogen Availability in a Lowland Tropical Forest." *Ecology* 96 (6): 1561–74.

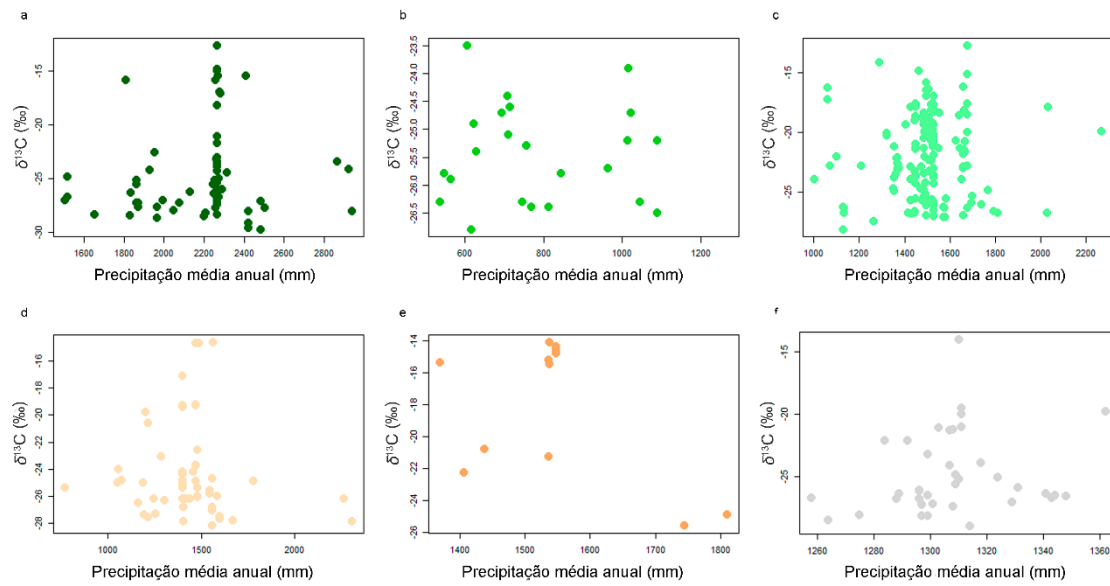
Material suplementar – Capítulo 1



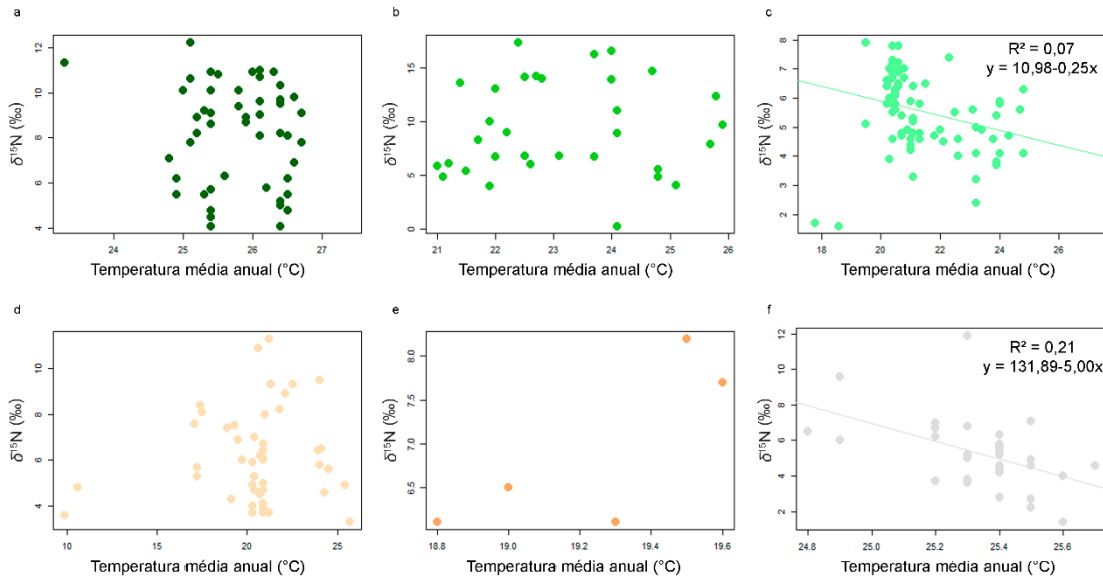
Material suplementar 1.1: Boxplot com valores de a) $\delta^{13}\text{C}$ no solo; e b) $\delta^{15}\text{N}$ no solo em diferentes biomas no Brasil. Letras diferentes indicam que há diferenças significativas ($p < 0,05$) e n é o número de pontos amostrados.



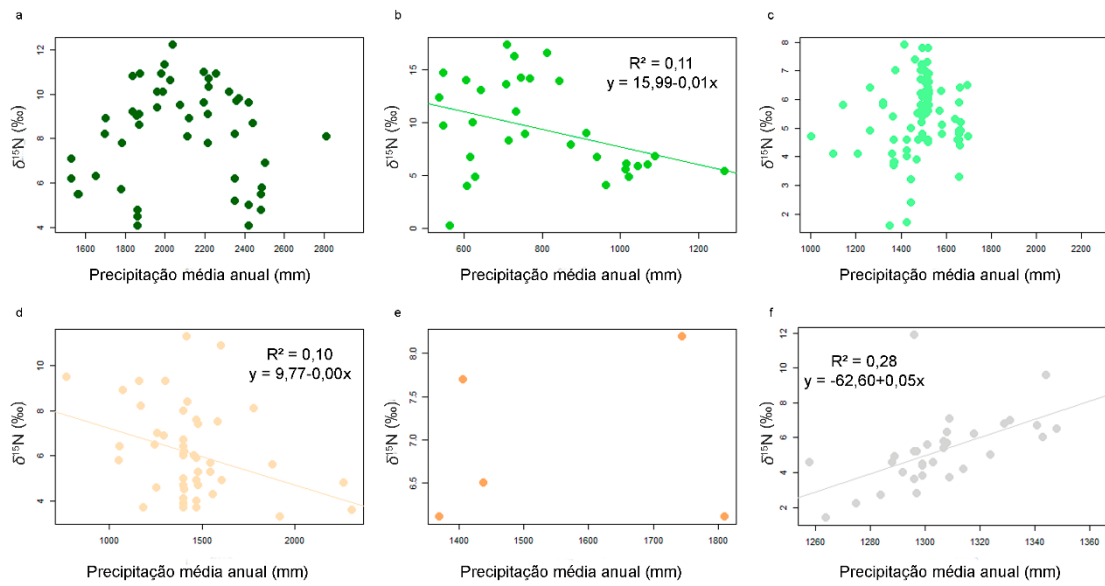
Material suplementar 1.2: Relação entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e a temperatura média anual nos biomas a) Amazônia; b) Caatinga; c) Cerrado; d) Mata Atlântica; e) Pampa; e f) Pantanal. Linhas de tendências indicam que houve relação significativa entre as variáveis ($p < 0,05$). Dados de temperatura foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.



Material suplementar 1.3: Relação entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e a precipitação média anual nos biomas a) Amazônia; b) Caatinga; c) Cerrado; d) Mata Atlântica; e) Pampa; e f) Pantanal. Não houve relação significativa entre as variáveis em nenhum bioma. Dados de precipitação foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.



Material suplementar 1.4: Relação entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a temperatura média anual nos biomas a) Amazônia; b) Caatinga; c) Cerrado; d) Mata Atlântica; e) Pampa; e f) Pantanal. Linhas de tendências indicam que houve relação significativa entre as variáveis ($p < 0,05$). Dados de temperatura foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.



Material suplementar 1.5: Relação entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a precipitação nos biomas a) Amazônia; b) Caatinga; c) Cerrado; d) Mata Atlântica; e) Pampa; e f) Pantanal. Linhas de tendências indicam que houve relação significativa entre as variáveis ($p < 0,05$). Dados de precipitação foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.

Capítulo 2 - Climatic controls on the soil nitrogen isotopic composition in Alisols across the physiographic regions of the northeast Brazil

Fábio Luís de Souza Santos, Vinicius Vasconcelos, Kennedy de Jesus, Antonio Felipe Couto Júnior, Glauber Neves, João Paulo Sena-Souza, Everardo Valadares de Sá Barreto Sampaio, Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, Rômulo Simões Cezar Menezes, Gabriela Bielefeld Nardoto

Artigo submetido para a Revista *Geoderma Regional* em janeiro de 2021

Abstract

Soil nitrogen dynamics in terrestrial ecosystems can be evaluated by analyzing the natural abundances of N isotope ratio mass spectrometry ($\delta^{15}\text{N}$) since $\delta^{15}\text{N}$ integrates decades of organic matter transformations in the soil. On a large scale, the $\delta^{15}\text{N}$ of soil organic matter across climate gradients may provide key insights into understanding regional patterns of N cycling. However, the mechanisms that control N cycling in some tropical regions still present critical gaps, particularly in dry ecosystems. We evaluated the variation of soil $\delta^{15}\text{N}$ in Alisols along the climatic gradient of three physiographic regions in northeast Brazil: Zona da Mata (humid, rainfall well distributed along the year), Agreste (subhumid, rainfall concentrated in 5-7 months) and Sertão (semiarid, rainfall in highly intense events, concentrated over 3-5 months). Soil samples were collected at the 0-20 cm depth layer and analyzed for physical and chemical characteristics, including soil $\delta^{15}\text{N}$ by mass spectrometry. A linear model with physical, chemical, and climatic variables was generated to explain the spatial distribution of the soil $\delta^{15}\text{N}$. The map modeled of values $\delta^{15}\text{N}$ was produced using all observed values and the best performed spatial explicit predictive variables in the model selection – pH, clay content, mean temperature, mean precipitation, and potential of evapotranspiration. Soil $\delta^{15}\text{N}$ was positively related to clay content and negatively related to the pH, temperature, precipitation, and evapotranspiration, expressing differences in nitrogen dynamics along the climatic gradient. In Sertão, the low and erratic rainfall combined with a neutral pH and high temperature provide adequate conditions for nitrogen transformations and cause high soil $\delta^{15}\text{N}$.

Keywords: Temperature; Precipitation; Clay content; *Caatinga*; Alisols; Climatic gradient.

Introduction

Soil nitrogen (N) dynamics in arid and semiarid zones are great uncertainties in global soil nitrogen models (Amundson et al. 2003, Craine et al. 2015). Therefore, vegetation in dry tropical areas, by having their N cycling modulated by water availability, has some of the world's highest $\delta^{15}\text{N}$ signals (Freitas et al. 2010; Wang et al. 2014). This information is fundamental for the global climate change scenario (Houlton et al. 2015), as the intensification of N loss by volatilization in tropical regions due to lower rainfall and higher temperature may lead to changes in the functioning of the ecosystems.

Nitrogen can enter the soil differently, such as biological fixation, atmospheric deposition, or being directly introduced by humans. Biological nitrogen fixation (BNF) occurs through enzymes that catalyze atmospheric N_2 and reduce it to NH_4^+ , produced by bacteria associated with plants or free-living in the soil (Houlton et al. 2008). The transfer of atmospheric nitrogen to the soil is an isotopically non-fractionating process, leading to the $\delta^{15}\text{N}$ signal of the fixed nitrogen close to the atmospheric signal. Atmospheric deposition can introduce particulate, gaseous, or soluble forms of N in the soil and has increased over the last decades (Galloway et al. 2004). Another component influencing the isotopic signal in the soil is nitrogen fertilizers, which insert more soluble forms of N, such as NO_3^- , that can be lost to the atmosphere or leached to groundwater (Wang et al. 2017). These forms interact in a specific way with the soil and biota, defining different isotopic signatures to the total nitrogen content in soil (Robinson 2001). Each transformation (e.g., mineralization, BNF, N deposition) leads to a $\delta^{15}\text{N}$ fractionation, in general, caused by the higher loss of the lighter isotope (^{14}N) than the heavier one (^{15}N). Consequently, the more transformations, the higher the soil $\delta^{15}\text{N}$ value tends to be.

The organic matter decomposition is another critical factor for $\delta^{15}\text{N}$ fractionation (Robinson 2001). Decomposition depends on various environmental factors, like soil pH (Osborne et al. 2017). Several studies have shown that increasing pH increases the values of $\delta^{15}\text{N}$ (Aranibar et al. 2004; Wang et al. 2014) in arid and semiarid ecosystems. The quality of organic matter and soil clay content influence the stability of organic matter, so they are also crucial for soil $\delta^{15}\text{N}$ (Conen et al. 2008, Craine et al. 2015). The time that this organic matter remains in the soil and the environmental conditions determine the transformations under which it is subjected, conditioning the soil $\delta^{15}\text{N}$

values. All transformation processes are influenced by climate (Osborne et al. 2017). Therefore, the climate is one of the factors responsible for N dynamics in ecosystems. Accordingly, there is a relationship between soil $\delta^{15}\text{N}$ and climate, although it is not yet wholly elucidated (Craine et al. 2015).

In general, $\delta^{15}\text{N}$ values are higher in tropical forests than in temperate forests (Martinelli et al. 1999; Amundson et al. 2003) because tropical areas have higher mineralization rates and N rich-organic compounds decomposition. Several studies have shown that the soil $\delta^{15}\text{N}$ tends to decrease with increasing precipitation (Amundson et al. 2003; Nardoto et al. 2008; Freitas et al. 2015, Shan et al. 2019) and have higher values as the temperature increases (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015). All transformations of soil N, like mineralization and nitrification, cause fractionation in N isotopes and increase soil $\delta^{15}\text{N}$ values (Robinson 2001). Global models such as those of Handley et al. (1999) and Craine et al. (2009) indicate the trends of $\delta^{15}\text{N}$ variation. However, due to these ecosystems' complexity, the values of most tropical regions are still poorly understood, especially those of arid regions. According to Aranibar et al. (2004), precipitation's temporal variability may be the key to understanding N cycling in African savannas. However, there is still a gap in this knowledge for the semiarid region of northeastern Brazil.

In Brazil, several studies on the soil N dynamics in the semiarid region, known as *Caatinga* (Freitas et al. 2010; Mendonça et al. 2010; Menezes et al. 2012; Freitas et al. 2015). However, the spatialization of soil $\delta^{15}\text{N}$ has not been presented thus far. This approach can contribute to the existing models and the understanding of the functioning of these ecosystems. In this context, a map of modeled values $\delta^{15}\text{N}$ approach has become widely applied for evaluating N dynamics in the landscape and regional ecological studies (Bowen et al. 2009; Weintraub et al. 2016; Sena-Souza et al. 2020). These maps have been mostly used in conjunction with other elements for identification of the geographic origin of migratory animals (Hobson et al. 2012), but some studies have also used this technique to spatialize soil $\delta^{15}\text{N}$, to understand better the dynamics of natural or human-made ecosystem processes (Amundson et al. 2003; Bai et al. 2013).

The northeast Brazilian region is located within the tropical zone. It has great climatic diversity, particularly in rainfall (Freitas et al. 2015, Pinheiro et al. 2018), including wet, sub-humid, and semiarid areas (Silva et al. 2021). Wet areas are in the Atlantic Forest coastal zone, locally called *Zona da Mata* (IBGE 2001). The *Caatinga*

biome covers 11 % of the Brazilian territory, i.e., one million square kilometers, in the northeast region's interior. Most of it overlaps with the semi-arid area (Menezes et al. 2012), with N concentrations below 2.0 g kg^{-1} , ranging from 0.13 to 3.5 g kg^{-1} (Santos et al. 2020). In the transition to the Atlantic forest, its eastern portion has a subhumid climate and is called *Agreste*. *Caatinga* has high endemic biodiversity, and around 50 % of its original vegetation cover remains relatively intact despite the high deforestation rates (Gariglio et al. 2010). Recent studies have shown that land-use changes can influence the nitrogen cycle dynamic in this biome (Menezes et al. 2012, Ribeiro et al. 2016). Pernambuco state represents the northeast Brazilian region (Silva et al. 2021), concerning the variability of climatic characteristics, soil types, and land uses. Alisol is the predominant class and the only one present in all physiographic regions.

In this context, this study aims to correlate soil nitrogen with environmental variables and verify the distribution pattern of soil $\delta^{15}\text{N}$ along a climatic gradient in the tropical soils of the northeast Brazilian region to understand better the mechanisms that control N cycling in its ecosystems. We hypothesized that soil $\delta^{15}\text{N}$ varies according to climate and edaphic variables, independent of vegetal cover.

Material and Methods

Study area

The study was carried out along a climatic gradient in the Pernambuco state. The state has a territorial extension of approximately 98.937 km^2 , and it is in the northeast Brazilian region, most of it covered by the *Caatinga* biome (Fig. 2.1). Pernambuco is bordered to the north by the states of Ceará and Paraíba, to the east by the Atlantic Ocean, to the west by the states of Bahia and Piauí, and the south by the states of Alagoas and Bahia. The north-south direction has a width that varies between 111 and 180 km, and its east-west length is approximately 630 km (Araújo Filho et al. 2000). The average annual rainfall in the state ranges from 400 to 2400 mm, and the mean annual temperature from $20 \text{ }^\circ\text{C}$ to $27 \text{ }^\circ\text{C}$.

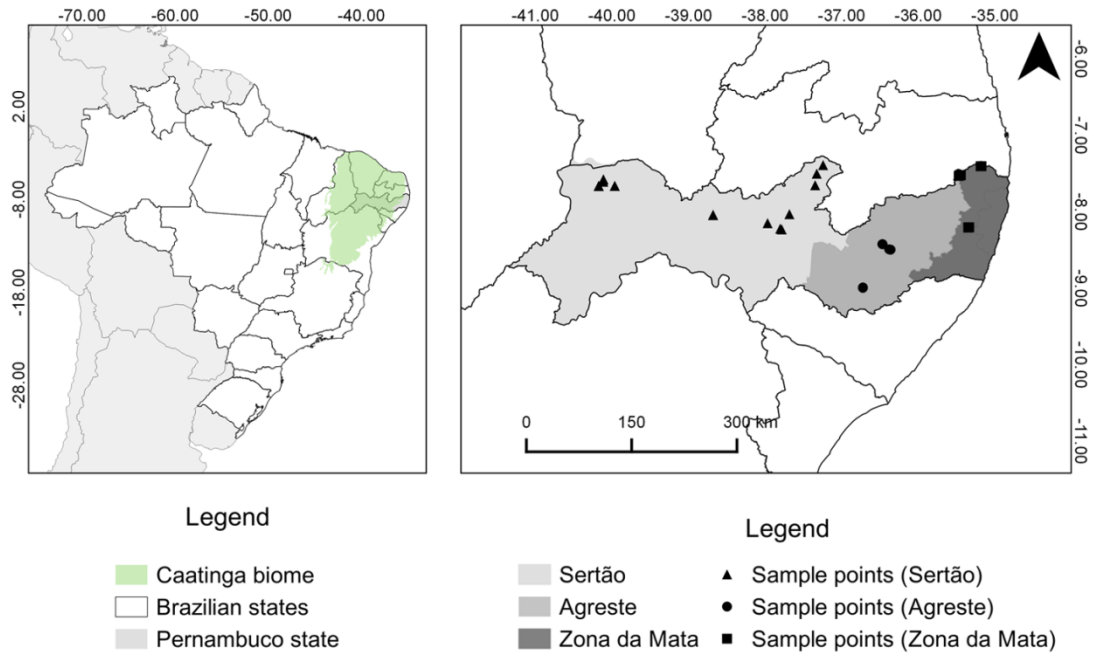


Fig. 2.1: Location and soil sample points regions along a climatic gradient in three physiographic regions of the Pernambuco state, northeast Brazil.

Northeast Brazilian has three physiographic regions (Tab. 1): Zona da Mata (ZM), Agreste (AG), and Sertão (SE) (IBGE 2001). ZM has a warm and humid tropical climate. The original vegetation coverage was tropical rainforest, known as the Atlantic Forest, more than 95 % replaced by crops, mainly sugarcane (CONDEPE/FIDEM 2006). AG is a transition zone between ZM and SE, part of it on the Borborema mountain range, with altitudes from 300 to 1000 m. This zone has climate and vegetation types ranging from the humid tropical rainforest of the Atlantic Forest to the semiarid deciduous tropical *Caatinga* typical of the Sertão. Total annual rainfall is similar to that of SE but better distributed over 5 to 7 months. *Caatinga* has been partially replaced mainly by pastures and temporary crops, especially in the Agreste zone (Gariglio et al. 2010). SE is located entirely in the state's semiarid area. The climate is hot and dry, with high temperatures and scarce rainfall, which is poorly distributed and concentrated during three to five months of the year (Fig. 2.2). The predominant vegetation is shrub-tree *Caatinga*, in different regeneration stages due to their use in seasonal agriculture, as firewood and native pastures (CONDEPE/FIDEM 2006) (Tab. 2.1).

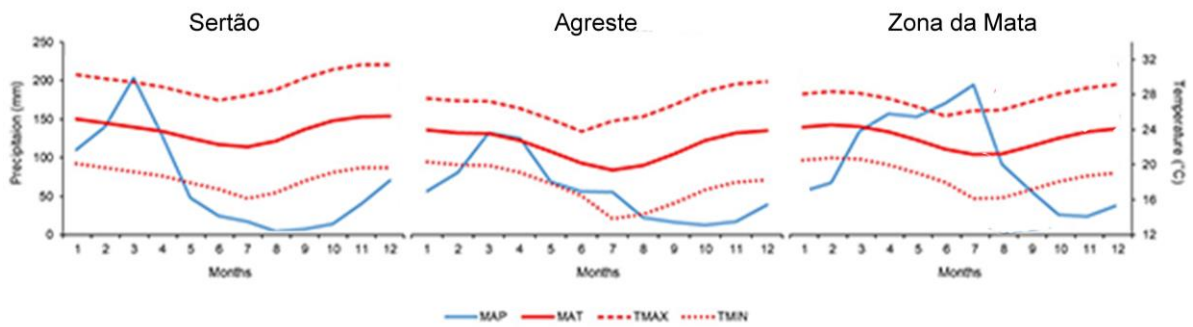


Fig. 2.2: MAP: mean annual precipitation, MAT: mean annual temperature, TMIN: minimum temperature, TMAX: maximum temperature along of the year in the Sertão (west), Agreste (central), and Zona da Mata (east) in the Pernambuco state, northeast Brazil.

Tab. 2.1: Climatic characteristics of physiographic regions in Pernambuco state, northeast Brazil.

Region	Main vegetation cover	Area (km ²)	Altitude (m)	MAP (mm)	MAT (°C)
ZM	Atlantic Forest/Sugarcane	8,738	0-200	1200-2400	24-25
AG	Dry forest/Corn and beans	24,396	300-1000	750-1500	20-22
SE	Shrub-tree Caatinga/Pasture	62,726	250-400	400-800	24-27

ZM: Zona da Mata. AG: Agreste. SE: Sertão. MAP: mean annual precipitation, MAT: mean annual temperature.

