

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA

Avaliação dos solos Amazônicos: integração de dados multifontes
para caracterização das condições edáficas.

Monique Rodrigues da Silva Andrade Maia

Manaus, Amazonas
Novembro, 2015

Monique Rodrigues da Silva Andrade Maia

**Avaliação dos solos Amazônicos: integração de dados multifontes
para caracterização das condições edáficas.**

Dr. Carlos Alberto Nobre Quesada
Orientador

Dra. Liana Oighenstein Anderson
Coorientadora

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação
em Ecologia, como parte dos
requisitos para obtenção do
título de Mestre em Biologia
(Ecologia).

Manaus, Amazonas
Novembro, 2015

BANCA EXAMINADORA DA DEFESA ORAL PÚBLICA

Dr. Paulo Maurício de Alencastro Graça
(INPA)

Dra. Sônia Sena Alfaia
(INPA)

Dra. Fernanda Tunes Villani
(IFAM)

M217 Maia, Monique Rodrigues da Silva Andrade

Avaliação dos solos Amazônicos: integração de dados multifontes para caracterização das condições edáficas / Monique Rodrigues da Silva Andrade Maia. --- Manaus: [s.n.], 2015.

x, 63 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) --- INPA, Manaus, 2015.

Orientador : Carlos Alberto Nobre Quesada.

Coorientador : Liana Oighenstein Anderson.

Área de concentração: Ecologia.

1. Solo amazônica. 2. Ciclos Biogeoquímicos. 3. Nutrientes – Amazônia. I. Título.

CDD 631.46

Sinopse: Estudou-se a variabilidade dos atributos primários de solo na Bacia Amazônica tanto em profundidade quanto em disposição espacial, através de uma padronização de informações. Avaliou a relação entre a disponibilidade dos nutrientes na Bacia Amazônica e o tipo de solo, período geológico e material de origem da rocha.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus orientadores Liana Anderson e Carlos Alberto Quesada pela oportunidade, recepção, amizade, confiança e paciência.

Ao grupo de pesquisadores do Laboratório de Agricultura e Floresta (LAF) / INPE - São José dos Campos: Andre Lima, Isaque , Fabien, Camila Valeria, Leticia Kirsten, Kleber Trabaquine, Cassia, Egidio, Luiz Aragão, Laura Vedovato. Aos novos amigos Florian Hofhansl e Lucia Fuchlueger, aos amigos de turma de mestrado, principalmente Debora Najara, Angelica e Tainara Sobroza. Agradeço a CAPES pelo financiamento e finalmente a minha mãe Maria Helena da Silva que suportou dias difíceis na minha ausência e me apoiou todo tempo nessa pesquisa.

“Os homens semeiam na terra o que colherão na vida espiritual:
os frutos da sua coragem ou da sua fraqueza.”
(Allan Kardec)

Resumo

A Bacia Amazônica apresenta uma grande diversidade de solos. Essa heterogeneidade se deve aos eventos geológicos ocorridos na região ao longo do tempo e as formações da rocha, podendo encontrar fragmentos de rochas antigas assim como exposição e emersão de rochas e material sedimentar recente. Com a exposição, lixiviação, altas temperaturas e atuação de organismos decompositores (fungos e bactérias), as estruturas das rochas são modificadas e reconfiguradas segundo as ligações de íons e cátions disponíveis nos solos. Esses elementos nos solos são importante para a vegetação e controlam a dinâmica florestal, sendo recurso precursor do desenvolvimento das plantas. Esforços para determinar as características dos solos Amazônicos tem sido feitos nos últimos 50 anos mas devido a metodologias e abordagens divergentes essas informações contribuem de forma limitada para pesquisas de dinâmicas florestais e investigações de mudanças globais. Com isso se fez necessária a compilação de informações e estudos de solos na Bacia Amazônica e harmonização dessas informações para padronizar, agrupar e definir uma base de dados ampla para a região Amazônica que seja metodologicamente consistente. Este foi o objetivo central desta dissertação. Para isso, foram compiladas as três bases de dados disponíveis: RADAMBRASIL, RAINFOR e WISE, somando-se assim mais de três mil amostras de solo coletadas no campo. Os nutrientes avaliados foram Carbono (C), Nitrogênio (N), Potássio (K), Alumínio (Al), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca) e Sódio (Na). Os dados foram cuidadosamente pré-processados para selecionar somente amostras de solos em áreas de florestas pristinas. Em seguida, foi aplicada uma função Spline quadrática para a geração de informações comparáveis para as diferentes profundidades de solos amostradas nos três projetos mencionados acima. A partir das amostras homogeneizadas, foram realizadas análises sobre a variabilidade espacial e nas diferentes profundidades dos nutrientes. Esta espacialização dos dados permitiu a caracterização das variações de nutrientes nos diferentes solos Amazônicos e finalmente avaliou-se a distribuição segundo o material de origem e a idade geológica. A média dos valores entre as profundidades mostrou se potencialmente mais interessante para a exploração da variabilidade espacial dos elementos. Em relação ao material de origem e sua idade geológica, conclui-se que as variações na concentrações de elementos no solo ocorrem devido a interações dos efeitos da qualidade do material de origem com sua idade geológica, tendo os solos mais jovens e de melhor material de origem apresentado maiores concentrações de nutrientes dos solos.