There are no significant fluctuations in surface air temperature in Pernambuco and the entire northeastern part of Brazil. SE has the highest evapotranspiration rates, ranging between 1200 and 2000 mm per year. While there are high evapotranspiration rates and little rainfall in the SE, the ZM exhibits the same potential evapotranspiration behavior, though with significantly higher rainfall. Evapotranspiration changes according to land cover predominance in Pernambuco (Santos et al. 2017). The higher precipitation explains, in part, the great differences in the soil and phytogeographic conditions of the zones (Pinheiro et al. 2018).

Collection, processing, and analysis of soil samples

In total, 34 points were sampled along the climatic gradient in the state of Pernambuco, distributed throughout 13 municipalities in the three physiographic regions: Zona da Mata, Agreste, and Sertão (Fig. 1). The points were selected considering the climatic variability and are representative of each physiographic zone.

Of these points, 11 were sampled in native vegetation areas (NAT), 11 in pastures (PAS), and 12 in agricultural fields (AF). The pastures and agricultural fields are small rural properties, which do not usually use fertilizers in their cultivation. At each point, samples of the soil profile were collected in the 0-20 cm superficial layer. All samples were collected in Alisols, which cover nearly a quarter of the Pernambuco area and are present in all physiographic regions.

The soil samples were collected from trenches, one at each site and measuring 0.7 x 0.7 x 1.0 m. Surface litter materials were removed from each collection point before sampling to avoid contamination. The collected samples were conditioned in plastic bags, labeled, and sent to the Federal University of Pernambuco's soil fertility laboratory. The pH in H₂O was estimated using a potentiometer and texture by the hydrometer method. Both analyses were performed by the methods described by Embrapa (1997).

The soil samples were air-dried and sieved using a 2 mm sieve and macerated in a mortar through a 100 mesh (0.149 mm) sieve. Sub-samples of 20 to 100 mg were weighed and packed into aluminum capsules that were placed in an elemental analyzer (Carlo Erba, 1110 model, Milan, Italy), which determines the concentration of carbon (C) and total nitrogen by combustion, allowing for the calculation of the C/N ratio by dividing the two concentrations. Isotopic signatures of C ($\delta^{13}\text{C}$) and N ($\delta^{15}\text{N}$) were provided by an isotopic mass spectrometer (Thermo Quest-Finnigan Delta Plus), coupled to the elemental analyzer. The $\delta^{13}\text{C}$ and the $\delta^{15}\text{N}$ express the ratio of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in the sample (R sample), relative to the international standards, the isotopic composition of the C in Pee Dee Belamite (PDB; limestone from the Grant Canyon region, USA) and of atmospheric N, in deviations per thousand (‰): $\delta = (\text{R sample}/\text{R standard}-1) \times 1000$. These analyses were carried out in the Isotopic Ecology laboratory, CENA/USP. The error associated with $\delta^{13}\text{C}$ is ± 0.2 ‰, and with $\delta^{15}\text{N}$, it is ± 0.4 ‰.

Acquisition of climatic data

Data related to the mean annual precipitation (MAP), mean annual temperature (MAT), temperature range (RAN) - the difference between the maximum and minimum temperatures - and solar radiation (RAD) were extracted from the WorldClim platform, version 2.0 (www.worldclim.org). The data are compiled in monthly averages along 30

years historical series, between 1970 and 2000, constructed by selecting the best performing model for each region and variable with global cross-validation correlations ≥ 0.99 for temperature and humidity, 0.86 for precipitation, and 0.76 for wind speed (Fick and Hijmans 2017). The Global Aridity Index (AI) and Potential Evapotranspiration (PET) also both modeled using the data available from the WorldClim platform (Trabucco and Zomer 2019). The methods used to derive these datasets and the data dictionary are described in Zomer et al. (2008). These data are related to evapotranspiration processes and rainfall deficit for potential vegetative growth, based on the implementation of a Penman-Montieth Reference Evapotranspiration (ET₀) equation. The WorldClim data have a resolution of 30 seconds, corresponding to an area of approximately 1 km².

Data were collected from HidroWeb platform rainfall stations (ANA 2013 - <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>), from two ZM stations (Itambé - 735072 and Vitória de Santo Antão - 835068), two AG stations (São Bento do Una - 836037 and Saloá - 836014) and three SE stations (Betânia - 838005, Bodocó - 739021 and Custódia - 837053). These stations are in municipalities where soil samples for this study were collected, and they summarize monthly precipitation information from the physiographic regions. Data were selected from the period beginning in 1970 and continuing up to the latest measurements of each station, as the WorldClim platform has data starting from that date. Hidroweb values for the maximum precipitation in one day, maximum rainfall in one month, and the number of rainfall days were used. Using these data were calculated the average monthly rainfall (Eq. 2.1), the average number of rainfall days (Eq. 2.2), and the precipitation intensity per rainfall day (Eq. 2.3).

$$AMR = \sum nMPD/nMPD \quad \text{Eq. 2.1}$$

Where AMR is the average monthly rainfall, and MPD is the maximum precipitation in a day.

$$ANRD = \sum nNRD/nNRD \quad \text{Eq. 2.2}$$

Where ANRD is the average number of rainfall days in the month, and NRD is the number of rainfall days in the month.

$$IPRD = MPM/ANRD \quad \text{Eq. 2.3}$$

Where IPRD is the intensity of precipitation per rainfall day, MPM is the mean rainfall per month, and ANRD is the average number of rainfall days.

Data analysis

The soil $\delta^{15}\text{N}$ values were subjected to a residuals' normality analysis by the Shapiro-Wilk method. After verifying the normality of the data, variance analysis (ANOVA) was carried out between the different vegetal covers (AF, NAT and PAS) to verify a possible influence of land use in soil distribution $\delta^{15}\text{N}$ values. A boxplot was also generated (Material suplementar 2.1). Statistical analyses were performed using the R program (R Core Team, 2018).

The explanatory variable candidates were selected so that they could either be available as geospatial climatic data (MAP, MAT, RAN, RAD, PET, AI) or they could be easily estimated or measured in the field (C concentration, soil $\delta^{13}\text{C}$, C/N ratio, clay content, soil pH see Tab. 2.2). To obtain the most interpretable linear models, the selection of explanatory variables for the candidates' models was made by checking the correlation between variables, using Variance Inflation Factor (VIF) in "car" package. Were also made regressions replacing MAT with RAN and MAP and PET with Aridity Index (MAP/PET ratio).

Various models were generated with the selected variables, and the best model was selected using the AIC method (Material suplementar 2.2). All models have the soil $\delta^{15}\text{N}$ like response variable and geospatial climatic data and file data like predictor variables. The general linear models were computed using the lm function in R software (R Core Team, 2018). The generalized linear models use binomial distribution assumption. The log-link function was calculated using the glm function in R. The predictions of the models were computed and plotted using the "effects" package in R.

To improve visualization and the spatial interpretation of results, we created a soil $\delta^{15}\text{N}$ map using all observed values and the best performed spatial explicit predictive variables in the model selection. We performed a multiple linear regression model between observed soil $\delta^{15}\text{N}$ and soil pH, clay content, MAT, MAP, and PET. We tested the residuals' normality with a Shapiro-Wilk test and the spatial autocorrelation with the Moran's Index. Then, we applied the equation from the regression to the spatial explicit environmental variables to create the soil $\delta^{15}\text{N}$ isoscape in the study area.

Results

Zona da Mata (ZM) soils had the highest C and N concentrations, with maximum values of 4.88 % and 0.31 %, respectively. The lowest values occurred in Sertão (SE) pastoral areas, with a minimum value of 0.21 % for C and 0.03 % for N. The overall mean of C was 1.65 %, and that of N was 0.13 % (Tab. 2.2). ZM soils had higher C/N ratio values than those in Agreste (AG) and SE, with variation from 7.79 to 17.48 and an average of 11.75 (Tab. 2.2).

Soil $\delta^{15}\text{N}$ values varied between 4.3 ‰ and 17.3 ‰ and $\delta^{13}\text{C}$ values from -26.5 ‰ to -17.7 ‰. The mean annual temperature ranged from 20.9 °C to 24.4 °C, with the highest temperatures recorded in the ZM and the lowest in the SE. The temperature range amplitude varied from 11.9 °C to 16.7 °C. The smallest amplitudes are in the ZM and the largest in the SE. The mean annual precipitation was between 594 mm and 1280 mm. AI varied between 0.9 in SE and 4.0 in ZM (Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Description of sample points, physical and chemical soil variables in the 0 to 20 cm depth (carbon concentration, C/N ratio, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, pH and clay content) and climatic variables (mean annual precipitation and temperature - MAP and MAT; temperature range - RAN; solar radiation – RAD; mean annual evapotranspiration – PET and Aridity index - AI) of physiographic regions along a climate gradient in Pernambuco state, northeast Brazil.

Region	Cover	Area description	C (%)	C/N ratio	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	pH	Clay (%)	MAT* (°C)	RAN* (°C)	MAP* (mm)	RAD* (kJ m ⁻² day ⁻¹)	PET** (mm)	AI
ZM	NAT	Atlantic Forest	3.98	16.01	-26.2	6.5	5.2	22	24.1	13.6	1248	18340	1678	3.9
ZM	NAT	Atlantic Forest	2.65	12.93	-24.8	8.9	5.5	24	22.1	13.6	1076	18839	1591	3.2
ZM	NAT	Atlantic forest	4.35	13.81	-26.5	9.3	5.5	26	22.5	11.9	1163	18912	1546	3.5
ZM	PAS	Brachiaria spp.	4.26	14.83	-21.1	6.8	5.2	22	24.4	13.6	1280	18340	1691	4.0
ZM	PAS	Mixed grasses	1.59	11.82	-20.4	8.6	5.5	23	22.6	13.4	1089	18839	1597	3.2
ZM	PAS	Mixed grasses	2.34	13.03	-19.8	7.8	5.5	26	22.5	11.9	1163	18912	1547	3.5
ZM	AF	Sugarcane, 25 years	2.12	14.25	-17.7	9.4	5.5	25	22.5	11.9	1178	18912	1552	3.5
ZM	AF	Sugarcane	2.20	12.49	-19.9	9.9	5.5	22	23.0	13.3	1083	18839	1628	3.2

ZM	AF	Sugarcane >5 years	2.62	13.70	-23.2	7.4	5.1	21	24.3	13.6	1260	18340	1681	4.0
AG	NAT	Dense Caatinga	2.19	11.29	-24.4	13.6	6.2	17	21.4	15.9	708	18161	1567	1.8
AG	NAT	Dense Caatinga	1.33	11.52	-24.9	10.0	6.2	17	21.9	15.7	622	18161	1581	1.6
AG	PAS	Pasture	1.72	11.26	-22.2	13.1	6.2	17	21.6	15.9	702	18161	1569	2.3
AG	PAS	Pasture > 3 years	0.96	10.14	-20.5	13.9	6.3	18	21.9	15.6	623	18161	1576	1.8
AG	PAS	Pasture >50 years	1.78	9.40	-19.2	12.4	6.0	18	20.9	15.5	835	18249	1477	1.2
AG	AF	Maize, 4 years	0.99	12.13	-24.8	11.3	6.2	17	21.6	15.8	703	18161	1568	2.1
AG	AF	Cassava	0.54	10.47	-25.2	15.3	6.3	18	21.9	15.6	623	18161	1576	1.8
AG	AF	Maize and beans	1.13	9.93	-22.4	11.6	6.1	18	21.0	15.7	843	18249	1479	1.2
SE	NAT	Caatinga	1.79	10.58	-23.5	14.0	6.2	20	22.8	15.9	605	18166	1650	1.9
SE	NAT	Caatinga	0.75	10.45	-24.6	8.3	6.1	20	21.7	14.3	715	18233	1581	1.4
SE	NAT	Caatinga	1.35	9.36	-25.1	17.3	6.1	20	22.4	15.4	710	18205	1626	1.8
SE	PAS	Pasture, 15 years	0.84	10.28	-22.4	11.7	6.4	18	22.9	15.9	596	18166	1649	1.6
SE	PAS	Pasture, 40 years	2.27	11.42	-23.2	9.8	6.1	20	22.5	14.6	675	18371	1621	1.5
SE	PAS	Pasture, 50 years	0.21	7.79	-22.8	9.4	6.5	18	23.1	16.0	609	18056	1665	1.5
SE	AF	Maize and beans	0.40	9.29	-21.9	12.6	6.4	19	23.0	15.0	594	18299	1680	1.5
SE	AF	Beans	0.73	10.92	-25.6	14.5	6.2	23	23.5	16.7	730	17535	1735	1.3
SE	AF	Beans	0.53	8.91	-25.1	12.8	6.2	24	23.5	16.7	735	17535	1731	1.6
SE	NAT	Caatinga	0.86	13.12	-26.4	16.5	6.2	19	24.0	15.4	813	17144	1760	1.0
SE	NAT	Caatinga	1.13	13.53	-25.8	13.9	6.1	22	24.0	14.9	845	17196	1752	1.1
SE	NAT	Caatinga	1.33	12.45	-25.3	8.9	6.0	18	24.1	15.5	756	17224	1763	1.3
SE	PAS	Native pasture	0.42	10.97	-24.6	15.1	6.2	19	24.0	15.4	813	17144	1760	1.0
SE	PAS	Native pasture	1.11	12.92	-25.1	13.1	6.1	22	24.1	15.0	840	17196	1760	1.1
SE	AF	Maize and beans	1.06	10.45	-21.1	13.9	6.2	19	24.0	15.4	813	17144	1759	1.1
SE	AF	Beans, maize, cassava	0.60	11.03	-24.3	11.5	6.1	22	24.0	14.9	845	17196	1754	0.9

ZM: Zona da Mata. AG: Agreste. SE: Sertão. NAT: Native vegetation. PAS: Pasture. AF: Agricultural field.

*Data extracted from the WorldClim platform (www.worldclim.org), with a resolution of 30 s, corresponding to an area ~1 km².

The ZM has more rainfall days, is well distributed throughout the year, and the highest average rainfall in the state. SE zone has the highest rainfall intensity on rainy days (Tab. 2.3).

Tab. 2.3: Rainfall characteristics in physiographic regions along a climatic gradient in Pernambuco state, northeast Brazil.

Region	Average monthly rainfall (mm)	Average number of rainfall days in the month (day)	Intensity of precipitation per rainfall day (mm)	Maximum rainfall in one month (mm)
ZM	92.7	11.1	8.3	645.0
AG	56.7	7.3	7.8	254.3
SE	52.3	4.0	13.1	530.5

ZM: Zona da Mata. AG: Agreste. SE: Sertão. Data extracted from the HidroWeb platform (www.snirh.gov.br/hidroweb) from two ZM stations (Itambé - 735072 and Vitória de Santo Antão-835068), two AG stations (São Bento do Una - 836037 and Saloá - 836014) and three SE stations (Betânia - 838005, Bodocó - 739021 and Custódia - 837053). Data were selected from the period beginning in 1970 and continuing up to the latest measurements of each station.

The soil $\delta^{15}\text{N}$ values present normal distribution according to the Shapiro-Wilk test ($W = 0.97$, $p = 0.46$). The different covers (AF, NAT, and PAS) did not influence the distribution of soil $\delta^{15}\text{N}$ values according to the ANOVA test ($p = 0.87$) in Pernambuco state (Material suplementar 2.1). The model selected by the AIC method relates the distribution of soil $\delta^{15}\text{N}$ values according to the following predictor variables: carbon, pH, clay, MAT, MAP, and PET (Adjusted $R^2 = 0.61$, $F = 9.59$ on 6 and 27 D.F., $p = 1.133\text{e-}05$). The relationships between soil $\delta^{15}\text{N}$ and variables of selected model (Fig. 2.3), among these variables, pH, clay, MAT, MAP, and PET had a significant relationship with soil $\delta^{15}\text{N}$ ($p < 0.05$). Cook's distance indicated that there are no outliers within the points sampled. Residues followed normal distribution according to the Shapiro-Wilk test ($W = 0.98$, $p = 0.65$). There was spatial self-correlation (Moran Index: 0.5313933, $p = 5.593085\text{e-}08$). More model details are presented in Material suplementar 2.2 and 2.3.

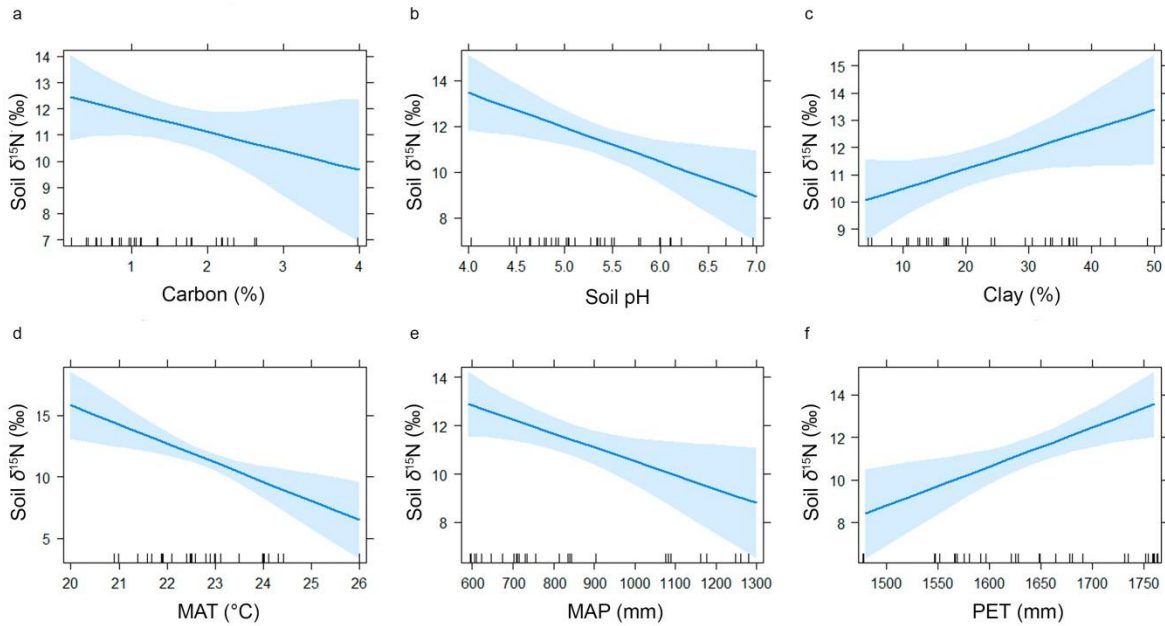


Fig. 2.3: Relationship across a selected linear model of soil $\delta^{15}\text{N}$ and a) soil carbon; b) pH; c) clay content; d) Mean annual temperature (MAT); e) Mean annual precipitation (MAP); and f) Potential of evapotranspiration (PET) in Alisols under different land uses along a climatic gradient in Pernambuco state, northeast Brazil. Lines represent mean values, and the blue area represents the standard deviation at 95% probability. The relationships of soil $\delta^{15}\text{N}$ with soil pH, clay, MAT, MAP, and PET were significant ($p < 0.05$).

The map of $\delta^{15}\text{N}$ modeled values shows that considering the climatic variables, the lowest soil $\delta^{15}\text{N}$ values are more concentrated in the eastern part, where the ZM is located (Fig. 2.4). The highest values are in the AG and SE zones, which are in the center and west.

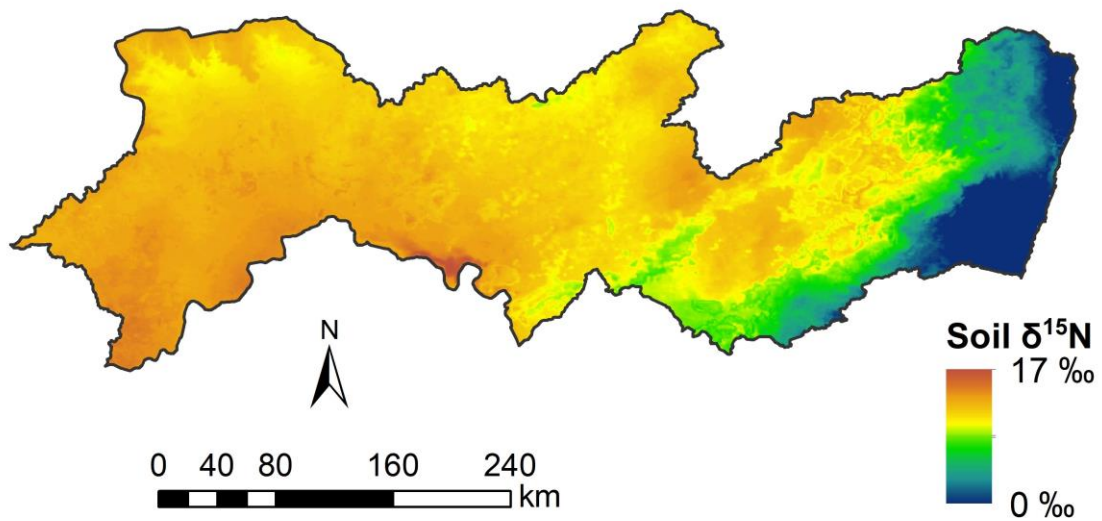


Fig. 2.4: Map of soil $\delta^{15}\text{N}$ modeled values under Alisols in different land uses along a climate gradient in northeast Brazil. Multiple regression model map performed with the best spatial explicit variables: $\text{Soil } \delta^{15}\text{N} = 0.019743 * \text{PET} - 1.372573 * \text{MAT} - 0.006085 * \text{MAP} + 15.406926$; $R^2 = 0.53$; $p\text{-value} < 0.0001$; Residuals' shapiro-wilk $W = 0.98273$, $p\text{-value} = 0.8541$; Residual Moran's $I = 0.34$, $p\text{-value} < 0.05$.

Discussion

The MAT and PET are the predominant climatic variables for predicting soil nitrogen isotopic values in the Pernambuco state. They summarize water balance information, using rainfall and potential evapotranspiration data, indicating that more arid zones have faster soil N cycling, reflected in the larger $\delta^{15}\text{N}$ values. Clay content is also an essential factor for this dynamic since it acts in soil organic matter (SOM) stabilization. Our results showed that MAT, MAP, PET, soil pH, and clay content are the main drivers of the soil $\delta^{15}\text{N}$ spatial patterns along climatic gradient, independent of land uses. Microbial activity, mineralization and decomposition of soil N occur in the presence of water. The rainfall regime in northeastern Brazil's driest regions is concentrated in a single period of precipitation during the year. During this period, intense N transformations occur in the soil, increasing the $\delta^{15}\text{N}$ values, especially because clay tends to retain this water longer in the soil.

The carbon cycle is also related to these variables and sensitive to the soil's vegetal cover. The higher soil C concentrations in the wetter zones indicate that

increasing water availability leads to higher biomass production, which means greater deposition of C into the soil (Lal 2005). These dynamics also help explain the distribution of stable C isotopes since the species composition and the photosynthesis efficiency depend on the water availability (Dalmagro et al. 2016). Soil $\delta^{13}\text{C}$ values reflected the current and historical land use and land cover in each site. The lower $\delta^{13}\text{C}$ values in the areas under native vegetation demonstrate the predominance of C_3 plants and are characteristic of soils under forested areas. Similar values were reported by Pinheiro et al. (2010) in studies carried out in the Atlantic rainforest and those carried out in other Brazilian biomes (Jantalia et al. 2007; Costa Júnior et al. 2011). Native species with a C_4 photosynthetic cycle in arid regions explain intermediate $\delta^{13}\text{C}$ values. For many years, the higher $\delta^{13}\text{C}$ values in areas converted to pastures or agricultural use reflect exotic C_4 plants' presence. Recent pastures or agricultural areas (< 5 years) still present signals of native vegetation, which indicates that Alisols take longer to incorporate SOM from the new land cover.