Palavras chave: nutrientes do solo, Amazônia, variabilidade espacial, harmonização de base de dados de solo.

Abstract

The Amazon Basin is very diverse in soils. Such heterogeneity is due to the geological events that have occurred through time as well as the diversity of parent material, in which reminiscent of old rock fragments occur along with recent exposed rocks. With the strong weathering conditions from high temperatures, intense rainfall and biological activity, the structure of rocks and sediments are modified and release nutrients in the soil. Such elements are very important to sustain vegetation and largely control the dynamics of the forest. Efforts to determine the characteristics of Amazonian soils have been made in the last 50 years, but because of often different methodologies used to survey the soils, the existing information is usually of limited used for ecological research and studies of climate change impacts. Thus there is a perceived need to compile the existing databases and harmonize it using methods to standardize data to create a large scale, and methodology consistent Amazonian soil database. This was the objective of this work. To carry this out, I have compiled the three biggest soil databases for Amazonia: RADAMBRASIL, RAINFOR and WISE, which altogether add up to more than three thousand samples collected and analyzed for the region. The elements studied were carbon (C), nitrogen (N), potassium (K), magnesium (Mg), calcium (Ca) and aluminium (Al). All data was carefully filtered to exclude any samples which were located outside of pristine vegetation areas. Following that, a quadratic spline function was applied to the soil profiles to generate comparable depth to all databases. Once all samples were homogenized, an analysis of spatial variation of soil properties was performed. Such spatial representation of the dataset allowed interpreting the soil nutrient distribution across the basin and its relationship with parent material and geological age. Conclusion is that soil elemental concentration is a function of interactions between quality of parent material and geological age, with the least pedogenetic developed soils on better parent material having the highest elemental concentrations.

Key words: soil nutrients, Amazonia, soil spatial variation, soil database harmonization

Sumário

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras.....	11
Lista de Tabelas	11
1 INTRODUÇÃO GERAL	12
2 OBJETIVO GERAL.....	15
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 INTRODUÇÃO.....	17
4 MATERIAIS	20
4.1 Área de estudo	20
4.2 Dados	21
4.2.1 Base de dados RADAM	22
4.2.2 Base de dados WISE	22
4.2.3 Base de dados RAINFOR.....	22
4.2.4 Base de dados SOTERLAC.....	23
5 MÉTODOS.....	23
5.1 Pré-processamento da base de dados	23
5.1.1 Seleção das amostras com base na literatura do RADAM	23
5.1.2 Seleção das amostras sem informações por imagem.....	24
5.1.3 Conversões das unidades	24
5.2 Integração da base de dados.....	25
5.3 Análise dos dados	26
5.3.1 Variabilidade dos nutrientes	26
5.3.2 Variabilidade dos nutrientes por tipo de solo	26
5.3.3 Variabilidade dos nutrientes por idade geológica.....	26
5.3.4 Variabilidade dos nutrientes por material de origem da rocha.....	27
5.3.5 Análises estatísticas	27
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6.1 Base de dados homogeneizadas	27
6.2 Variabilidades espacial dos nutrientes do solo	28
6.2.1 Variabilidade Espacial media de 0 a 30 cm de profundidade	28
6.3 Variabilidades dos nutrientes por tipo de solo, por período geológico, material	33
de origem	33