Soil $\delta^{15}\text{N}$ values found in the wetter areas are higher than those reported by Freitas et al. (2015), which varied between 3 and 6 ‰ in the 0-20 cm layer. This suggests that the areas may restrain different plant compositions, modifying N input pathways' predominance and strength, especially those of biological fixation. Sant'Anna et al. (2018) observed that residues from N-fixing legumes could also emit N_2O into the atmosphere in southeastern Brazil. Our results are not capable of proving this effect. However, the high values of soil $\delta^{15}\text{N}$ may indicate that the N from legumes is not marked in our soils due to the low intensity of cultivation, the rotation of crops, or the high decomposition rate of the MOS. Therefore, vegetal covers have no significant effect on our model.

Soil $\delta^{15}\text{N}$ spatial distribution responds to the precipitation gradient in the Alisols of northeast Brazil. $\delta^{15}\text{N}$ increases with the decrease of these variables and with the increase of evapotranspiration. The relationship between soil $\delta^{15}\text{N}$ and rainfall has also been reported in global studies, such as those of Handley et al. (1999) and Craine et al. (2015), and this trend also occurs in arid environments (Aranibar et al. 2004; 2008; Wang et al. 2014; Freitas et al. 2015; Liu et al. 2017). Amundson et al. (2003) and Weintraub et al. (2016) indicated a positive relationship between temperature and $\delta^{15}\text{N}$ in global studies. However, in the Pernambuco state, the mean annual temperature behavior follows the precipitation pattern, and both show a negative relation with soil

$\delta^{15}\text{N}$. Higher temperatures contribute to the greater activity of organisms in the soil, which would increase the soil ^{15}N values. However, differences in mean annual temperature are small, and the whole gradient has a temperature average above 20°C , which allows the activity of these organisms. In addition to the climate, other factors may influence soil nitrogen dynamics on different scales, such as land coverage (Osborne et al. 2017) and soil physical-chemical variables such as clay content (Conen et al. 2008; Craine et al. 2015).

Soil organic matter dynamics are closely related to soil clay content. In several soils type, clay content can increase SOM stability (Conen et al. 2008). This stability favors the organic matter bound to the minerals to the detriment of the SOM bound to the particulates present in the clay fraction (Conen et al. 2008). A higher amount of clay provides a higher value of $\delta^{15}\text{N}$ in the soil (Luce et al. 2014, Shan et al. 2019), due to the higher nitrogen stability in these soils, which retains the heavier isotopes, increasing $\delta^{15}\text{N}$ (Conen et al. 2008; Craine et al. 2015). Our model indicates that MAT, PET, and clay content are the factors that explain most of the N dynamic patterns in the soils of Pernambuco. However, the relations of $\delta^{15}\text{N}$ with soil characteristics can go beyond soil clay content (Rasmussen et al. 2018).

In tropical zones, there is a high flow of organic N to inorganic N (Martinelli et al. 1999), which can be easily lost by volatilization or leaching. In dry tropical zones, this cycle tends to be even more open, intensifying these losses (Freitas et al. 2010), mainly by volatilization. Volatilization is the N transformation that presents the largest isotopic fractionation factor, reaching up to 60‰ (Robinson 2001). The losses by volatilization preferentially take the lighter isotopes (^{14}N), and the soil remains enriched in ^{15}N (Handley et al. 1999; Aranibar et al. 2004). Besides, ammonia volatilization is favored in soils with high pH (next to 7.0), common in arid environments (Wang et al. 2014; Houlton et al. 2015). However, in our study, the pH values in semi-arid regions range up to 6.5. Under the native vegetation of Caatinga, the average N_2O emission is $0.23 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Ribeiro et al. 2016). Although this emission is not directly related to volatilization, it indicates that there are losses of N in these regions through biological activity, increasing the soil $\delta^{15}\text{N}$ (Robinson 2001). Therefore, losses of N by volatilization in these regions are not the only reason for the $\delta^{15}\text{N}$ to be higher in the dry areas. Although BNF is important in the Caatinga (Freitas et al. 2015), some plants do

not use atmospheric nitrogen but rather soil mineral nitrogen, which has higher $\delta^{15}\text{N}$ values (Hogberg 1997). Consequently, the soil $\delta^{15}\text{N}$ under Caatinga has higher values.

Liu et al. (2017) observed that the $\delta^{15}\text{N}$ of nitrate (NO_3^-) is positively related to rainfall in arid regions and negatively associated with it in semiarid regions. According to Aranibar et al. (2008), mineralization and decomposition rates do not follow this climatic pattern. This change indicates that other factors contribute to soil nitrogen dynamics, such as relief, soil type, or vegetation coverage. Additionally, there may be different controls for each climate regime (Amundson et al. 2003; Aranibar et al. 2004). However, the vegetation cover did not influence the soil $\delta^{15}\text{N}$ values, and we have the same soil type and relief. Therefore, the results indicate that SOM control is more related to climatic variables in the northeast Brazil, especially the precipitation and rainfall regime (Freitas et al. 2015).

The modeled soil $\delta^{15}\text{N}$ map clearly showed the N cycle's spatial patterns in the soil in Pernambuco. The use of soil nitrogen spatial models (isoscapes) as a basis for interpretation and modeling of the N cycle has been used successfully in the literature (Weintraub et al. 2016; Sena-Souza et al. 2020). Our map shows that the predicted soil $\delta^{15}\text{N}$ increased from east to west across Pernambuco state. This spatial pattern was captured on the continental scale by Sena-Souza et al. (2020), which published a soil $\delta^{15}\text{N}$ map for South America. However, our model represented the highest values of soil $\delta^{15}\text{N}$ (17‰), closer to the range found in the observed data, against 14.2‰ of the continental model (Sena-Souza et al. 2020). This indicates that our spatial model better represents the soil $\delta^{15}\text{N}$ in the studied area. Besides, the modeled spatial pattern is consistent with the climatic regime and the physiographic regions. In the semiarid Sertão, rainfall is characterized by highly intense events concentrated over a short period. These characteristics, combined with a low soil C/N ratio and soil pH between 5.0 and 6.5, provide adequate conditions for activity of soil microorganisms, mineralization and decomposition during the rainy season and cause this zone's soil to have higher $\delta^{15}\text{N}$. Soils from drier areas may lose more N by volatilization, which provides high fractionation and increases the $\delta^{15}\text{N}$ values. Still, this factor alone does not explain the high $\delta^{15}\text{N}$ values throughout the entire state. The values above 7‰ in the Zona da Mata indicate that there are also adequate conditions leading to N transformations, though they occur less intensely. This condition is mainly related to this soil's pH, which remains humid throughout most of the year.

Conclusion

The soil $\delta^{15}\text{N}$ in the northeast Brazil is driven mainly for climate variables, like precipitation and evapotranspiration, and edaphic variables, like pH and clay. The higher $\delta^{15}\text{N}$ values are in Sertão, where the rainfall has events concentrated over a short period. The Sertão has a low soil C/N ratio and soil pH adequate for mineralization and decomposition when water is available. The rainfall regime, organic matter quality, and stability of SOM through clay are the factors that contribute to the distribution of soil $\delta^{15}\text{N}$ values in the northeast Brazil.

Funding sources

This work was support provided by the project "Impactos de mudanças climáticas sobre a cobertura e uso da terra em Pernambuco: geração e disponibilização de informações para o subsídio a políticas públicas (FACEPE-0077-5.01/09 and FAPESP 2009/52468-0)"; "Consolidação do Núcleo de Pesquisas em Dinâmica da Água e de Carbono em Ecossistemas no Estado de Pernambuco (Edital 08/2014 FACEPE PRONEM, APQ-0532-5.01/14)" and ONDACBC: National Observatory of Water and Carbon Dynamics in the Caatinga Biome (465764/2014-2). This study was also financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001 (studentship for first author).

References

- Agência Nacional de Águas (ANA). HidroWeb: *Sistema de informações hidrológicas*. Disponível em: www.snirh.gov.br/hidroweb. Acessado em: 19 de setembro de 2018.
- Amundson, R G, A T Austin, E A G Schuur, K Yoo, V Matzek, C Kendall, A Uebersax, D Brenner, and W T Baisden. 2003. "Global Patterns of the Isotopic Composition of Soil and Plant Nitrogen." *Global Biogeochemical Cycles* 17 (1): 10. <https://doi.org/10.1029/2002GB001903>.
- Aranibar, J N, I C Anderson, H E Epstein, C J W Feral, R J Swap, J Ramontsho, and S A Macko. 2008. "Nitrogen Isotope Composition of Soils, C3 and C4 Plants along Land

Use Gradients in Southern Africa.” *Journal of Arid Environments* 72 (4): 326–37. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.007>.

Aranibar, J N, L Otter, S A Macko, C. J.W. Feral, H. E. Epstein, P R Dowty, F Eckardt, H H Shugart, and R. J. Swap. 2004. “Nitrogen Cycling in the Soil-Plant System along a Precipitation Gradient in the Kalahari Sands.” *Global Change Biology*, 259–373. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2003.00698.x>.

Araújo Filho, J C, N Burgos, O F Lopes, F H B Silva, L A R Medeiros, H F R Melo Filho, R B V Parahyba, A C Cavalcanti, M B Oliveira Neto, F B R Silva, A P Leite, J C P Santos, N C Sousa Neto, A B Silva, L R Q P Luz, P C Lima, R M Reis, and A H Barros. 2000. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. Rio de Janeiro: Embrapa solos, Boletim de Pesquisa. 11, 382 p.

Bai, E, T W Boutton, F Liu, X B Wu, and S R Archer. 2013. ¹⁵N isoscapes in a subtropical savanna parkland: spatial-temporal perspectives. *Ecosphere*. 4(1):4.

Berhe, A A. 2012. Decomposition of organic substrates at eroding vs. depositional landform positions. *Plant Soil*. 350, 261-280.

Bowen, G J, J B West, B B Vaughn, T E Dawson, J R Ehleringer, M L Fogel, K Hobson, J Hoogewerff, C Kendall, C T Lai, C C Miller, D Noone, H Schwarcz, and C J Still. 2009. Isoscapes to Address Large-Scale Earth Science Challenges. *Eos*. 90, 13, 31.

Agência estadual de planejamento e pesquisas de Pernambuco - CONDEPE/FIDEM (2006). Aspectos geoambientais e socioeconômicos da bacia hidrográfica do Rio Una, grupos de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos GL 4 e GL 5. Recife, PE: Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco. 3, 85 p.

Conen, F, M Zimmermann, J Leifeld, B Seth, and C Alewell. 2008. “Relative Stability of Soil Carbon Revealed by Shifts in $\delta^{15}\text{N}$ and C : N Ratio.” *Biogeosciences* 5: 123–28.

Conrad, O, B Bechtel, M Bock, H Dietrich, E Fischer, L Gerlitz, J Wehberg, V Wichmann, and Boehner. 2015. “System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4.” *Geosci. Model Dev*. 8, 1991-2007. doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

Costa Junior, C, M C Piccolo, M Siqueira Neto, P B Camargo, C C Cerri, and M Bernoux. 2011. “Carbono total e ^{13}C em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado.” *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 35, n. 4, p. 1241-1252.

Craine, J M, A J Elmore, M P M Aidar, M M C Bustamante, T E Dawson, E A, Hobbie, A Kahmen, M C Mack, K K McLauchlan, A Michelsen, G B Nardoto, L H Pardo, J Peñuelas, P B Reich, E A G Schuur, W D Stock, P H Templer, R A Virginia, J M Welker, and L L Wright. 2009. “Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability.” *New Phytol.* 183,980–992.

Craine, J M, A J Elmore, L Wang, L Augusto, W T Baisden, E N J Brookshire, M D Cramer, N J Hasselquist, E A Hobbie, A Kahmen, et al. 2015. “Convergence of Soil Nitrogen Isotopes across Global Climate Gradients.” *Scientific Reports* 5: 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep08280>.

Dalmagro, H J, M J. Lathuillière, G L Vourlitis, R C Campos, O B Pinto, M S Johnson, C E R Ortíz, F A Lobo, and E G Couto. 2016. "Physiological Responses to Extreme Hydrological Events in the Pantanal Wetland: Heterogeneity of a Plant Community Containing Super-Dominant Species." *Journal of Vegetation Science* 27 (3): 568–77. <https://doi.org/10.1111/jvs.12379>.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA 2017. Manual de métodos de análise de solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 573 p.

Fick, S E, and R J Hijmans. 2017. “Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas.” *International Journal of Climatology*.

Freitas, A D S, E V S B Sampaio, A P S Ramos, M R Barbosa, R P Lyra, and E L Araújo. 2015. “Nitrogen Isotopic Patterns in Tropical Forests along a Rainfall Gradient in Northeast Brazil.” *Plant and Soil* 391 (1–2): 109–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2417-5>.

Freitas, A D S, E V S B Sampaio, R S C Menezes, and H Tiessen. 2010. “ ^{15}N Natural Abundance of Non-Fixing Woody Species in the Brazilian Dry Forest (Caatinga).”

Isotopes in Environmental and Health Studies 46 (2): 210–18.
<https://doi.org/10.1080/10256016.2010.488805>.

Galloway, J N, F J Dentener, D G Capone, E W Boyer, R W Howarth, S P Seitzinger, G P Asner, C C Cleveland, P A Green, E A Holland, D M Karl, A F Michaels, J H Porter, A R Townsend, and C J Vorosmarty. 2004. “Nitrogen cycles: past, present, and future.” *Biogeochemistry*. 70, 153–226.

Gariglio, M A, E V S B Sampaio, L A Cestaro, and P Y Kageyama. 2010. “Uso sustentável e conservação dos Recursos Florestais da Caatinga.” Serviço Florestal Brasileiro-SFB. Ministério do Meio Ambiente, Brasil. 368p.

Handley, L L, A T Austin, D Robinson, C M Scrimgeour, J A Raven, T H E Heaton, S Schmidt, and GR Stewart. 1999. “The ^{15}N natural abundance ($\delta^{15}\text{N}$) of ecosystem samples reflects measures of water availability.” *Aust J Plant Physiol*. 26, 185–199.

Hogberg, P. 1997. “ ^{15}N Natural Abundance in Soil-Plant Systems.” *New Phytologist* 137: 179–203. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00808.x>.

Hobson, K A, S L Van Wilgenburg, L I Wassenaar, R L Powell, C J Still, and J M Craine. 2012. “A multiisotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^2\text{H}$) feather isoscape to assign Afrotropical migrant birds to origins.” *Ecosphere*. 3 (5):44.

Houlton, B, D M Sigman, and L O Hedin. 2006. “Isotopic evidence for large gaseous nitrogen losses from tropical rainforests.” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 103 (23), 8745–8750.

Houlton, B, Y P Wang, P M Vitousek, and C B Field. 2008. “A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere.” *Nature Letters*. 454.

Houlton, B, A R Marklein, and E Bai. 2015. “Representation of nitrogen in climate change forecasts.” *Nature climate change*. April, 2015.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE 2001. Censo Demográfico de Pernambuco, 2000. Rio de Janeiro, Brasil.

Jantalia, C P, D S Resck, B J R Alves, L Zotarelli, S Urquiaga, and R M Boddey. 2007. “Tillage effect on C stocks of a clayey oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado.” *Soil and Tillage Research* 95. 1-2, 97-109.

Lal, R. 2005. "Forest soils and carbon sequestration." *Forest Ecology and Management* 220. 1/3, p. 242-258.

Liu, D, W Zhu, X Wang, Y Pan, C Wang, D Xi, E Bai, Y Wang, X Han, and Y Fang. 2017. "Abiotic versus biotic controls on soil nitrogen cycling in drylands along a 3200 km transect." *Biogeosciences*. 14, 989–1001.

Martinelli, L A, M C Piccolo, A R Townsend, P M Vitousek, E Cuevas, W McDowell, G P Robertson, O C Santos, and K Treseder. 1999. "Nitrogen Stable Isotopic Composition of Leaves and Soil: Tropical versus Temperate Forests." *Biogeochemistry* 46 (1–3): 45–65. <https://doi.org/10.1007/BF01007573>.

Menezes, R S C, E V S B Sampaio, V Giongo, and A M Pérez Marin. 2012. "Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome." *Braz. J. Biology*. 72, no. 3 (suppl.), 643-653.

Mendonça, L A R, H Frischkorn, M F Santiago, P B Camargo, J O G Lima, and J Mendes Filho. 2010. "Identificação de mudanças florestais por ^{13}C e ^{15}N dos solos da Chapada do Araripe, Ceará." *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 14, n.3, 314-319.

Nardoto, G B, J P H B Ometto, J R Ehleringer, N Higuchi, M M C Bustamante, and L A Martinelli. 2008. "Understanding the Influences of Spatial Patterns on N Availability Within the Brazilian Amazon Forest." *Ecosystems* 11 (April): 1234–46. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9189-1>.

Osborne, B B, M K Nasto, G P Asner, C S Balzotti, C C Cleveland, B W Sullivan, P G Taylor, A R Townsend, and S Porder. 2017. "Climate, Topography, and Canopy Chemistry Exert Hierarchical Control Over Soil N Cycling in a Neotropical Lowland Forest." *Ecosystems* 20 (6): 1089–1103. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0095-7>.

Pinheiro, A G, T E M Souza, S M Montenegro, A A Montenegro, S M S Guerra, and 2018. "Rainfall pattern and erosion potential in the physiographic regions of the state of Pernambuco, Brazil." *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 22, n.12, 849-853. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n12p849-853>.

- Pinheiro, E F M, E Lima, M B Ceddia, S Urquiaga, B J R Alves, and R M Boddey. 2010. "Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region." *Plant and Soil* 333, n. 1-2, 71-80.
- Ribeiro, K, E R Sousa-Neto, J A Carvalho Junior, J R S Lima, R S C Menezes, P J Duarte-Neto, G S Guerra, and J P H B Ometto. 2016. "Land Cover Changes and Greenhouse Gas Emissions in Two Different Soil Covers in the Brazilian Caatinga." *Science of the Total Environment* 571: 1048–57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>.
- Robinson, D. 2001. " $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle." *Trends in Ecology and Evolution*. 16, 153-162.
- Sant'Anna, S A C, M R Martins, J M Goulart, S N Araújo, E S Araújo, M Zaman, C P Jantalia, B J R Alves, R M Boddey, and S Urquiaga. 2018. "Biological nitrogen fixation and soil N₂O emissions from legume residues in an Acrisol in SE Brazil." *Geoderma Regional* 15. DOI:/10.1016/j.geodrs.2018.e00196
- Santos, C A G, R M Silva, A M Silva, and R M Brasil Neto. 2017. "Estimation of Evapotranspiration for Different Land Covers in a Brazilian Semi-Arid Region: A Case Study of the Brígida River Basin, Brazil." *Journal of South American Earth Sciences* 74: 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.01.002>.
- Santos, U J, J A Demattê, R S C Menezes, A C Dotto, C C Guimarães, B J Alves, D C Primo, and E V S B Sampaio. 2020. "Predicting carbon and nitrogen by visible near-infrared (Vis-NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy in soils of Northeast Brazil." *Geoderma Regional*. 23 e00333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00333>.
- Sena-Souza, J P, B Z Houlton, L A Martinelli, and G B Nardoto. 2020. "Reconstructing Continental-Scale Variation in Soil $\delta^{15}\text{N}$: A Machine Learning Approach in South America." *Ecosphere* 11 (8). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3223>.
- Shan, Y, W Huang, X Zhao, and I Wu. 2019. "Composition and variation of soil $\delta^{15}\text{N}$ stable isotope in natural ecosystems." *Catena*. 183 104236. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104236>.

Silva, A S A, R S C Menezes, O A Rosso, B Stosic, and T Stosic. 2021. "Complexity entropy-analysis of monthly rainfall time series in northeastern Brazil." *Chaos, Solitons and Fractals* 143. 110623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110623>

Trabucco, A, and R Zomer. 2019. "Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET0) Climate Database v2. figshare." Fileset. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v3>.

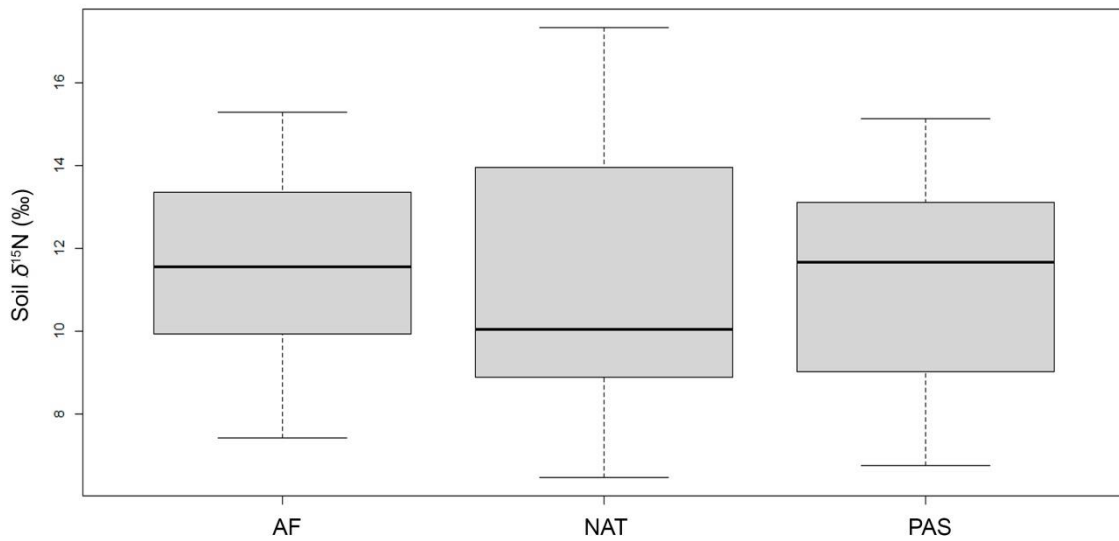
Wang, C, X Wang, D Liu, H Wu, X Lu, Y Fang, W Cheng, W Luo, P Jiang, J Shi, H Yin, J Zhou, X Han, and E Bai. 2014. "Aridity threshold in controlling ecosystem nitrogen cycling in arid and semiarid grasslands." *Nature communications*. 5, 4799.

Wang, J, Y Zhang, F Yang, Y Zhao, and H Zheng. 2017. "Effects of agricultural practices on nitrogen distribution in unsaturated soils." *Environmental Earth Sciences*. 76:831.

Weintraub, S R, R J Cole, C G Schmit, and J D All. 2016. "Climatic controls on the isotopic composition and availability of soil nitrogen across mountainous tropical forest." *Ecosphere*. 7 (8):e01412. 10.1002/ecs2.1412.

Zomer, R J, A Trabucco, D A Bossio, and L V Verchot. 2008. "Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation." *Agric. Ecosyst. Environ.* 126, 67–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.014>.

Material suplementar – Capítulo 2



Material suplementar 2.1: Soil $\delta^{15}\text{N}$ distribution as a function of different land covers along a climatic gradient in Pernambuco state, northeast Brazil. AF: Agriculture field; PAS: Pasture; NAT: Native vegetation. There are no significant differences between land covers ($p > 0.05$) by ANOVA test.

Material suplementar 2.2: Model selection:

mod1= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT} + \text{IA}, \text{data} = \text{c})$

mod2= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{AMP} + \text{IA}, \text{data} = \text{c})$

mod3= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET}, \text{data} = \text{c})$

mod4= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{AMP} + \text{MAP} + \text{PET}, \text{data} = \text{c})$

mod5= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT} + \text{MAP}, \text{data} = \text{c})$

mod6= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAP}, \text{data} = \text{c})$

mod7= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT} + \text{PET}, \text{data} = \text{c})$

mod8= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT}, \text{data} = \text{c})$

mod9= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAP} + \text{PET}, \text{data} = \text{c})$

mod10= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT}, \text{data} = \text{c})$

mod11= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET}, \text{data} = \text{c})$

mod12= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{AMP} + \text{MAP} + \text{PET}, \text{data} = \text{c})$

mod13= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{C.N} + \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET}, \text{data} = \text{c})$

mod14= $\text{lm}(\delta 15\text{N} \sim \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET}, \text{data} = \text{c})$

mod15= lm($\delta^{15}\text{N} \sim \text{C} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET}$, data = c)
mod16= lm($\delta^{15}\text{N} \sim \text{CLAY} + \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET}$, data = c)
mod17= lm($\delta^{15}\text{N} \sim \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET}$, data = c)
mod18= lm($\delta^{15}\text{N} \sim \text{pH} + \text{CLAY} + \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET}$, data = c)
mod19= lm($\delta^{15}\text{N} \sim \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N} + \text{MAT} + \text{PET}$, data = c)
mod20= lm($\delta^{15}\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{C.N}$, data = c)
mod21 <- lmer($\delta^{15}\text{N} \sim \text{C} + \text{pH} + \text{CLAY} + \text{MAT} + \text{MAP} + \text{PET} + (1|\text{Region})$, data = c)

AIC (mod1, mod2, mod3, mod4, mod5, mod6, mod7, mod8, mod9, mod10, mod11, mod12, mod13, mod14, mod15, mod16, mod17, mod18, mod19, mod20, mod21)

	df	AIC
mod1	8	145.9917
mod2	8	149.7205
mod3	9	145.5607
mod4	9	156.5230
mod5	8	153.9446
mod6	7	154.6461
mod7	8	148.4506
mod8	7	155.5353
mod9	8	155.5147
mod10	7	155.5353
mod11	8	143.6545
mod12	8	154.5600
mod13	8	148.2513
mod14	5	150.2461
mod15	8	151.4926
mod16	6	149.2515
mod17	8	145.0943
mod18	7	143.9571
mod19	7	149.9432
mod20	6	157.0831
mod21	9	171.6451

Material suplementar 2.3: Details of the model selected:

Call:

lm(formula = $\delta 15N \sim C + pH + CLAY + MAT + MAP + PET$, data = c)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-3.4327	-1.1516	0.3613	1.0096	2.8767

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	29.110353	10.148382	2.868	0.00791 **
C	-0.731457	0.531797	-1.375	0.18030
pH	-1.503216	0.551679	-2.725	0.01115 *
CLAY	0.072306	0.034873	2.073	0.04780 *
MAT	-1.552122	0.462331	-3.357	0.00235 **
MAP	-0.005769	0.002319	-2.488	0.01930 *
PET	0.018297	0.005881	3.111	0.00437 **

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.775 on 27 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.6805, Adjusted R-squared: 0.6095

F-statistic: 9.586 on 6 and 27 DF, p-value: 1.133e-05

Correlation test of predict variables (VIF):

C	pH	Clay	MAT	MAP	PET
3.356120	1.612810	1.860288	3.667494	2.723642	2.759752

Capítulo 3 - Understanding the carbon and nitrogen dynamics in soils of different Pantanal sub-regions, Brazil

Fábio Luís de Souza Santos, Glauber Neves, Emanuel Messias Lima da Silva, Gabriela Bielefeld Nardoto

Artigo submetido para a Revista *Wetlands* em fevereiro de 2021

Abstract

The Pantanal is the most biodiversity-rich wetland in the world, composed of a complex and heterogeneous ecosystem. Within the Pantanal area, there are sub-regions with unique characteristics associated with the process of soil formation, flood regime, and biogeochemical cycles. However, there is still limited information about the dynamics of soil organic matter in the native areas. In this context, this study aims to understand the dynamics of carbon (C) and nitrogen (N) in different sub-regions of the Pantanal, through the values of soil $\delta^{13}\text{C}$ and soil $\delta^{15}\text{N}$ and their relationship with climatic and environmental variables. For this, we collected soil samples to a depth of 20cm in Cerrado and Poconé (north portion), Abobral, Aquidauana, and Nhecolândia (south portion). The north portion presented lower soil $\delta^{13}\text{C}$ values, -26‰, than the south portion, -22‰. The soil $\delta^{15}\text{N}$ showed no differences between north and south but showed high variation within and between sub-regions. Temperature (MAT), precipitation (MAP), and vegetation index of the normalized difference (NDVI) are the main factors that discriminated the sub-regions of the Pantanal. These factors, combined with seasonal hydrological dynamics, determine the structure and physiology of vegetation, which seems to be the driver of the dynamics of soil organic matter in the Pantanal.

Keywords: Pantanal sub-regions, stable isotopes, wetlands, Cerrado

Introduction

The Pantanal is a floodplain marked by an annual flood pulse that presents a great variety of time and extension and one of the world's most biodiversity-rich wetlands (Junk et al. 2014). The Pantanal has suffered great native vegetation loss due to the expansion of the area used for crops and pastures, exotic grasses plantations, and deforestation (Couto and Oliveira 2010), in addition to the constant increase in fires in

the region, which threaten biodiversity and the provision of ecosystem services (Guerra et al. 2020). The Pantanal is a complex and heterogeneous ecosystem in the structure of vegetation and physiognomies (Miranda et al. 2018). It is divided into 11 sub-regions (Silva and Abdon 1998) due to differences in the ecosystem's functioning. The distribution of the sub-regions is associated with both the process of soil formation and the existing flood regime in each area (Cardoso et al. 2016).

Soils with different formation processes present differences in texture and carbon (C) concentrations, which are higher in soils with higher clay content (Nascimento et al. 2013). However, the soil texture did not influence the C/N ratio, which may be associated with the vegetation cover of each area. Suggesting that vegetation cover is the main reason for the differences found in the soil organic matter content (SOM) in the Pantanal (Cardoso et al. 2016). In this context, areas with forest cover or the edge of bays may have higher SOM values than savannah or field areas due to the greater supply of organic substrate in the litter and the flood cycle. The hydrological cycle is a fundamental factor for soil C dynamic in Pantanal because it influences vegetation cover and plant physiology (Dalmagro et al. 2016).

Soil nitrogen (N) also varies depending on the environmental characteristics. Higher values were found by Nascimento et al. (2015) in semi-deciduous forests in areas covered by savannah or grasses. The value found in the superficial layer of soils under forests was almost 0.1% of N, while in the savannah areas, they were around 0.05%. Vourlitis et al. (2014) found that the total N of leaves and N use efficiency differ between forest areas in different positions of the landscape. Besides, the peak N₂O flow events were closely associated with precipitation, causing an increase in water in the topsoil, followed by an increase in measurable N₂O flow 6 to 12 hours later (Lienggaard et al. 2012). This indicates that the flood regime and hydrological cycle can influence N dynamics between soil, vegetation, and the atmosphere.

Isotopes of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) reflect vegetation cover and are a tool capable of providing information on ecosystems' functioning (Ehleringer et al. 2002). Isotopes of nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) in the soil provide integrated information on soil organic matter dynamics in ecosystems (Robinson 2001). Several factors influence the dynamics of SOM, mainly climatic variables such as temperature and precipitation (Craine et al. 2015; Sena-Souza et al. 2020). However, some factors intrinsic to each environment influencing these values (Osborne et al. 2017). Biological factors, being related to

plants' physiology that deposit the material in the soil or to associations with other organisms above and below ground (Craine et al. 2015; Ometto et al. 2006). Physical and chemical factors of the soil at the most diverse scales, such as source and relief material (Weintraub et al. 2015), carbon concentration and clay content in the soil (Conen et al. 2008), or C/N ratio and soil pH (Osborne et al. 2017; Wang et al. 2014).

Some studies using the $\delta^{13}\text{C}$ with Brazilian soil Pantanal sought to compare areas with different coverage. There is a range of values ranging from -27‰ to -14‰ in the Pantanal of Nhecolândia, the southeastern portion of the biome (Victoria et al. 1995), due to the heterogeneity of the ecosystem (Miranda et al. 2018). More open areas with a predominance of grasses have higher values of $\delta^{13}\text{C}$ than more closed areas. This pattern is also found in the northern portion of the Pantanal (Nascimento et al. 2015). Nascimento et al. (2013) also showed that $\delta^{13}\text{C}$ does not differ in different soil types under the same cover.

In the Pantanal, few studies evaluate the dynamics of N in the soil in the native areas (Lienggaard et al. 2012). Recently, Sena-Souza et al. (2020) used $\delta^{15}\text{N}$ data in soils in the north of the Pantanal in a South American map. They indicate that soil $\delta^{15}\text{N}$ values are higher than the savannas of central Brazil but lower than in tropical forests and semi-arid regions. In the dry season, the nitrification and denitrification processes increase, making the Pantanal a possible source of N_2O emissions. However, the amount of air present in the soil decreases during the rainy season, inhibiting various groups of organisms present in the soil, reducing the processes of nitrogen decomposition and mineralization (Lienggaard et al. 2012). This tends to result in lower values of $\delta^{15}\text{N}$ in subtropical wetlands (Reis, Nardoto, and Oliveira 2017) due to the combination of nitrification and incomplete denitrification, caused by the consecutive drought and flooding cycles (Lienggaard et al. 2011).

Some studies point to the potential for emissions of C and N's gases from soils in the Pantanal (Johnson et al. 2013; Lienggaard et al. 2012). However, it is still necessary to understand the dynamics of these elements in the soil and their relationship with the environment. In this context, this study aims to understand the dynamics of C and N in different sub-regions of the Pantanal, through the values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the soil and their relationship with climatic and environmental variables.

Methods

Study area

The Pantanal covers about 140,000 km², with 11 different sub-regions that occupy Paraguay, Bolivia, and Brazil (Silva and Abdon 1998), which consider aspects related to flood, relief, soil, and vegetation, subsidized by satellite images on a scale of 1:250,000. Our study area comprises a transition area between the Pantanal and the Cerrado, which, being outside the limits of the sub-regions, was called Cerrado, besides, four sub-regions of the Pantanal: Poconé (north portion), Abobral, Aquidauana and Nhecolândia (south portion) (Fig. 3.1). The region's climate is Aw, according to the Köppen classification, with an average temperature between 22°C and 32°C and average annual rainfall between 1,100 and 1,200 mm with two well-defined seasons, local rain regime, from October to April and the dry season from May to September (Junk et al. 2014).

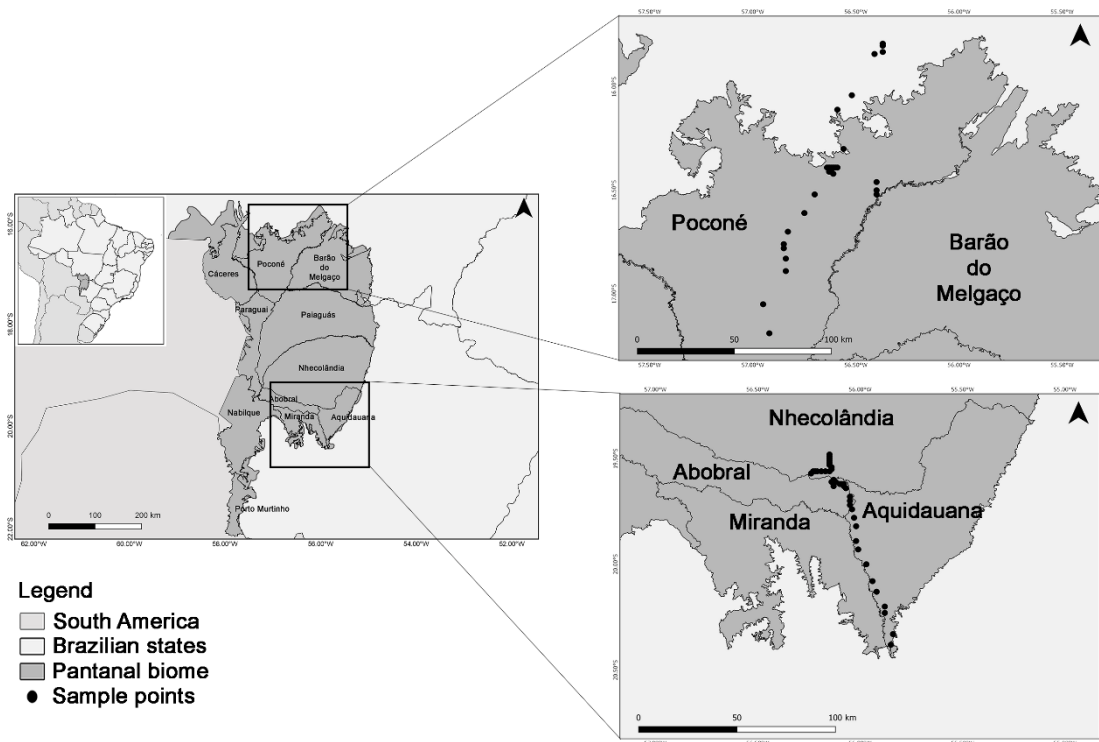


Fig. 3.1: Location of Pantanal in relation to South America (left), and sample points in the northern (above) and southern (below) portions in different Pantanal sub-regions, Brazil.

Samples, processing, and soil analyses

Soil samples were collected at depth intervals between 0-20 cm in four sub-regions of the Pantanal, considering different geologies, relief, and terrain forms. As soil collections, they were made using a Dutch auger and the samples were submitted to the air-dried fine earth method (TFSA), where they are left in the ventilated place until complete desiccation. Then they were manually untwisted and sieved with a 2 mm mesh.

The texture was calculated by densimeter method (Embrapa 2017), adapted of Boyoucus method in Laboratório de Relações Solo-Vegetação, department of Ecology of the University of Brasília. The pH in H₂O and effective cation exchange capacity (t) was were determined in Federal University of Viçosa, Minas Gerais, phosphorus (P) and potassium (K) were extracted by Mehlich 1 method. Calcium (Ca), magnesium (Mg) and were extracted by 1 M KCl solution, according to Embrapa (2017) in Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante, Soil department of the Federal University of Viçosa, Minas Gerais.

Dry samplings were ground and weighted in subsamples between 20 and 100 mg and conditioned in aluminum capsules. The carbon and nitrogen isotope ratios were determined by combustion using an elemental analyzer (Carlo Erba, CHN-1100) coupled to a Thermo Finnigan Delta Plus mass spectrometer at the Laboratory of Isotope Ecology of the Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/Universidade de São Paulo), Piracicaba, SP, Brazil. The results were expressed in delta notation (δ), in parts per thousand (‰), based on the internationally recognized standard. We used the following eq.: $\delta^{15}\text{N}$ or $\delta^{13}\text{C}$ (‰) = $(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1.000$), where R_{sample} and R_{standard} represent the heavy/light isotope molar ratio of the sample and standard, respectively. The standard used for carbon analysis was Pee Dee Belemnite (Vienna Pee Dee Belemnite - Vienna PDB; $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ ratio = 0.01118), and the standard used for nitrogen analysis was atmospheric air ($^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ ratio = 0.0036765). Internal standards (tropical soil and sugarcane leaves) are routinely interspersed with target samples during analysis runs. Long-term analytical error for the internal standards are of 0.2‰ for both $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$, 1% for organic C, and 0.02% for total N.

Acquisition of climatic data

Data related to the mean annual precipitation (MAP) and mean annual temperature (MAT) were extracted from the WorldClim platform, version 2.0

(www.worldclim.org), with a resolution of 30 seconds, corresponding to an area of approximately 1 km². These data were captured by satellites worldwide, over a 30-year historical series, between 1970 and 2000. The data are compiled in monthly averages over these 30 years, constructed by selecting the best performing model for each region and variable with global cross-validation correlations ≥ 0.99 for temperature and humidity, 0.86 for precipitation, and 0.76 for wind speed (Fick and Hijmans 2017).

Evapotranspiration (ET) was obtained from Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM - www.gleam.eu/), which represents a new approach combining a wide range of currently existing satellite-sensor products to estimate reliable fields of daily global evaporation at a 0.25-degree spatial resolution based on the Priestley and Taylor (PT) evaporation model (Miralles et al. 2011). These authors highlighted the positive correlation between annual totals and the stations' cumulative yearly evaporation ($R = 0.80$), monthly time series ($R = 0.90$), and daily time series ($R = 0.83$). We generated the mean evapotranspiration from the 3.2b version 15-year period (2003–2017), mainly based on satellite data.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was established through the Global Land Service Copernicus platform (land.copernicus.eu), with a spatial resolution of 1 km. The data represent the average of the NDVI values between the years 1999 and 2017 that allow us to highlight the biophysical patterns of vegetation and their spatial and temporal changes. This index can be represented by the Eq. 1 (Rouse et al. 1973):

$$NDVI = (I_{rvp} - I_v) / (I_{rvp} + I_v) \quad \text{Eq. 3.1}$$

Where, I_{rvp} is the reflectance value in the near-infrared range (between 800 and 1100 nm) and I_v is the reflectance value in the red spectrum (between 600 and 700 nm).

Data analyses

All data were submitted to the Shapiro-Wilk normality test. Means and deviations were generated for physical, chemical, and elementary soil variables to describe the study areas better. A principal component analysis (PCA) was performed to identify the data distribution pattern and the variables most related to each sub-region, using the VEGAN package in the R program (Oksanen et al. 2018). Before, the variables were standardized around the mean with a standard deviation. Subsequently, a

linear discriminant analysis (LDA) was performed to identify similarities in the areas in relation to the variables studied by the MASS package (Venables and Ripley 2002). We examined the model's accuracy using a leave-one-out cross-validation approach, where the rate of reclassification of categories above 70% represents excellent discrimination performances. In the two-dimensional space of the LDA, we draw the ellipses of the 95% confidence interval to show a clear distinction between the groups. The following variables were used for both analyses: $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, C/N ratio, MAP, MAT, soil pH, soil clay, t, NDVI, and ET. All analyzes were performed using the R program.

Results

Clay values varied between 12.6% and 31.1%, while the sand ranged from 58.9% to 83.5%. The north portion showed lower sand values in soils than the south portion, which had the highest sand values and lower clay (Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Texture of soils (mean \pm sd) up 20cm depth in different sub-regions of the Pantanal, Brazil.

Sub-region	<i>n</i>	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
Cerrado	5	31.1(7.6)	10.0(4.2)	58.9(10.1)
Poconé	22	27.7(17.1)	12.6(6.1)	59.7(22.4)
Abobral	14	13.0(3.2)	4.5(2.2)	82.5(4.4)
Aquidauana	15	14.2(6.3)	4.9(1.9)	80.9(7.6)
Nhecolândia	14	12.6(8.1)	3.9(3.7)	83.5(11.4)

Soil pH varied between 5.1 e 5.7, having higher values in the south portion. The Pantanal P of the Pantanal ranges between 3.8 mg/dm³ and 7.7 mg/dm³, manly abundance in sub-regions the south portion. K, which varied from 57.0 mg/dm³ and 106.6 mg/dm³, had the highest value in the sub-region Cerrado. The Ca contents were between 1.3 cmol/dm³ and 3.3 cmol/dm³. The Mg it was between 0.4 cmol/dm³ and 1.1 cmol/dm³ higher values in the north portion. The t varied from 2.0 cmol/dm³ to 4.6 cmol/dm³ and showed higher values in the north portion of the Pantanal, but the sub-region Aquidauana had the highest value among the sub-regions of the south portion (Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Chemical attributes (mean±sd) in soils up to 20cm depth in different Pantanal sub-regions.

Sub-region	<i>n</i>	pH	P (mg/dm ³)	K (mg/dm ³)	Ca (cmol/dm ³)	Mg (cmol/dm ³)	t (cmol/dm ³)
Cerrado	5	5.1(0.3)	3.8(1.6)	106.6(27.1)	1.7(1.2)	0.9(0.4)	3.9(1.0)
Poconé	22	5.0(0.4)	6.6(4.7)	57.4(38.5)	2.7(1.5)	1.1(0.6)	4.6(2.3)
Abobral	14	5.4(0.5)	5.0(5.5)	57.0(36.3)	1.9(1.9)	0.6(0.4)	3.0(2.3)
Aquidauana	15	5.7(0.8)	7.7(8.1)	68.5(46.5)	3.3(2.7)	0.8(0.6)	4.5(3.1)
Nhecolândia	14	5.4(0.5)	7.4(4.4)	49.0(26.8)	1.3(1.4)	0.4(0.3)	2.0(1.6)

P: Phosphorus, K: potassium, Ca: Calcium, Mg: Magnesium, t: Effective cation exchange capacity.

Soil $\delta^{15}\text{N}$ values were highest in Cerrado, Aquidauana, and Nhecolândia areas, and lowest in Poconé e Abobral. The highest values of soil $\delta^{13}\text{C}$ were found in the south portion of the Pantanal, and the lowest in the north portion. Nitrogen and carbon concentrations were also higher in the northern portion and lowered in the southern portion, while the C/N ratio was higher in the Cerrado than in other areas (Tab. 3.3).

Tab. 3.3: $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, nitrogen concentration (N), carbon concentration (C), and C/N ratio (mean±sd) in soils up 20cm depth in different Pantanal sub-regions. Different letters indicate significant differences at 95% probability.

Variables	<i>n</i>	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	N (%)	C (%)	C/N ratio
Cerrado	5	7.0(1.2)a	-26.4(0.2)a	0.13(0.04)a	1.73(0.55)a	13.36(1.86)a
Poconé	22	4.9(1.9)b	-25.5(2.5)a	0.01(0.04)b	0.95(0.36)b	10.08(0.93)b
Abobral	14	5.1(1.7)bc	-22.6(2.9)b	0.05(0.02)b	0.56(0.26)b	10.53(0.72)b
Aquidauana	15	6.5(1.7)acd	-21.0(4.2)b	0.04(0.02)b	0.43(0.20)b	9.48(0.67)b
Nhecolândia	14	6.8(0.1)ad	-22.7(4.1)b	0.07(0.12)ab	0.68(1.24)b	10.08(0.75)b

The PCA based on the 1st and 2nd axes explained 50.2% of the variance of the ten parameters evaluated (Fig. 3.2). MAP and MAT were the variables that most contributed to axis 1, while $\delta^{13}\text{C}$ was the most related to axis 2 (Material suplementar 3.1).