6.3.1	Tipos de solo.....	33
6.3.2	Material de origem.....	37
6.3.3	Período geológico.....	40
6.4	Análises estatísticas.....	42
6.4.1	Modelo NMDS.....	42
6.4.2	Análise de Variância Multivariada (ANOVA Multivariada).....	46
7	CONCLUSÃO.....	47
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
	Material Suplementar I Análise de perfis verticais de solo.....	56
	Material Suplementar – II Análise de estrutura física do solo.....	59

Lista de Figuras

Figura 1: Área de estudo.....	20
Figura 2: Localização das amostras de solo disponíveis pelas três iniciativas compiladas por este estudo.....	21
Figura 3: Exemplo da localização de amostras sem identificação de uso e cobertura do local de coleta. Ao fundo observa-se a imagem do Google Earth, acoplada a outras bases de sensoriamento remoto compiladas neste estudo para identificação do uso e cobertura nos anos de aquisição das amostras.....	24
Figura 4: Exemplo da função <i>Spline</i> aplicado aos dados de solo. Da esquerda pra direita apresentam se os passos executados da função. O primeiro quadro mostra a identificação das profundidades do dado original. Segundo quadro a linha de tendência suavizada, em vermelho. O passo seguinte (quadro 3) são identificadas as concentrações do nutriente por profundidade. O ultimo quadro (direita) apresenta o resultado final da função com o melhor ajuste da curva.....	26
Figura 5 a: Gradiente de porcentagem de Carbono.....	30
Figura 6 Distribuição da concentração de nutrientes por tipos de solos Amazônicos. A legenda das classes de solos apresentadas no eixo x encontram-se na tabela 4.....	36
Figura 7 Distribuição da concentração e porcentagem de nutrientes por material de origem geológica da Amazônia. A legenda das classes do material de origem geológica apresentados no eixo x encontram-se na tabela 5. * ECEC (Capacidade Efetiva de Cátions Trocáveis = $K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + Al^{3+}$).....	39
Figura 8 Distribuição da concentração e porcentagem de nutrientes por períodos geológicos na Amazônia. A legenda das classes do material de origem geológica apresentados no eixo x encontram-se na tabela 6. * ECEC (Capacidade Efetiva de Cátions Trocáveis = $K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + Al^{3+}$).....	42
Figura 9 a Distribuição dos nutrientes por idade geológica	43

Lista de Tabelas

Tabela 1 Base de dados e unidades de conversão.....	25
Tabela 2: Exemplo da organização da tabela de dados após a harmonização.....	28
Tabela 3: Análise dos valores de máximo, mínimo, média e mediana, dos nutrientes com base em 1844 amostras de solo, compiladas pelas base do RADAM e WISE.....	28
Tabela 4: Numeração das classes e legenda por subclasse de solo e nome do grande grupo de solos.	36
Tabela 5: Legenda das classes do material de origem geológica.....	39
Tabela 7. ANOVA Multivariada de permutações	46

1 INTRODUÇÃO GERAL

A floresta Amazônica constitui um dos ecossistemas mais importantes do planeta, se distingue de muitas outras regiões com alta biodiversidade devido a grande extensão de floresta intocada (Fearnside 2013). Em termos globais, corresponde a aproximadamente 50% das florestas tropicais remanescentes (Malhi et al. 2004) sendo responsável por reciclar em torno de 25 a 50% da precipitação incidente (Costa e Foley 2000) e fundamental no ciclo global do carbono (Prentice et al. 2001). Estima-se que o carbono estocado nas florestas Amazônicas equivalem a cerca de 10 anos de emissões de gases de efeito estufa antrópicas (Saatchi et al. 2011).

Com as mudanças climáticas a intensidade de eventos do El Niño aumentam (Hansen et al., 2006), gerando uma redução de até 50% nos períodos de chuva (Uppala et al. 2005), atingindo principalmente a Amazônia ocidental (Nepstad et al. 1999). Esses eventos climáticos são tidos como fenômenos raros de ocorrência em intervalos de centena de anos (Li et al. 2006; Good et al. 2008; Marengo et al. 2008). E recentes estudos preveem um aumento na frequência de secas para os últimos 100 anos (Cox et al. 2008; Harris et al. 2008; Malhi et al. 2009). As secas causam declínio na umidade do ar e solo gerando impactos como inflamabilidade da vegetação e mortalidade de arvores (Saatchi et al. 2013, Nepstad et al. 2004, Aragão e Shimabukuro 2010).