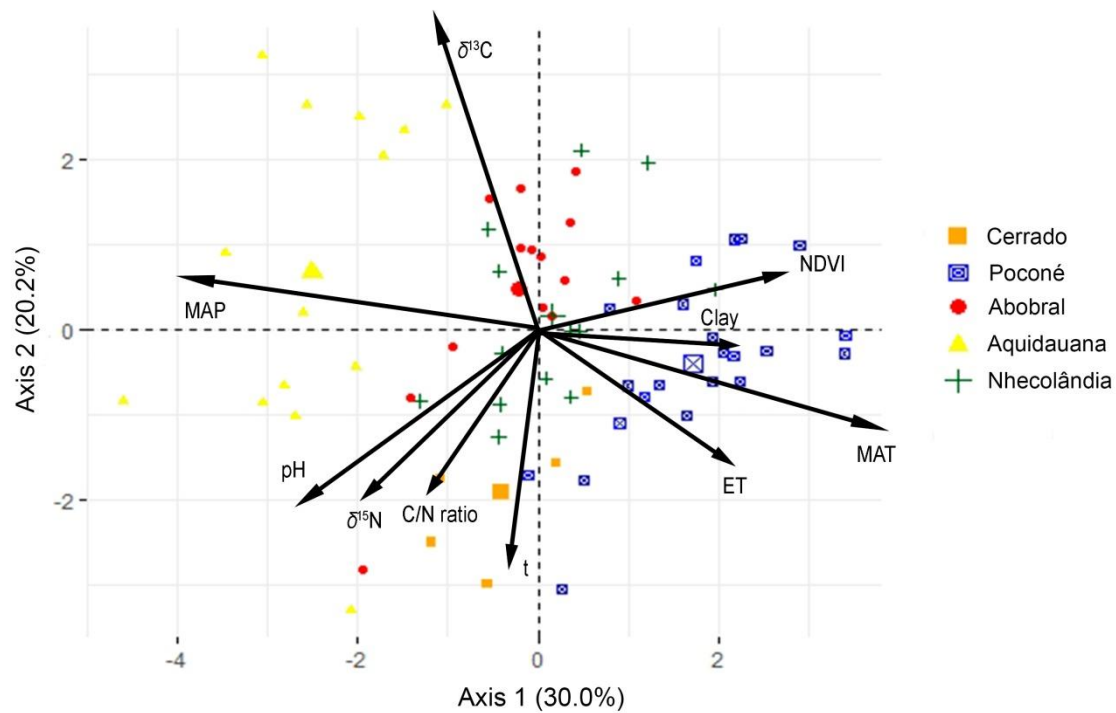


Fig. 3.2: Principal components Analysis between soils up to 20cm depth in different Pantanal sub-regions. MAP: Mean annual precipitation; MAT: Mean annual temperature; ET: Potential of evapotranspiration; NDVI: Vegetation index of the normalized difference; t: Effective cation exchange capacity.

The LDA explained 91.3% of data distribution, with 81.4% in the first two axes (LD1 = 50.8%, LD2 = 30.6%). For both axes, MAT and NDVI are the most significant variables for the sub-regions' similarity (Material suplementar 3.2). In the Cerrado and Poconé sub-regions, the accuracy was 100% (Material suplementar 3.3). The LDA discriminated mainly against the Cerrado subregion. Among the Pantanal sub-regions, Poconé is the one that most differentiates (Fig. 3.3).

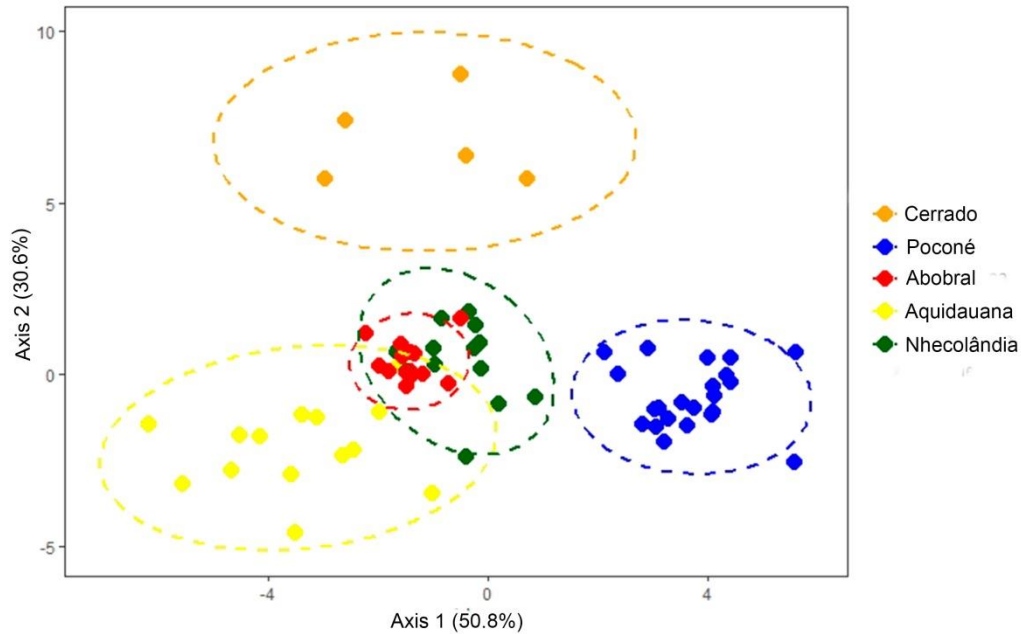


Fig. 3.3: Linear discriminant analysis in soils up to 20cm depth in different Pantanal sub-regions.

Discussion

The north and south portions of the Pantanal showed differences in their functioning. The physical, chemical, and nutritional attributes present in the Poconé sub-region soil, to the north, are distinguished compared to the soils of the south portion of the Pantanal. Besides, the northern portion, the Cerrado sub-region (between the Cerrado and Pantanal biomes), was completely different from the other sub-regions, suggesting that the biomes have different behaviors (Sena-Souza et al. 2020). Precipitation, temperature, and NDVI proved to be fundamental variables for the distinction of ecosystems in the Pantanal, as they are related to the dynamics of soil flooding (Lienggaard et al. 2011; Nascimento et al. 2015) and the process of photosynthesis and vegetation structure of each sub-region (Miranda et al. 2018). Using the NDVI values, Miranda et al. (2018) concluded that Poconé and Aquidauana are among the most complex sub-regions in the Pantanal. Our results from the discriminant analysis show that Poconé and Aquidauana sub-regions were the ones that stood out the most from the others, disregarding the Cerrado sub-region. This reinforces the difference in functioning in each ecosystem. The small differences in MAP and MAT

between the sub-regions are sufficient to influence the vegetation's physiological behavior, which has species adapted to the hydrological seasonality of the Pantanal (Dalmagro et al. 2016).

The values of soil $\delta^{13}\text{C}$ were lower in the northern portion of the Pantanal. This indicates that the soils in this region receive predominantly organic matter from C_3 plants. Simultaneously, in the southern portion, there is a mixed contribution from C_3 and C_4 plants, as reported by Victoria et al. (1995). The high variation in $\delta^{13}\text{C}$ values within each sub-region of the Pantanal in the present study reinforces this mixed contribution. Higher concentrations of C and N in the soil and the ratio between them found in the Cerrado sub-region indicate that the organic matter deposited in these soils is different from that deposited in the southern portion of the Pantanal, corroborating the difference in vegetation cover. The other soil formation processes and the river dynamics in the Pantanal allow receiving different types of sediments that vary between their concentrations of sand, nutrients, and even the capacity to form clay that influences the dynamics of C and nutrients in the soil (Johnson et al. 2013; Nascimento et al. 2015). Frequently flooded soils are predominantly covered by herbaceous species, which have accelerated growth. Besides, seasonal changes in water availability influence the photosynthesis process and plants physiology (Dalmagro et al. 2016), conditioning the $\delta^{13}\text{C}$ values in plants (Ometto et al. 2006) and, consequently, in the soil.

The higher $\delta^{15}\text{N}$ soil in the Cerrado sub-region may be related to the higher concentration of N in this area than in Poconé, since in environments with N limitation, soil values $\delta^{15}\text{N}$ tend to be lower (Reis, Nardoto, and Oliveira 2017; Robinson 2001). The southern portion of the Pantanal areas are very limited in N, but the sub-regions of Aquidauana and Nhecolândia present soil $\delta^{15}\text{N}$ values similar to that of the Cerrado, which is not the case in Abobral. This indicates that other attributes are influencing the dynamics of SOM in the Pantanal. On a global scale, the interaction of some factors such as climate (Craine et al. 2015), topography (Weintraub et al. 2015) pH (Wang et al. 2014), soil texture, and C/N ratio (Conen et al. 2008) driver the soil $\delta^{15}\text{N}$ values. On a local scale, the interaction between soil and vegetation cover can become the main driver of N dynamics in soil (Osborne et al. 2017). In present study, soils characteristics were different in north and south portions. In addition to N concentration, the Cerrado

sub-region has high K values, which suggests different dynamics from the Pantanal sub-regions and in the vegetation structure, reported by the $\delta^{13}\text{C}$ values.

The dynamics of SOM in the Pantanal are closely related to vegetation cover, which is defined by the dynamics of drought and flooding of the soil and the position in the landscape it occupies (Cardoso et al. 2016; Nascimento et al. 2015). Some evidence indicates that even the process of avulsion in the formation of soils in the Pantanal is influenced by intense biological activity (Nascimento et al. 2013), strengthening the effect of vegetation on the dynamics of N. The soil $\delta^{15}\text{N}$ values in the Pantanal show significant variation between and within the sub-regions. This is because $\delta^{15}\text{N}$ summarizes the N transformation processes existing in the soil (Robinson 2001), which in the Pantanal is closely linked to seasonality and water availability in the soil (Johnson et al. 2013). In the dry season, the nitrification and denitrification processes increase, making the Pantanal a source of N_2O emissions, contributing 1.7% of annual global N_2O emissions during the dry season (Lienggaard et al. 2012).

In general, the amount of air present in the soil decreases during the rainy season, inhibiting the activities of various groups of organisms present in the soil, reducing N decomposition and mineralization processes. However, nitrifying organisms in the soil can be stimulated to release N_2O at low O_2 availability (Bollmann and Conrad 1998), and low pH (Mørkved, Dörsch, and Bakken 2007). The results by Lienggaard et al. (2012) suggest that sudden natural wetting events in the Pantanal may cause significant N_2O emissions comparable to highly fertilized agricultural soils. Therefore, the soils of each sub-region of the Pantanal have peculiar dynamics of mineralization and decomposition processes, which allows a high variability of the soil $\delta^{15}\text{N}$, despite the low variation of the physical and chemical attributes.

Conclusions

The soils of the northern and southern portions of the Pantanal show different behaviors. The Cerrado transition area has other characteristics from the Pantanal region in physical, chemical, and biological aspects.

Temperature, precipitation, and NDVI are the main factors that differentiate the sub-regions of the Pantanal. The dynamic of SOM is strongly related to these factors

and also are different in each sub-region. These variables, combined with seasonal hydrological dynamics, determine vegetation's structure and physiology, which seems to be the driver of the dynamics of soil organic matter in the Pantanal.

Acknowledgments

This study was financed in part by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), and by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001 (studentship for first author and second author, respectively). The samples and laboratory analyses were financed by Pró-Forenses project 23038.006832/2014-11 - Edictal CAPES 25/2014. We also thank João Paulo Rodrigues for his contribution to laboratory analysis.

References

- Bollmann, A, and R Conrad. 1998. "Influence of O₂ Availability on NO and N₂O Release by Nitrification and Denitrification in Soils." *Global Change Biology* 4 (4): 387–96. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00161.x>.
- Cardoso, E L, S A Santos, C Urbanetz, A Carvalho Filho, U J Naime, M L N Silva, and N Curi. 2016. "Relação Entre Solos e Unidades Da Paisagem No Ecossistema Pantanal." *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51 (9): 1231–40. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900023>.
- Conen, F, M Zimmermann, J Leifeld, B Seth, and C Alewell. 2008. "Relative Stability of Soil Carbon Revealed by Shifts in $\delta^{15}\text{N}$ and C : N Ratio." *Biogeosciences* 5: 123–28.
- Couto, E G, and V A Oliveira. 2010. "The Soil Diversity of the Pantanal." In *The Pantanal of Mato Grosso: Ecology, Biodiversity and Sustainable Management of a Large Neotropical Seasonal Wetland*, edited by W J Junk, C J Silva, C Nunes da Cunha, and K M Wartzen, 71–102. Sofia–Moscow.
- Craine, J M, A J Elmore, L Wang, L Augusto, W T Baisden, E N J Brookshire, M D Cramer, et al. 2015. "Convergence of Soil Nitrogen Isotopes across Global Climate Gradients." *Scientific Reports* 5: 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep08280>.

Dalmagro, H J, M J. Lathuillière, G L Vourlitis, R C Campos, O B Pinto, M S Johnson, C E R Ortíz, F A Lobo, and E G Couto. 2016. "Physiological Responses to Extreme Hydrological Events in the Pantanal Wetland: Heterogeneity of a Plant Community Containing Super-Dominant Species." *Journal of Vegetation Science* 27 (3): 568–77. <https://doi.org/10.1111/jvs.12379>.

Ehleringer, J R, D R Bowling, L B Flanagan, J Fessenden, B Helliker, L A Martinelli, and J P Ometto. 2002. "Stable Isotopes and Carbon Cycle Processes in Forests and Grasslands." *Plant Biology* 4: 181–89.

Embrapa. 2017. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Edited by P C Teixeira, G K Donagemma, Ademir Fontana, and W G Teixeira. 3rd ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

http://www.cse.edu.uy/sites/www.cse.edu.uy/files/documentos/Liccom_Camejo_2011-07-28.pdf.

Fick, S E, and R J Hijmans. 2017. "WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas." *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302–15. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

Guerra, A, F O Roque, L C Garcia, J M O Ochao-Quintero, P T S Oliveira, R D Guariento, and I M D Rosa. 2020. "Drivers and Projections of Vegetation Loss in the Pantanal and Surrounding Ecosystems." *Land Use Policy* 91 (August 2019): 104388. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104388>.

Johnson, M S, E G Couto, O B. Pinto, J Milesi, R S Amorim, I A M Messias, and M S Biudes. 2013. "Soil CO₂ Dynamics in a Tree Island Soil of the Pantanal: The Role of Soil Water Potential." *PLoS ONE* 8 (6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064874>.

Junk, W J, M T F Piedade, R Lourival, F Wittmann, P Kandus, L D Lacerda, R L Bozelli, et al. 2014. "Brazilian Wetlands: Their Definition, Delineation, and Classification for Research, Sustainable Management, and Protection." *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 24 (1): 5–22. <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>.

Lienggaard, L, L P Nielsen, N P Revsbech, B Elberling, A Priemé, A E Prast, and M Köhl. 2011. "Effects of Flooding Cycles in the Pantanal on the Turnover of Soil Nitrogen Pools and Emission of N₂O." *Biogeosciences Discussions* 8 (3): 5991–6030.

<https://doi.org/10.5194/bgd-8-5991-2011>.

Lienggaard, L, L P Nielsen, N P Revsbech, A Priemé, B Elberling, A Enrich-Prast, and M Köhl. 2012. "Extreme Emission of N₂O from Tropical Wetland Soil (Pantanal, South America)." *Frontiers in Microbiology* 3 (JAN): 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00433>.

Miralles, D G, T R H Holmes, R A M De Jeu, J H Gash, A G C A Meesters, and A J Dolman. 2011. "Global Land-Surface Evaporation Estimated from Satellite-Based Observations." *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (2): 453–69. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>.

Miranda, C S, R M Gamarra, C L Miotto, N M Silva, A P Conceição Filho, and A Pott. 2018. "Analysis of the Landscape Complexity and Heterogeneity of the Pantanal Wetland." *Brazilian Journal of Biology* 78 (2): 318–27. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.08816>.

Mørkved, P T, P Dörsch, and L R Bakken. 2007. "The N₂O Product Ratio of Nitrification and Its Dependence on Long-Term Changes in Soil PH." *Soil Biology and Biochemistry* 39 (8): 2048–57. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.006>.

Nascimento, A F, S A C Furquim, E G Couto, R M Beirigo, J C O Júnior, P B Camargo, and P V Vidal-Torrado. 2013. "Genesis of Textural Contrasts in Subsurface Soil Horizons in the Northern Pantanal - Brazil." *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, no. 37: 1113–27.

Nascimento, A F, S A C Furquim, R C Graham, R M Beirigo, J C Oliveira Junior, E G Couto, and P Vidal-Torrado. 2015. "Pedogenesis in a Pleistocene Fluvial System of the Northern Pantanal - Brazil." *Geoderma* 255–256: 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.025>.

Oksanen, J, F G Blanchet, M Friendly, R Kindt, P Legendre, D Mcglinn, P R Minchin, et al. 2018. "Vegan: Community Ecology Package. Ordination Methods, Diversity Analysis and Other Functions for Community and Vegetation Ecologists." *Community Ecology Package Version 2*. (April).

Ometto, J P H B, J R Ehleringer, T F Domingues, J A Berry, F Y Ishida, E A Mazzi, N Higuchi, L B Flanagan, G B Nardoto, and L A Martinelli. 2006. "The Stable Carbon and Nitrogen Isotopic Composition of Vegetation in Tropical Forests of the Amazon

Basin, Brazil." *Biogeochemistry*, no. July: 251–74. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5517-1>.

Osborne, B B, M K Nasto, G P Asner, C S Balzotti, C C Cleveland, B W Sullivan, P G Taylor, A R Townsend, and S Porder. 2017. "Climate, Topography, and Canopy Chemistry Exert Hierarchical Control Over Soil N Cycling in a Neotropical Lowland Forest." *Ecosystems* 20 (6): 1089–1103. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0095-7>.

Reis, C R G, G B Nardoto, and R S Oliveira. 2017. "Global Overview on Nitrogen Dynamics in Mangroves and Consequences of Increasing Nitrogen Availability for These Systems." *Plant and Soil* 410 (1–2): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3123-7>.

Robinson, D. 2001. " $\delta^{15}\text{N}$ as an Integrator of the Nitrogen Cycle." *Trends in Ecology and Evolution* 16 (3): 153–62. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)02098-X](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)02098-X).

Rouse, J W, R H Hass, J A Schell, and D W Deering. 1973. "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS." *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium* 1: 309–17. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>.

Sena-Souza, J P, B Z Houlton, L A Martinelli, and G B Nardoto. 2020. "Reconstructing Continental-Scale Variation in Soil $\Delta^{15}\text{N}$: A Machine Learning Approach in South America." *Ecosphere* 11 (8). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3223>.

Vila da Silva, J S, and M M Abdon. 1998. "Delimitação Do Pantanal Brasileiro e Suas Sub-Regiões." *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 33 (10 SPEC. ISS.): 1703–11.

Venables, W N, and B D Ripley. 2002. *Modern Applied Statistics with S. Statistics and Computing*.

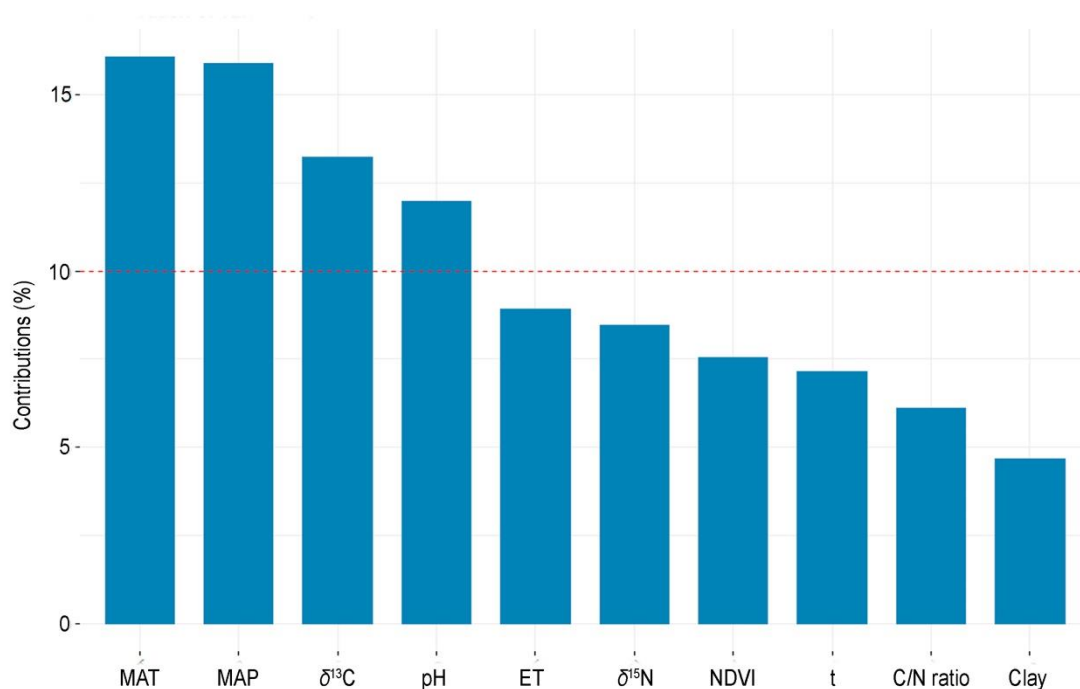
Victoria, R L, F Fernandes, L A Martinelli, M C Piccolo, P B Camargo, and S Trumbore. 1995. "Past Vegetation Changes in the Brazilian Pantanal Arboreal–Grassy Savanna Ecotone by Using Carbon Isotopes in the Soil Organic Matter." *Global Change Biology* 1 (3): 165–71. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00018.x>.

Vourlitis, G L, F A Lobo, S Lawrence, K Holt, A Zappia, O B Pinto, and J S Nogueira. 2014. "Nutrient Resorption in Tropical Savanna Forests and Woodlands of Central Brazil." *Plant Ecology* 215 (9): 963–75. <https://doi.org/10.1007/s11258-014-0348-5>.

Wang, C, X Wang, D Liu, H Wu, X Lu, Y Fang, and W Cheng. 2014. "Aridity Threshold in Controlling Ecosystem Nitrogen Cycling in Arid and Semi-Arid Grasslands." *Nature Communications* 5: 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms5799>.

Weintraub, S R, P G Taylor, S Porder, C C Cleveland, G P Asner, and A R Townsend. 2015. "Topographic Controls on Soil Nitrogen Availability in a Lowland Tropical Forest." *Ecology* 96 (6): 1561–74. <https://doi.org/10.1890/14-0834.1>.

Material suplementar – Capítulo 3



Material suplementar 3.1: Variables contributions for two first axis of Principal components Analysis between sub-regions of Pantanal. MAP: Mean annual precipitation; MAT: Mean annual temperature; ET: Potential of evapotranspiration; NDVI: Vegetation index of the normalized difference; t: Effective cation exchange capacity.

Material suplementar 3.2: Accuracy of LDA in each sub-region.

Sub-region	Cerrado	Poconé	Abobral	Aquidauana	Nhecolândia	Accuracy (%)
Cerrado	5	0	0	0	0	100.0
Poconé	0	22	0	0	0	100.0
Abobral	0	0	11	1	2	78.6
Aquidauana	0	0	1	12	1	85.7
Nhecolândia	0	0	1	0	13	92.9

MAP: Mean annual precipitation; MAT: Mean annual temperature; ET: Potential of evapotranspiration; NDVI: Vegetation index of the normalized difference; t: Effective cation exchange capacity.

Material suplementar 3.3: Discriminants coefficients of LDA in different sub-regions of the Brazilian Pantanal.

Variáveis	LD1	LD2
$\delta^{15}\text{N}$	-0.063658563	0.07374715
$\delta^{13}\text{C}$	-0.114851924	-0.07640926
C/N ratio	-0.048173633	0.60055194
MAP	0.061320496	-0.05432896
MAT	12.906084011	-7.40997139
Clay	0.009219464	0.07722526
pH	-0.017342095	-0.18157255
ET	0.002269576	0.01624178
NDVI	23.013916442	-15.71988035
T	-0.051806364	-0.16031576

MAP: Mean annual precipitation; MAT: Mean annual temperature; ET: Potential of evapotranspiration; NDVI: Vegetation index of the normalized difference; t: Effective cation exchange capacity.

Capítulo 4 - Variação espacial de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo ao longo de um gradiente edafo-climático no Brasil: Caatinga-Cerrado-Pantanal

Resumo

A dinâmica da matéria orgânica no solo (MOS) é fundamental para o funcionamento dos ecossistemas. Isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) são ferramentas capazes de sintetizar informações dessa dinâmica, que é condicionada por diversos fatores, principalmente edáficos e climáticos. O Brasil possui um gradiente com alta variabilidade nos fatores edafo-climáticos que engloba Caatinga, Cerrado e Pantanal. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar os aspectos da paisagem que controlam o $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal e em suas zonas de transição. Foram coletadas 172 amostras de solo de 0-20cm de profundidade ao longo do gradiente. Foi realizada uma krigagem para visualizar a distribuição espacial dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo, baseado em semivariogramas dessas variáveis. De acordo com a distribuição espacial desses dados, eles foram divididos utilizando os limites dos biomas e as subdivisões de ecorregiões existentes dentro de cada bioma. Variáveis edáficas coletadas em campo e variáveis climáticas adquiridas em base de dados foram utilizadas em análises de discriminante lineares. A análise discriminante usando apenas fatores edáficos apresentou uma explicação de 51,2% da separação das ecorregiões, enquanto com fatores climáticos explicou 86,6% e com todas as variáveis juntas, a explicação foi de 87,2%. Nossos resultados mostram que as transições entre os biomas seguem um padrão de variação em que o $\delta^{13}\text{C}$ do solo aumenta da Caatinga em direção ao Pantanal e o $\delta^{15}\text{N}$ diminui nessa mesma direção. Os solos de Caatinga e Pantanal apresentaram funcionamentos distintos, enquanto as áreas do Cerrado apresentaram alta variabilidade na dinâmica da MOS, com algumas ecorregiões mais similares ao Pantanal e outras à Caatinga. Os fatores climáticos controlam a distribuição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente Caatinga-Cerrado-Pantanal, mas as variáveis edáficas são importantes principalmente em escalas locais.

Palavras-chave: Matéria orgânica do solo; Precipitação; Temperatura; NDVI.

Introdução

Carbono (C) e nitrogênio (N) são elementos fundamentais para a fotossíntese e produtividade dos ecossistemas (Vitousek e Howarth 1991), e seus ciclos estão ligados nas mais diversas escalas espaciais e temporais. Isótopos estáveis de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$) são capazes de sintetizar informações da ciclagem desses elementos nos ecossistemas (Ehleringer et al. 2002), sendo o solo um compartimento capaz de armazenar essas informações. A formação do solo e a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) são condicionadas principalmente pelo clima, em conjunto com fatores de estado como geologia, relevo e biota potencial. Portanto, temperatura e precipitação são fundamentais tanto para a formação do solo quanto para a dinâmica da MOS nos ecossistemas (Lal 2013).

Atualmente o $\delta^{13}\text{C}$ tem sido amplamente utilizado para acessar os padrões da vegetação em relação a variáveis climáticas, contexto no qual Peri et al. (2012) encontraram um padrão de distribuição do $\delta^{13}\text{C}$ do solo ao longo da Patagônia, que possui 79% da sua variação explicada pela precipitação. Eles encontraram uma relação negativa entre a precipitação e o $\delta^{13}\text{C}$ do solo, assim como com o $\delta^{15}\text{N}$. Na floresta tropical amazônica, o $\delta^{13}\text{C}$ de folhas variou em função da sazonalidade em três diferentes áreas com precipitação média anual similar (Ometto et al. 2006). Nos Estados Unidos, Griffith et al. (2017) encontraram uma relação positiva entre o $\delta^{13}\text{C}$ e a precipitação, resultado contrário ao que eles esperavam já que o aumento da precipitação tende a favorecer espécies vegetais arbóreas de ciclo fotossintético C_3 . Relacionaram tal resultado ao baixo número de amostras ou a maior presença de gramíneas C_4 em áreas mais úmidas. Todos esses resultados indicam que temperatura e precipitação podem afetar valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo, além de fatores como tipo de solo e cobertura vegetal (Griffith et al. 2017).

Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo também estão relacionados aos fatores climáticos (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015; Denk et al. 2017; Osborne et al. 2017). Em áreas de savana da África, Aranibar et al. (2008) encontraram uma relação negativa do $\delta^{15}\text{N}$ do solo com a precipitação, tanto em áreas naturais quanto em diferentes usos da terra. As taxas de mineralização e nitrificação se diferem com a precipitação, porém não foi encontrado nenhum padrão. Os autores sugerem que as plantas C_3 e C_4 utilizam o N de maneira diferente, já que na maior parte das plantas estudadas, o $\delta^{15}\text{N}$ é maior nas plantas C_3 . No Brasil, Freitas et al. (2015) estudaram um gradiente que abrange desde

uma zona úmida até uma semiárida e encontraram uma relação negativa entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a precipitação, com grande variação entre os locais de estudo, aproximadamente 10‰. Ambientes mais chuvosos possuem um ciclo de N mais fechado, enquanto áreas secas e com ciclos mais abertos perdem mais N para a atmosfera e deixam o solo mais enriquecido em ^{15}N . Plantas fixadoras de N deixam o $\delta^{15}\text{N}$ próximo do valor atmosférico, 0‰. Na zona semiárida a maior parte da vegetação utiliza o nitrogênio mineralizado no solo, que possui valor de $\delta^{15}\text{N}$ mais elevado (Högberg 1997). Em um gradiente de precipitação na China, Wang et al. (2014) verificaram que o $\delta^{15}\text{N}$ se relaciona positivamente com um índice de aridez, razão entre precipitação e potencial de evapotranspiração (ET), quando esta razão está abaixo de 0,32 e negativamente quando acima desse valor, indicando que mecanismos diferentes controlam a dinâmica de N em climas distintos.

Embora o clima seja o principal fator de controle dos isótopos em escala global, existem outras variáveis capazes de influenciar os padrões de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, principalmente em escalas regionais e locais como textura, razão C/N e pH do solo (Osborne et al. 2017). A textura do solo está relacionada à estabilidade da MOS, já que solos mais argilosos tendem a reter essa MOS por mais tempo, elevando os valores de $\delta^{13}\text{C}$ (Singh et al. 2017) e $\delta^{15}\text{N}$ (Conen et al. 2008). A razão C/N indica a qualidade da MOS, sendo que menor razão C/N mais acessível esse material fica para os organismos do solo realizarem sua mineralização, o que eleva o $\delta^{15}\text{N}$ do solo (Bustamante et al. 2016; Conen et al. 2008; Craine et al. 2015). O pH condiciona a composição dos organismos no solo e a intensidade da decomposição da MOS, o que controla os processos de nitrificação e desnitrificação, e as possíveis perdas de N para a atmosfera (Hogberg 1997; Liu et al. 2017; Ribeiro et al. 2016). Liu et al. (2017) avaliaram a ciclagem de N em um gradiente de 3200 km em solos de áreas secas da China e verificaram que em regiões com menos de 100 mm de precipitação média anual (MAP) o N inorgânico do solo se acumulou, e os índices de volatilização da amônia foram maiores em solos com pH elevado, mostrando a importância do pH para as condições de mineralização e decomposição do N no solo. Nas zonas com MAP acima de 100 mm, as concentrações de N inorgânico no solo foram baixas e foram controladas principalmente por processos biológicos, como absorção de plantas e desnitrificação.

Fatores biológicos, especialmente relacionados à cobertura vegetal, também são capazes de condicionar o $\delta^{13}\text{C}$ (Carvalho et al. 2017) e o $\delta^{15}\text{N}$ (Hobbie e Ouimette 2009)

do solo em escalas locais (Osborne et al. 2017). Por isso, alguns índices de vegetação podem ser relacionados aos isótopos estáveis de C e N, como a produtividade primária bruta (PPB) e o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI). Essas relações são mais comuns com o $\delta^{13}\text{C}$, por se tratar de métricas que destacam o processo de fotossíntese, o que faz com que áreas com vegetação mais adensada e sempre verde, em geral, possuam maiores valores de GPP e NDVI, com o predomínio de espécies C_3 , e menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ (Ehleringer et al. 2002). Entretanto, essas variáveis podem estar ligadas também à disponibilidade de nutrientes e água, o que influencia as taxas de mineralização e decomposição da matéria orgânica, afetando os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo.

O Brasil possui uma grande diversidade climática. Essa diversidade é refletida na distribuição dos biomas existentes no país. No entanto, ainda não são claros os processos que controlam essa variação no funcionamento dentro de cada bioma e ao longo do gradiente edafo-climático existente no país. As variações de $\delta^{13}\text{C}$ (Ometto et al. 2006; Mendonça et al. 2010) e de $\delta^{15}\text{N}$ (Freitas et al. 2015) no sistema solo-planta encontradas em trabalhos anteriores, sugerem que o país possui uma grande amplitude nos valores isotópicos de C e N (Sena-Souza et al. 2020; Martinelli et al. 2020). Além disso, os modelos para $\delta^{13}\text{C}$ (Powell, Yoo e Still 2012) e $\delta^{15}\text{N}$ (Amundson et al. 2003; Craine et al. 2015) trazem grandes incertezas para regiões tropicais, especialmente em áreas de savana, para o $\delta^{13}\text{C}$ e nas áridas e semiáridas, para o $\delta^{15}\text{N}$.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar os aspectos da paisagem que controlam $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal e em suas zonas de transição.

Hipóteses

- I. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo variam entre -20‰ e -25‰ e serão semelhantes em todas as regiões, devido à presença de estratos arbóreos, arbustivos e herbáceos ao longo de todo o gradiente.
- II. Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo devem seguir um padrão: Caatinga>Cerrado>Pantanal.

Metodologia

O gradiente climático abrange três biomas presentes no Brasil – Caatinga, Cerrado e Pantanal (Fig. 4.1). As amostras de solo foram coletadas de 0-20 cm de profundidade ao longo do gradiente climático Caatinga-Cerrado-Pantanal. As áreas de estudo são áreas naturais dentro de Unidades de Conservação do bioma Cerrado, além de manchas de áreas naturais próximas às estradas que levam a esses parques, com o intuito de representar as condições prístinas dos ecossistemas e ter amostras representativas de todo gradiente climático. As áreas foram escolhidas no contexto do projeto de pesquisa “Origem” financiado pela CAPES, onde amostras de solo e da vegetação são coletadas em áreas estratégicas do Cerrado e Pantanal para gerar informações isotópicas de base para inferir a origem de aves apreendidas do tráfico de animais silvestres. Para compor o gradiente Caatinga-Cerrado-Pantanal, foram usadas as amostras de solo coletadas no Parque Nacional das Emas e manchas próximas a rodovias que ligam o parque à Brasília, além das amostras ao longo do trecho que vai da porção sul do Pantanal até o limite entre o Cerrado e a Caatinga (Fig. 4.1). Para preencher de forma mais adequada o gradiente, também foram usadas as amostras das áreas naturais da Caatinga apresentadas no capítulo 2 e do Parque Nacional de Brasília publicadas por Sena-Souza et al. (2020).

Após verificar a existência de padrões na distribuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente (Fig. 4.3), os pontos coletados foram classificados em oito regiões, de acordo com sua posição geográfica, considerando os limites dos biomas, as regiões fisiográficas de Pernambuco (IBGE 2017), as ecorregiões do Cerrado (Sano et al. 2019). Dessa maneira, foram separadas oito ecorregiões ao longo do gradiente: Agreste/Sertão e Caatinga (bioma Caatinga), Alto Parnaíba, Parnaguá, Chapadão do São Francisco, Planalto Central, Paraná Guimarães (bioma Cerrado) e Pantanal (bioma Pantanal) (Fig. 4.1). Essa separação visa compreender e assimilar processos e dinâmica existentes nestas zonas, assumindo que tais zonas possuem peculiaridades distintas em suas zonas inseridas no bioma.

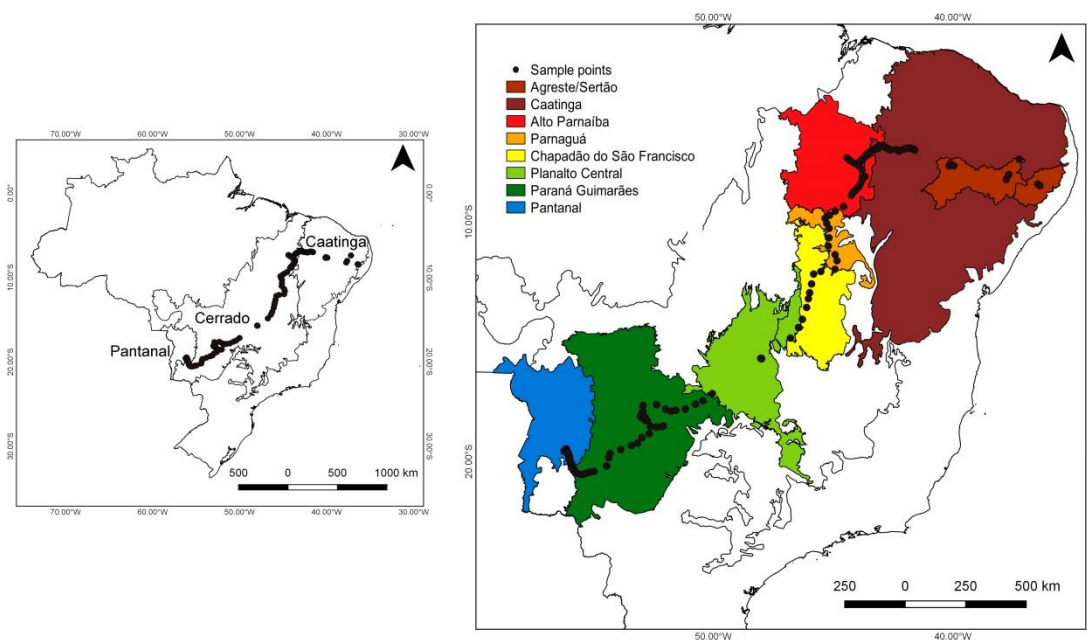


Fig. 4.1: Desenho amostral com os pontos de coleta ao longo do gradiente climático Caatinga-Cerrado-Pantanal e nas ecorregiões as quais estão inseridos.

Amostragem e análise de solo

As coletas de solo foram realizadas em áreas de vegetação nativa, selecionados através da análise de diferentes aspectos da paisagem. Foram consideradas vegetação, grupos geológicos e geomorfológicos, no intuito de obter uma amostragem que contemple o maior número possível de ambientes ao longo do gradiente. Os grupos geológicos utilizados possuem seus limites disponibilizados gratuitamente através do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), que possui informações de todo território nacional. Da mesma forma as informações geomorfológicas são disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esses dados foram gerados ou baixados antes de cada campanha de campo. Eles foram sobrepostos em mapas e utilizados para escolha dos pontos em navegação em tempo real. Essa navegação foi realizada conectando o GPS ao computador com os mapas. A cada novo aspecto da paisagem considerando vegetação, geologia, geomorfologia ou forma de terreno, era coletado um ou mais pontos, desde que houvesse uma faixa contínua de vegetação natural naquela região.

As coletas de solo foram realizadas com um trado de tipo holandês. As amostras foram submetidas ao método de terra fina seca ao ar (TFSA), onde são deixadas em local ventilado e seco até completa dessecação. Depois foram destorroadas manualmente e peneiradas com malha de 2 mm. Parte dessas amostras foi utilizada para análises físicas e químicas do solo. A textura foi calculada pelo método do densímetro (Embrapa 2017), adaptado do método de Boyoucus. A análise foi realizada no Laboratório de Relações Solo-Vegetação, departamento de Ecologia da Universidade de Brasília. O pH em água foi calculado segundo (Embrapa 2017) no Laboratório de Análises de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante, Departamento de Solo da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

Outra parte das amostras de solo secas foram moídas e pesadas sub-amostras entre 20 e 100 mg e acondicionadas em cápsulas de alumínio. Essas cápsulas foram colocadas num analisador elementar, que determina a concentração de carbono e nitrogênio. As assinaturas isotópicas do N ($\delta^{15}\text{N}$) e do C ($\delta^{13}\text{C}$) são fornecidas por um espectrômetro de massas para razões isotópicas (Thermo Quest-Finnigan Delta Plus), acoplado ao analisador elementar. O $\delta^{15}\text{N}$ e o $\delta^{13}\text{C}$ expressam a proporção de $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ e $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ na amostra (R amostra), relativamente ao padrão internacional, a composição isotópica do N da atmosfera e do C de Pee dee Belamite (PDB; rocha calcária da região do Grant Canyon, EUA), em desvios por mil (‰): $\delta = (\text{R amostra}/\text{R padrão} - 1) \times 1000$. Estas análises foram realizadas no laboratório de Ecologia Isotópica, CENA/USP. Padrões internos (solo tropical e folhas de cana-de-açúcar) são intercalados rotineiramente com amostras-alvo durante as execuções de análise. O erro analítico de longo prazo para os padrões internos é de 0,2‰ para $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, 1% para o C orgânico e 0,02% para o N total.

Aquisição de dados climáticos

Os dados relativos à precipitação média anual (MAP) e temperatura média anual (MAT) foram extraídos da plataforma WorldClim, versão 2.0 (www.worldclim.org), com resolução de 30 segundos, correspondendo a uma área de aproximadamente 1 km². Esses dados foram capturados por satélites ao redor do mundo, ao longo de uma série histórica de 30 anos, entre 1970 e 2000. Os dados são compilados em médias mensais ao longo desses 30 anos, construídos selecionando o modelo de melhor desempenho para cada região e variável com cruzamento global - correlações de validação $\geq 0,99$

para temperatura e umidade, 0,86 para precipitação e 0,76 para velocidade do vento (Fick e Hijmans 2017).

Os dados de evapotranspiração (ET) foram obtidos do Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM - www.gleam.eu/), que representa uma nova abordagem combinando uma ampla gama de produtos de sensores de satélite atualmente existentes para estimar campos confiáveis de evaporação global diária a 0,25- resolução espacial de grau com base no modelo de evaporação de Priestley e Taylor (PT) (Miralles et al. 2011). Esses autores destacaram a correlação positiva entre os totais anuais e a evaporação cumulativa anual das estações ($R = 0,80$), séries temporais mensais ($R = 0,90$) e séries temporais diárias ($R = 0,83$). Geramos a evapotranspiração média do período de 15 anos da versão 3.2b (2003–2017), que se baseia principalmente em dados de satélite.

Os dados de produtividade primária bruta (PPB) foram utilizados dados provenientes do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) com resolução espacial nativa de 500 metros. Realizamos uma série temporal composta por imagens obtidas a cada 8 dias entre os anos de 2000 e 2016. Para atenuar os efeitos atmosféricos presentes nessa série temporal, aplicamos a abordagem metodológica proposta por Carvalho Júnior et al. (2012), onde utilizamos filtro de mediana, seguido de transformação pela Fração Mínima de Ruído (MNF) e a transformação inversa de MNF. A estruturação do dado fornece a informação da amplitude dos valores de PPB entre os anos de 2000 e 2016, onde uma menor amplitude representa regiões mais estáveis, enquanto uma maior amplitude representa uma maior sazonalidade.

O NDVI foi obtido através da plataforma Copernicus Global Land Service (land.copernicus.eu), com resolução espacial de 1 km. Os dados representam a média dos valores de NDVI entre os anos de 1999 e 2017 que permitem evidenciar os padrões biofísicos da vegetação e suas alterações espaciais e temporais. Esse índice pode ser representado pela eq. 4.1 (Rouse et al. 1973):

$$NDVI = (I_{rvp} - I_v) / (I_{rvp} + I_v) \quad \text{Eq. 4.1}$$

Onde, I_{rvp} é o valor da reflectância na faixa do vermelho próximo (entre 800 e 1100 nm) e I_v é o valor da reflectância na faixa do vermelho (entre 600 e 700 nm).

Análises estatísticas

Inicialmente, foi verificada a dependência espacial de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo através da função de semivariância, que gera um semivariograma. Uma semivariância resultante de qualquer par de pontos particular plotado contra a distância entre eles foi usada para criar um variograma empírico, ao qual um modelo experimental de variograma foi ajustado. A função ajustada foi definida pelo tipo de função, *nugget*, *sill* e *range*, e foi usada para prever valores em qualquer local desconhecido dentro de um determinado intervalo de erro, utilizando o pacote GSTAT (Pebesma 2004). *Nugget* ou efeito pepita é o valor da semivariância à distância zero, ou seja, representa a variabilidade para escalas menores que a distância de amostragem; *sill* é o intervalo no qual o semivariograma cresce, havendo dependência espacial; e o *range* é o alcance máximo da dependência espacial, indicando que, a partir dessa distância, termina a dependência entre os casos estudados (Opromolla, Dalben e Cardim 2006). Dada a grande heterogeneidade do conjunto de dados, a função de autofitting de variograma recomendada foi aumentada por uma definição baseada em função do variograma modelado que "se ajusta melhor visualmente" as nuvens de pontos, método similar ao usado por Terzer et al. (2013). Resumidamente, nossos variogramas foram calculados com uma distância de *cutoff* de 2000 km, isto é, pontos de dados localizados mais distantes do que 2000 km um do outro não exerceram influência sobre o variograma.

O semivariograma com os dados de $\delta^{13}\text{C}$ assumiu um modelo esférico (Eq. 2), enquanto os dados de $\delta^{15}\text{N}$ foram melhor ajustados ao modelo gaussiano (Eq. 3). Com base nesses modelos foi realizada uma krigagem com buffer de 100 km de cada ponto amostral para verificar os padrões de distribuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo ao longo do gradiente. A isotropia foi assumida para ambos os modelos. Os erros de krigagem foram calculados como a raiz quadrada da variância do estimador de krigagem como saída do GSTAT. Os mapas de krigagem foram gerados no programa ArcGis.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \quad 0 < h < a \quad \text{Eq. 2}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right] \quad 0 < h < d \quad \text{Eq. 3}$$

Onde, C_0 e C_1 são os parâmetros de ajuste; h é distância; $\gamma(h)$ o valor da semivariância para o modelo de ajuste; e d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

Todas as variáveis foram submetidas aos testes de normalidade e homocedasticidade, através dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, adotando valor de significância $P < 0,05$. Foram gerados gráficos do tipo boxplot para visualização dos resultados de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em cada região do gradiente edafo-climático. Para minimizar efeitos de multicolinearidade das variáveis, foi aplicado o fator de inflação da variância (VIF – Variance Inflation Factor) através do pacote USDM (Naimi et al. 2014), com valor de corte VIF designado pelo parâmetro $\theta = 10$, no qual valores acima (VIF > 10) apresentaram problemas de colinearidade e foram retirados de análises posteriores. Variáveis retidas pelo VIF tiveram correlação máxima de $r = 0,7$, sendo elas divididas em um grupo de variáveis edáficas: $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, razão C/N, argila e pH do solo; e outro grupo com variáveis climáticas e de vegetação: MAP, MAT, NDVI, PPB e ET.

A fim de averiguar padrões edafo-climáticos e suas principais variáveis condicionantes do gradiente Caatinga-Cerrado-Pantanal, foram realizadas três análises discriminantes lineares (LDA) pelo pacote MASS (Venables e Ripley 2002). A primeira LDA utilizou apenas variáveis edáficas; a segunda utilizou apenas variáveis climáticas e de vegetação; e a terceira usou todas as variáveis combinadas, assim como no trabalho de Oliveira et al. (2019). Foi examinada a acurácia do modelo usando a abordagem de validação cruzada *leave-one-out*, onde a taxa de reclassificação das categorias acima de 70% representou excelentes performances de discriminação. No espaço bidimensional da LDA, as elipses do intervalo de confiança de 95% foram traçadas para evidenciar uma distinção clara entre os grupos.

Resultados

O semivariograma de $\delta^{13}\text{C}$ do solo possui menor dependência espacial que o modelo de $\delta^{15}\text{N}$ (Fig. 4.2). O semivariograma de $\delta^{13}\text{C}$ foi ajustado ao modelo gaussiano, com *nugget* de 10,2 e *range* de 991,8 km, enquanto o semivariograma de $\delta^{15}\text{N}$ obteve *nugget* de 2,9 e *range* de 770,0 km com modelo esférico (Tab. 4.1).

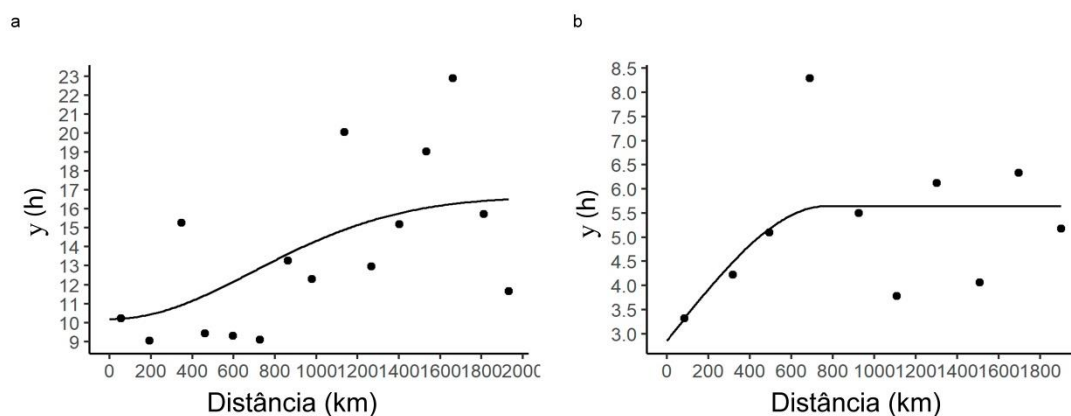


Fig. 4.2: Semivariogramas de $\delta^{13}\text{C}$ (a) e $\delta^{15}\text{N}$ (b) do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal. $\gamma(h)$: valor da semivariância para o modelo.

Tab. 4.1: Descrição dos modelos gerados a partir dos semivariogramas utilizando os dados de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal.

Variáveis	Modelo	Nugget	Sill	Range (km)
$\delta^{13}\text{C}$ do solo	Gaussiano	10.181879	10.181879 + 6.466825	991.8315
$\delta^{15}\text{N}$ do solo	Esférico	2.860082	2.784466 + 2.860082	770.0281

Os mapas interpolados através de krigagem indicam que os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo estão na Caatinga, e os valores mais elevados estão entre os biomas Pantanal e a porção sudoeste do Cerrado (Fig. 4.3a). Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo são maiores na Caatinga e decrescem em direção ao Cerrado e Pantanal (Fig. 4.3b). Existe um padrão similar da distribuição espacial para ambos os isótopos. Os maiores erros no mapeamento de ambos os isótopos foram encontrados na Caatinga (Material suplementar 4.1).

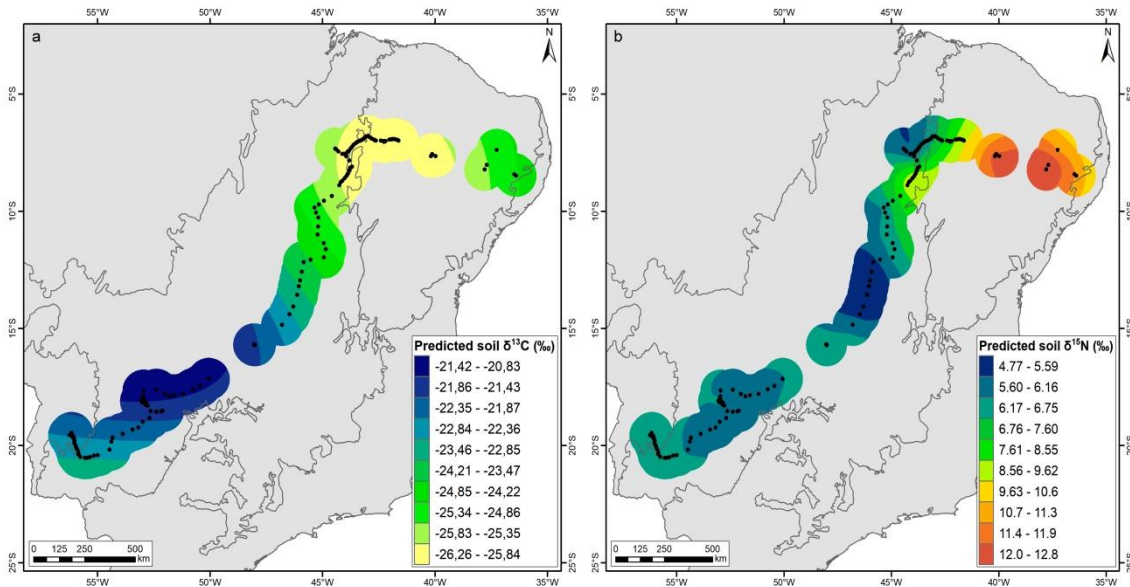


Fig. 4.3: Distribuição espacial de $\delta^{13}\text{C}$ (a) e $\delta^{15}\text{N}$ (b) do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal, gerados através de krigagem com buffer de 100 km e isotropia.

O $\delta^{13}\text{C}$ do solo variou entre -28,2‰ e -13,8‰. Os maiores valores absolutos foram encontrados no Pantanal, que é a ecorregião com a maior variação nos valores de $\delta^{13}\text{C}$, juntamente com Paraná Guimarães (Material suplementar 4.2a). O $\delta^{15}\text{N}$ do solo variou entre 2,2‰ e 17,3‰, sendo que os maiores valores estão no Agreste/Sertão (Material suplementar 4.2b).

A LDA com variáveis edáficas explicou 51,2% dos dados (LD1 = 55,7%, LD2 = 27,5%) (Fig. 4.4a), com média de reclassificação de 45,4%, demonstrando baixo poder de discriminação. Maior taxa de reclassificação foi para a ecorregião de Pantanal, enquanto a menor para a Caatinga (Tab. 4.2). Razão C/N e $\delta^{13}\text{C}$ foram as variáveis que mais explicaram o Eixo 1 (LD1), enquanto o $\delta^{15}\text{N}$ foi o que mais explicou o Eixo 2 (LD2) (Material suplementar 4.3).

A LDA com variáveis climáticas explicou 86,6% dos dados (LD1 = 71,9%, LD2 = 21,3%). Essa LDA distinguiu três grupos, o primeiro composto pela ecorregião Agreste/Sertão; o segundo por Caatinga, Alto Parnaíba, Parnaguá e Chapadão do São Francisco; e o terceiro por Planalto Central, Paraná Guimarães e Pantanal (Fig. 4.4b). Agreste/Sertão, Chapadão do São Francisco, Planalto Central e Pantanal obtiveram uma

acurácia de 100% na reclassificação (Tab. 4.2). MAP, MAT e NDVI foram as variáveis que mais explicaram ambos os eixos dessa LDA (Material suplementar 4.4).

A LDA com todas as variáveis combinadas explicou 87,2% dos dados (LD1 = 70,9%, LD2 = 17,6%) (Fig. 4.4c). Os grupos foram separados de maneira similar à LDA com variáveis climáticas, sendo que as mesmas ecorregiões obtiveram 100% de acurácia na reclassificação (Tab. 4.2), e as variáveis mais significativas para a distribuição também foram MAP, MAT e NDVI (Material suplementar 4.5).

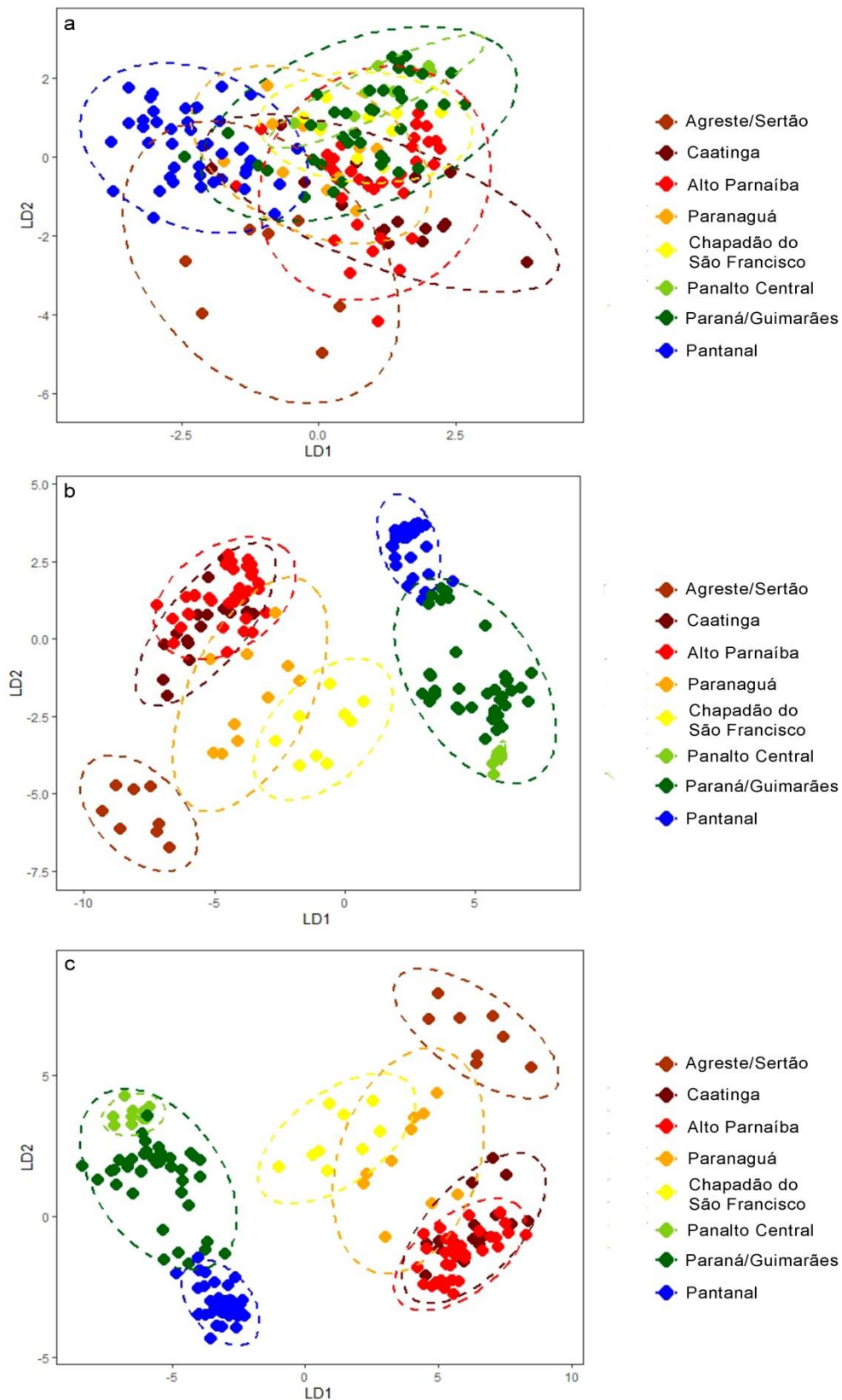


Fig. 4.4: Análise discriminante linear de solos até 20cm de profundidade ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal utilizando variáveis edáficas (a), variáveis climáticas e de vegetação (b) e todas as variáveis combinadas (c).

Tab. 4.2: Acurácia das análises de discriminantes lineares em cada região ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal, utilizando variáveis edáficas, climáticas e todas as variáveis combinadas.

Região	Acurácia (%)		
	Solo	Clima	Solo+Clima
Agreste/Sertão	62,5	100,0	100,0
Caatinga	11,1	61,1	61,1
Alto Parnaíba	54,3	77,1	77,1
Parnaguá	30,0	80,0	80,0
Chapadão do São Francisco	22,2	100,0	100,0
Planalto Central	60,0	100,0	100,0
Paraná Guimarães	32,5	85,0	87,5
Pantanal	90,5	100,0	100,0
Média	45,4	87,9	88,2

Discussão

A distribuição espacial dos isótopos estáveis de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente segue um padrão em que o $\delta^{13}\text{C}$ do solo aumenta da Caatinga em direção ao Pantanal e o $\delta^{15}\text{N}$ diminui nessa mesma direção. Esse padrão parece acompanhar os limites das ecorregiões da Caatinga e do Cerrado (IBGE 2017; Sano et al. 2019). Existe um comportamento distinto entre os solos dos biomas Caatinga e Pantanal, enquanto o Cerrado tem uma grande variabilidade, considerando as variáveis climáticas e ambientais. Variáveis climáticas possuem maior poder de explicação na separação dos grupos, enquanto as variáveis edáficas conseguem distinguir as ecorregiões Agreste/Sertão, Planalto Central e Pantanal. As variáveis climáticas, MAP e MAT, são fundamentais na discriminação das ecorregiões, pois influenciam direta ou indiretamente as variáveis ambientais (Craine et al. 2015; Osborne et al. 2017). O NDVI e a razão C/N também se mostraram variáveis importantes para a distribuição dos dados. Essas variáveis estão relacionadas aos processos de fotossíntese e decomposição, processos fundamentais para a dinâmica da matéria orgânica nos ecossistemas (Bustamante et al. 2016; Conen et al. 2008; Craine et al. 2015).

Ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal, o funcionamento varia de acordo com as variáveis climáticas, principalmente a precipitação. A variação de MAP influencia o acúmulo de N inorgânico no solo (Liu et al. 2017) e as taxas de mineralização da MOS em ambientes áridos (Aranibar et al. 2008). No entanto, a relação das variáveis climáticas com a dinâmica de C e N também parece ser diferente em cada região, principalmente entre a Caatinga e o Pantanal. Dentre as características edáficas, há uma maior influência das variáveis relacionadas a MOS (razão C/N, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) que das variáveis físicas (argila e pH), pois já refletem a interação entre os fatores bióticos e abióticos nos ecossistemas (Craine et al. 2015; Wang et al. 2014), embora os fatores edáficos não tenham sido tão significativos quanto os climáticos. A LDA com variáveis edáficas apresentou maior eficiência nas ecorregiões Agreste/Sertão, Planalto Central e Pantanal. Isso indica que os solos das áreas centrais dos biomas são diferentes, mas as outras áreas fazem parte de uma transição.

A separação desses ecossistemas, no entanto, não ocorre de forma abrupta. A ecorregião Caatinga, por exemplo, apresenta um comportamento similar às áreas de Alto Parnaíba e algumas áreas de Parnaíba que, por sua vez, apresenta uma amplitude maior que também se assemelha à ecorregião do Chapadão do São Francisco. Essas similaridades são causadas principalmente pela baixa variação de temperatura e precipitação nessas áreas (IBGE 2002). Enquanto isso, Planalto Central e Paraná Guimaraes estão agrupados mais próximos à região do Pantanal. A dinâmica da MOS nessas zonas de transição é influenciada principalmente pelo clima, que condiciona uma mescla da vegetação de biomas distintos, formando um comportamento específico nesses ecossistemas (Denk et al. 2017; Lal 2013). Dentro da área de Cerrado, existe uma grande variabilidade de funcionamento, mesmo considerando somente áreas nativas (Carvalho et al. 2017). Essa variação demonstra que esse é um ambiente complexo que possui interface com outros biomas, o que se reflete na variação do tanto nos fatores edafo-climáticos quanto na própria dinâmica da MOS (Bustamante et al. 2004; Sena-Souza et al. 2020).

Na ecorregião Agreste/Sertão a precipitação diminui drasticamente e o potencial de evapotranspiração é maior que a precipitação na maior parte do ano (Santos et al. 2017), o que pode causar maiores perdas relativas de N por desnitrificação (Aranibar et al. 2004; Galbally et al. 2008). As perdas de N gasoso via desnitrificação é um dos

principais processos para a determinação dos valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo, e esse processo está relacionado à quantidade de precipitação (Denk et al. 2017; Liu et al. 2017). Quanto maiores as taxas de desnitrificação maiores os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo.

Áreas do bioma Caatinga possuem MAT mais elevada, maior variação nos valores de PPB e baixa disponibilidade de água e chuvas concentradas em três meses do ano. Solos de regiões mais secas apresentam atividade microbiana mais intensa (Aranibar et al. 2008; Shan et al. 2019). Na Caatinga, as chuvas concentradas aliadas à baixa razão C/N do solo e pH entre 5,0 e 6,5 aumentam as taxas de mineralização e decomposição, o que se reflete nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ mais elevados nessas regiões (Freitas et al. 2015; Santos et al., n.d.). As áreas da Caatinga e de sua transição com o Cerrado apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ em torno de -25‰. Outros estudos mostram que em áreas nativas da Caatinga esses valores ficam em torno de -26‰ nas camadas superficiais do solo (Mendonça et al. 2010). Possivelmente isso ocorre devido aos solos terem sido coletados em locais onde a contribuição de plantas C_3 é maior que de plantas C_4 (Tiessen et al. 2003), além da presença de muitas plantas com ciclo fotossintético do tipo CAM. Outra possível explicação é que as espécies herbáceas são rapidamente consumidas por rebanhos que acessam áreas nativas e, posteriormente, pela biota do solo, o que faz os solos da Caatinga armazenarem a matéria orgânica oriunda de espécies arbóreas.

A variabilidade dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ na região que vai do Cerrado ao Pantanal ocorre devido à presença de diferentes estratos da vegetação, já que as gramíneas são predominantemente C_4 e as arbóreas predominantemente C_3 . No Cerrado, áreas florestais apresentam valores próximos a -24‰ e áreas mais abertas possuem valores médios de -20‰ (Silva et al. 2010), enquanto no Pantanal os valores encontrados por Victoria et al. (1995) vão de -17‰ a -27‰. Os valores mais altos de $\delta^{13}\text{C}$ e de precipitação estão nas áreas de Cerrado. Maior disponibilidade de água significa que os estômatos podem ficar abertos por mais tempo, o que diminui os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em plantas C_3 . No entanto, os solos do Cerrado recebem grande contribuição de vegetação C_4 , o que indica que eleva os valores de $\delta^{13}\text{C}$. Portanto, a estrutura da vegetação controla os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo (Griffith et al. 2017), por isso o semivariograma com dados de $\delta^{13}\text{C}$ apresentou um elevado valor de *nugget*, indicando a existência de uma grande variação desses valores em pontos geograficamente próximos (Terzer et al. 2013).

De modo geral, a porção central do Cerrado possui solos mais argilosos, o que tende a aumentar a estabilidade da MOS e o $\delta^{15}\text{N}$. No entanto, o Cerrado possui uma alta razão C/N e concentração de NH_4^+ no solo, além de baixas taxas de mineralização e fixação biológica de N (Nardoto e Bustamante 2003). A associação das plantas com os organismos do solo e a profundidade das raízes que acessam diferentes fontes de N do solo, propicia uma variedade de estratégias das plantas, que se reflete na grande amplitude de valores de $\delta^{15}\text{N}$ foliar depositada no solo, deixando-o com valores intermediários de $\delta^{15}\text{N}$ (Bustamante et al. 2004; Catão et al. 2016; Parron, Bustamante e Camargo 2004).

O Pantanal possui maior disponibilidade de água ao longo do ano, o que aumenta a proporção de vegetação fotossinteticamente ativa (NDVI) e a evapotranspiração. Entretanto, o alagamento constante do solo em algumas áreas do Pantanal impede o estabelecimento de espécies arbóreas, formando um mosaico com diferentes estratos de vegetação, o que explica a grande variação do $\delta^{13}\text{C}$ no solo. O excesso de água no solo também impede a ação de organismos no solo, o que implica em valores de $\delta^{15}\text{N}$ mais baixos no Pantanal que em solos mais áridos. No entanto, os nitrificadores no solo podem ser estimulados a liberar N_2O em baixa disponibilidade de O_2 (Bollmann e Conrad, 1998). Os resultados de Liengaard et al. (2012) sugerem que o Pantanal pode estar contribuindo com 1,7% de emissão global anual de N_2O durante a estação seca e que eventos de umedecimento natural repentino podem causar emissão significativa de N_2O comparável a solos agrícolas altamente fertilizados. A dinâmica sazonal de alagamento do solo é, portanto, fundamental para a dinâmica da MOS no Pantanal e para que o $\delta^{15}\text{N}$ do solo apresente valores intermediários.

Caatinga e Pantanal são ecossistemas com funcionamentos distintos, devido principalmente às condições de disponibilidade de água, que condiciona os processos de fotossíntese, mineralização e decomposição. O Cerrado é um ecossistema com grande variabilidade, assemelhando-se à Caatinga na sua porção nordeste e ao Pantanal na porção sudoeste. A transição entre Cerrado e Caatinga é caracterizada pela grande variação da produtividade primária e pela alta razão C/N do solo, com valores mais baixos de $\delta^{13}\text{C}$ intermediários de $\delta^{15}\text{N}$, comparado aos outros biomas estudados. Já a transição entre Cerrado e Pantanal se destaca pela grande variabilidade do $\delta^{13}\text{C}$ e por valores menores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo, além de maiores taxas de precipitação e disponibilidade de água no solo, o que aumenta os valores de NDVI.

Conclusões

Os solos de Pantanal e Caatinga apresentaram comportamentos distintos em relação às variáveis climáticas e ambientais. A porção nordeste do Cerrado se assemelha às áreas da Caatinga, enquanto a região central e sudoeste do Cerrado são mais similares ao Pantanal. Precipitação, temperatura, razão C/N e NDVI foram as variáveis mais significativas para a discriminação das ecorregiões.

O $\delta^{13}\text{C}$ no solo apresentou uma grande amplitude de valores nas ecorregiões do Cerrado e no Pantanal, mas possui valores menores nas áreas de Caatinga e Agreste/Sertão. O $\delta^{15}\text{N}$ do solo foi maior no Agreste/Sertão e na transição entre Caatinga e Alto Parnaíba que nas áreas que vão do Planalto Central até o Pantanal. Precipitação e temperatura são fatores essenciais para a determinação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal.

Agradecimentos

Este estudo foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através da bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor. O trabalho de campo e as análises laboratoriais foram financiados pelo projeto número 23038.006832/2014-11 - Edital CAPES 25/2014 - Pró-Forenses.

Referências

Amundson, R G, A T Austin, E A G Schuur, K Yoo, V Matzek, C Kendall, A Uebersax, D Brenner, and W T Baisden. 2003. "Global Patterns of the Isotopic Composition of Soil and Plant Nitrogen." *Global Biogeochemical Cycles* 17 (1): 10. <https://doi.org/10.1029/2002GB001903>.

Aranibar, J N, I C Anderson, H E Epstein, C J W Feral, R J Swap, J Ramontsho, and S A Macko. 2008. "Nitrogen Isotope Composition of Soils, C3 and C4 Plants along Land Use Gradients in Southern Africa." *Journal of Arid Environments* 72 (4): 326–37. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.007>.

Aranibar, J N, L Otter, S A Macko, C. J.W. Feral, H. E. Epstein, P R Dowty, F Eckardt,

H H Shugart, and R. J. Swap. 2004. "Nitrogen Cycling in the Soil-Plant System along a Precipitation Gradient in the Kalahari Sands." *Global Change Biology*, 259–373. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2003.00698.x>.

Bustamante, M M C, L A Martinelli, D A Silva, P B Camargo, C A Klink, T F Domingues, and R V Santos. 2004. "15N Natural Abundance in Woody Plants and Soils of Central Brazilian Savannas (Cerrado)." *Ecological Applications* 14 (4 SUPPL.). <https://doi.org/10.1890/01-6013>.

Bustamante, M M C., I Roitman, T M Aide, A Alencar, L O Anderson, L Aragão, G P Asner, et al. 2016. "Toward an Integrated Monitoring Framework to Assess the Effects of Tropical Forest Degradation and Recovery on Carbon Stocks and Biodiversity." *Global Change Biology* 22 (1): 92–109. <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>.

Carvalho, D C, M G Pereira, R F Guareschi, and D D C Maranhão. 2017. "Estoque de Carbono e Nitrogênio e Abundância Natural de $\delta^{13}\text{C}$ Na Estação Ecológica de Pirapitinga, MG." *Floresta e Ambiente* 24. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.009215>.

Carvalho Júnior, O A, N C Silva, A P F Carvalho, A F Couto Junior, C R Silva, Y E Shimabukuro, R F Guimarães, and R A T Gomes. 2012. "Combining Noise-Adjusted Principal Components Transform and Median Filter Techniques for Denoising MODIS Temporal Signatures." *Revista Brasileira de Geofísica* 30 (2): 147–57.

Catão, E C P, F A C Lopes, M R Rubini, G B Nardoto, J I Prosser, and R H Krüger. 2016. "Short-Term Impact of Soybean Management on Ammonia Oxidizers in a Brazilian Savanna under Restoration as Revealed by Coupling Different Techniques." *Biology and Fertility of Soils* 52 (3): 401–12. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1086-0>.

Conen, F, M Zimmermann, J Leifeld, B Seth, and C Alewell. 2008. "Relative Stability of Soil Carbon Revealed by Shifts in $\delta^{15}\text{N}$ and C : N Ratio." *Biogeosciences* 5: 123–28.

Craine, J M, A J Elmore, L Wang, L Augusto, W T Baisden, E N J Brookshire, M D Cramer, N J Hasselquist, E A Hobbie, A Kahmen, et al. 2015. "Convergence of Soil Nitrogen Isotopes across Global Climate Gradients." *Scientific Reports* 5: 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep08280>.

Denk, T R A, J Mohn, C Decock, D Lewicka-Szczebak, E Harris, K Butterbach-Bahl, R

Kiese, and B Wolf. 2017. "Soil Biology & Biochemistry The Nitrogen Cycle : A Review of Isotope Effects and Isotope Modeling Approaches." *Soil Biology and Biochemistry* 105: 121–37. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.015>.

Ehleringer, J R, D R Bowling, L B Flanagan, J Fessenden, B Helliker, L A Martinelli, and J P Ometto. 2002. "Stable Isotopes and Carbon Cycle Processes in Forests and Grasslands." *Plant Biology* 4: 181–89.

Embrapa. 2017. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Edited by P C Teixeira, G K Donagemma, Ademir Fontana, and W G Teixeira. 3rd ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

http://www.cse.edu.uy/sites/www.cse.edu.uy/files/documentos/Liccom_Camejo_2011-07-28.pdf.

Fick, S E, and R J Hijmans. 2017. "WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas." *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302–15. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

Freitas, A D S, E V S B Sampaio, A P S Ramos, M R Barbosa, R P Lyra, and E L Araújo. 2015. "Nitrogen Isotopic Patterns in Tropical Forests along a Rainfall Gradient in Northeast Brazil." *Plant and Soil* 391 (1–2): 109–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2417-5>.

Galbally, I E, W V Kirstine, C P M Meyer, and Y P Wang. 2008. "Soil-Atmosphere Trace Gas Exchange in Semiarid and Arid Zones." *Journal of Environmental Quality* 37 (2): 599–607. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0445>.

Griffith, D M, J M Cotton, R L Powell, N D Sheldon, and C J Still. 2017. "Multi-Century Stasis in C3 and C4 Grass Distributions across the Contiguous United States since the Industrial Revolution." *Journal of Biogeography* 44 (11): 2564–74. <https://doi.org/10.1111/jbi.13061>.

Hobbie, E A, and A P Ouimette. 2009. "Controls of Nitrogen Isotope Patterns in Soil Profiles." *Biogeochemistry* 95 (2): 355–71. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9328-6>.

Hogberg, P. 1997. "15N Natural Abundance in Soil-Plant Systems." *New Phytologist* 137: 179–203. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00808.x>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2002. "Mapa Climático Do Brasil

- IBGE.”

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2017. Divisão Regional Do Brasil Em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. https://www.ibge.gov.br/apps/regioes_geograficas/.

Lal, R. 2013. “Soil Carbon Management and Climate Change.” *Carbon Management* 4 (4): 439–62. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.31>.

Lienggaard, L, L P Nielsen, N P Revsbech, A Priemé, B Elberling, A Enrich-Prast, and M Köhl. 2012. “Extreme Emission of N₂O from Tropical Wetland Soil (Pantanal, South America).” *Frontiers in Microbiology* 3 (JAN): 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00433>.

Liu, D, W Zhu, X Wang, Y Pan, C Wang, D Xi, E Bai, Y Wang, X Han, and Y Fang. 2017. “Abiotic versus Biotic Controls on Soil Nitrogen Cycling in Drylands along a 3200 Km Transect.” *Biogeosciences* 14 (4): 989–1001. <https://doi.org/10.5194/bg-14-989-2017>.

Martinelli, L A, G B Nardoto, A Soltangheisi, C R G Reis, A L Abdalla-Filho, P B Camargo, T F Domingues, et al. 2020. “Determining Ecosystem Functioning in Brazilian Biomes through Foliar Carbon and Nitrogen Concentrations and Stable Isotope Ratios.” *Biogeochemistry* 2. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00714-2>.

Mendonça, L, H Frischkor, M Snatiago, P B de Camargo, J O G Lima, and J Mendes Filho. 2010. “Identificação de Mudanças Florestais Por ΔC e ΔN Dos Solos Da Chapada Do Araripe. Ceará.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14 (March): 314–19. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000300012>.

Miralles, D G, T R H. Holmes, R A M. De Jeu, J H Gash, A G C A Meesters, and A J Dolman. 2011. “Global Land-Surface Evaporation Estimated from Satellite-Based Observations.” *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (2): 453–69. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>.

Naimi, B, N A S Hamm, T A Groen, A K Skidmore, and A G Toxopeus. 2014. “Where Is Positional Uncertainty a Problem for Species Distribution Modelling?” *Ecography* 37 (2): 191–203. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x>.

- Nardoto, G B, and M M C Bustamante. 2003. "Effects of Fire on Soil Nitrogen Dynamics and Microbial Biomass in Savannas of Central Brazil." *Pesq. Agropec. Bras.* 38 (1): 955–62.
- Oliveira, G C, M R Francelino, D M Arruda, E I Fernandes-Filho, and C E G R Schaefer. 2019. "Climate and Soils at the Brazilian Semiarid and the Forest-Caatinga Problem: New Insights and Implications for Conservation." *Environmental Research Letters* 14 (10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3d7b>.
- Ometto, J P H B, J R Ehleringer, T F Domingues, J A Berry, F Y Ishida, E A Mazzi, N Higuchi, L B Flanagan, G B Nardoto, and L A Martinelli. 2006. "The Stable Carbon and Nitrogen Isotopic Composition of Vegetation in Tropical Forests of the Amazon Basin, Brazil." *Biogeochemistry*, no. July: 251–74. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5517-1>.
- Opromolla, P A, I Dalben, and M Cardim. 2006. "Análise Geoestatística de Casos de Hanseníase No Estado de São Paulo, 1991-2002." *Rev Saúde Pública* 40 (5): 907–13.
- Osborne, B B, M K Nasto, G P Asner, C S Balzotti, C C Cleveland, B W Sullivan, P G Taylor, A R Townsend, and S Porder. 2017. "Climate, Topography, and Canopy Chemistry Exert Hierarchical Control Over Soil N Cycling in a Neotropical Lowland Forest." *Ecosystems* 20 (6): 1089–1103. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0095-7>.
- Parron, L M, M M C Bustamante, and P B Camargo. 2004. "Composição Isotópica de Carbono e Nitrogênio Em Solos e Plantas de Uma Mata de Galeria: Efeito Do Gradiente Topográfico." *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Cerrados* 127: 24.
- Pebesma, E J. 2004. "Multivariable Geostatistics in S: The Gstat Package." *Computers and Geosciences* 30 (7): 683–91. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012>.
- Peri, P L, B Ladd, D A Pepper, S P Bonser, S W Laffan, and W Amelung. 2012. "Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and Nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) Stable Isotope Composition in Plant and Soil in Southern Patagonia's Native Forests." *Global Change Biology* 18 (1): 311–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02494.x>.
- Powell, R L, E Yoo, and C J Still. 2012. "Vegetation and Soil Carbon-13 Isoscapes for South America: Integrating Remote Sensing and Ecosystem Isotope Measurements." *Ecosphere* 3 (11): art109. <https://doi.org/10.1890/es12-00162.1>.

Ribeiro, K, E R Sousa-Neto, J A Carvalho, J R S Lima, R S C Menezes, P J Duarte-Neto, G S Guerra, and J P H B Ometto. 2016. "Land Cover Changes and Greenhouse Gas Emissions in Two Different Soil Covers in the Brazilian Caatinga." *Science of the Total Environment* 571: 1048–57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>.

Rouse, J W, R H Hass, J A Schell, and D W Deering. 1973. "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS." *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium* 1: 309–17. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>.

Sano, E E, A A Rodrigues, E S Martins, G M Bettiol, M M C Bustamante, A S Bezerra, A F Couto Junior, V Vasconcelos, J Schüler, and E L Bolfe. 2019. "Cerrado Ecoregions: A Spatial Framework to Assess and Prioritize Brazilian Savanna Environmental Diversity for Conservation." *Journal of Environmental Management* 232 (July 2018): 818–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>.

Santos, C A G, R M Silva, A M Silva, and R M Brasil Neto. 2017. "Estimation of Evapotranspiration for Different Land Covers in a Brazilian Semi-Arid Region: A Case Study of the Brígida River Basin, Brazil." *Journal of South American Earth Sciences* 74: 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.01.002>.

Santos, F L S, V Vasconcelos, K Jesus, G Neves, A F Couto Junior, E V Sampaio, J P Ometto, R S C Menezes, and G B Nardoto. n.d. "Climatic Controls on the Soil Nitrogen Isotopic Composition across the Physiographic Regions of the Pernambuco State, Northeast Brazil." *Geoderma Regional*.

Sena-Souza, J P, B Z Houlton, L A Martinelli, and G B Nardoto. 2020. "Reconstructing Continental-Scale Variation in Soil $\Delta^{15}\text{N}$: A Machine Learning Approach in South America." *Ecosphere* 11 (8). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3223>.

Shan, Y, L Suo, X Zhao, and L Wu. 2019. "Catena Composition and Variation of Soil $\delta^{15}\text{N}$ Stable Isotope in Natural Ecosystems." *Catena* 183 (December 2018): 104236. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104236>.

Silva, L C R, M Haridasan, L S L Sternberg, A C Franco, and W A Hoffmann. 2010. "Not All Forests Are Expanding over Central Brazilian Savannas." *Plant and Soil* 333 (1): 431–42. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0358-6>.

Singh, M, B Sarkar, S Sarkar, J Churchman, N Bolan, S Mandal, M Menon, TJ

Purakayastha, and DJ Beerling. 2017. Stabilization of Soil Organic Carbon as Influenced by Clay Mineralogy. *Advances in Agronomy*. 1st ed. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.001>.

Terzer, S, L I Wassenaar, L J Araguás-Araguás, and P K Aggarwal. 2013. “Global Isoscapes for $\Delta^{18}\text{O}$ and $\Delta^2\text{H}$ in Precipitation: Improved Prediction Using Regionalized Climatic Regression Models.” *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (11): 4713–28. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4713-2013>.

Tiessen, H, R S C Menezes, I H Salcedo, and B Wick. 2003. “Organic Matter Transformations and Soil Fertility in a Treed Pasture in Semiarid NE Brazil.” *Plant and Soil* 252 (2): 195–205. <https://doi.org/10.1023/A:1024762501920>.

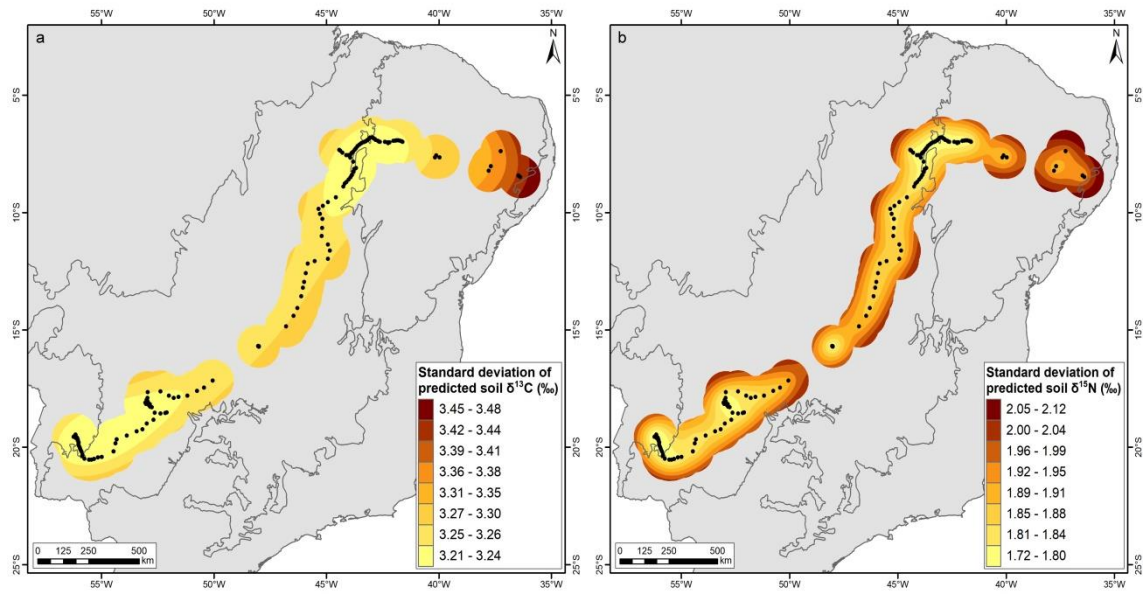
Venables, W N, and B D Ripley. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Statistics and Computing.

Victoria, R L, F Fernandes, L A Martinelli, M C Piccolo, P B Camargo, and S Trumbore. 1995. “Past Vegetation Changes in the Brazilian Pantanal Arboreal–Grassy Savanna Ecotone by Using Carbon Isotopes in the Soil Organic Matter.” *Global Change Biology* 1 (3): 165–71. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00018.x>.

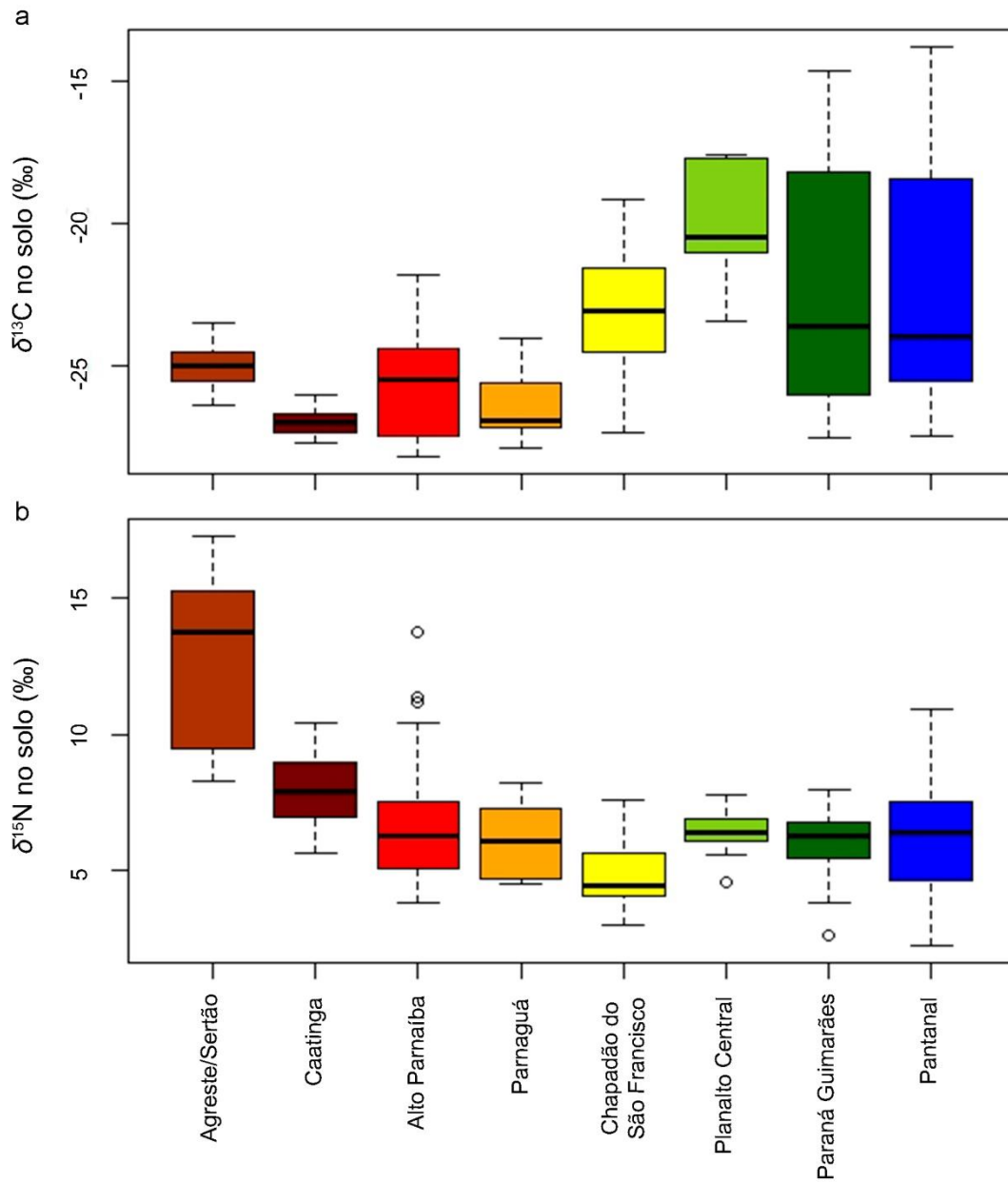
Vitousek, P M, and R W Howarth. 1991. “Nitrogen Limitation on Land and in the Sea: How Can It Occur?” *Biogeochemistry* 13 (2): 87–115. <https://doi.org/10.1007/BF00002772>.

Wang, C, X Wang, D Liu, H Wu, X Lu, Y Fang, and W Cheng. 2014. “Aridity Threshold in Controlling Ecosystem Nitrogen Cycling in Arid and Semi-Arid Grasslands.” *Nature Communications* 5: 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms5799>.

Material suplementar – Capítulo 4



Material suplementar 4.1: Desvio padrão da distribuição espacial de $\delta^{13}\text{C}$ (a) e $\delta^{15}\text{N}$ (b) do solo ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal



Material suplementar 4.2: Boxplot com valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo (a) e $\delta^{15}\text{N}$ do solo (b) em cada ecoregião ao longo do gradiente climático Caatinga-Cerrado-Pantanal.

Material suplementar 4.3: Coeficientes das discriminantes lineares ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal utilizando variáveis edáficas.

Variáveis	LD1	LD2
$\delta^{15}\text{N}$	--0.1801279	-0.90884749
$\delta^{13}\text{C}$	-0.7179112	0.42620421
Razão C/N	1.2334033	-0.09606763
Argila	0.4602703	0.66488111
pH	-0.5712904	0.65825342

Material suplementar 4.4: Coeficientes das discriminantes lineares ao longo do gradiente edafo-climático Caatinga-Cerrado-Pantanal utilizando variáveis climáticas e de vegetação.

Variáveis	LD1	LD2
MAP	3.16366074	1.4428712
MAT	-1.24135334	3.0987322
NDVI	0.87976968	0.7433149
PPB	-0.02499307	-0.6324665
ET	0.45994771	0.5632725

MAP: Média anual de precipitação; MAT: Média anual de temperatura; NDVI: Índice de vegetação da diferença normalizada; PPB: Produtividade primária bruta; ET: Potencial de evapotranspiração.

Material suplementar 4.5: Coeficientes das discriminantes lineares ao longo do gradiente edafo-climático entre Caatinga-Cerrado-Pantanal utilizando todas as variáveis combinadas.

Variáveis	LD1	LD2
$\delta^{15}\text{N}$	-0.44773882	-0.10677073
$\delta^{13}\text{C}$	-0.01625182	0.24236808
Razão C/N	0.50907363	0.05298773
MAP	-3.54210211	1.37796096
MAT	1.80154835	3.14070069
Argila	0.34860133	-0.09103651
pH	-0.19760829	0.36222842
NDVI	-0.83968529	0.77230218
PPB	0.15661826	-0.53635948
ET	-0.53205317	0.55174692

MAP: Média anual de precipitação; MAT: Média anual de temperatura; NDVI: Índice de vegetação da diferença normalizada; PPB: Produtividade primária bruta; ET: Potencial de evapotranspiração.