Um estudo realizado recentemente encontrou que a floresta a partir da década de 90 emitiu mais carbono para a atmosfera do que absorveu (Brienen, 2015) e esse resultado foi associado com eventos de secas, mas as causas fisiológicas na vegetação ainda não são completamente compreendidas, sendo a explicação mais provável que a influência de fatores limitativos - como limitação de nutrientes, disponibilidade de água, estresse de temperatura – sejam as causas dessas mortalidades (Hedin, 2015).

A Bacia Amazônica é considerada pobre em nutrientes no solo e limitada na disponibilidade de fósforo sendo os cátions (Al;Mg;Ca;K;Na) retornáveis e ciclados dentro da própria floresta (Luizão, 2007) com o auxílio da decomposição de liteiras e a própria movimentação de aerossóis (Artaxo, 2006; Pauliquevis, 2007) e dinâmica das águas (períodos de cheias e vazantes dos rios) (Haugaasen, 2006). A região apresenta uma diversidade de solos (Jenny, 1940, Sombroek, 1966, Higgins, 2011), e vegetação (Phillips et al. 2003; Tuomisto et al 2002, 2003a, ter Steege et al. 2006, de Higgins et al. 2011, Steege et al 2013) e espera-se que a resposta de adaptação da vegetação as mudanças climáticas ocorram de forma distinta entre os ecossistemas.

Em Laurance et al. (1999), os autores concluíram que a biomassa acima do solo na Amazônia central estava correlacionada positivamente com nitrogênio total, bases trocáveis (K,

Mg) e teor de argila, enquanto foi negativamente correlacionada com Zinco (Zn), Alumínio (Al), e teor de areia. Enquanto outros estudos sugerem o fosforo como o principal fator que restringe o crescimento da floresta ou biomassa (Vitousek & Sanford, 1986). Experimentos realizados em áreas de florestas montanhosas também relacionaram esses nutrientes como os preditores da produção florestal (Herbert & Fownes, 1995; Raich et al., 1996; Vitousek & Farington, 1997; Vitousek, 2004).

Durante décadas as interações planta e solo tem sido estudada por ecologistas e naturalistas na Amazônia (Sombroek, 1966; Stark & Jordan, 1978; Jordan & Herrera, 1981). Em 1966 o pesquisador Sombroek, concluiu que a exuberância da vegetação não era devido a solos ricos em nutrientes, mas sim a própria ciclagem interna da floresta. Sombroek também sugeriu um padrão leste, oeste de disponibilidade de cátions que anos depois foi confirmado. Jordan e Herrera em 1981 concluiu que a disponibilidade de nutrientes na Amazônia central e oriental era inferior a parte oeste e completou que isso seria devido a falta de eventos geológicos, sendo a direita da bacia Amazônica, região dos escudos das Guianas – Pré-cambriano (Irion, 1978), diferentemente da parte esquerda com a cordilheira dos Andes – Terciário. Os autores Jordan e Herrera também associaram o desenvolvimento da floresta com características edáficas. Outros estudos identificaram que esse gradiente de nutrientes no solo influencia a estrutura da vegetação e diferencia florestas de crescimento rápido próximo aos Andes e de crescimento lento próximo a Amazônia Central e Guianas (Fittkau, 1941, Quesada et al. 2010, Quesada et al. 2011, Quesada et al. 2012).

O estudo mais recente realizado em 71 diferentes locais de florestas Amazônicas (Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, Guianas, Suriname e Brasil) entre os anos de 2004 e 2009, pela rede de monitoramento de parcelas, RAINFOR, avaliou a composição química: total de cátion trocáveis (Cálcio, Alumino, Potássio, Magnésio e Sódio), carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e pH7, e física: argila, areia e silte, os quais foram utilizados para determinar a composição dos solos, e relacionar suas características com a vegetação, cujo encontrou uma grande variabilidade entre as diferentes regiões Amazônicas (Quesada et al. 2010).

No passado durante o período de 1973 a 1986 os solos Amazônicos em território brasileiro foram investigados com o projeto RADAM BRASIL (RADAM, 1978) que teve como intenção conhecer os recursos naturais brasileiros. O esforço amostral nunca visto antes no país, coletou mais de duas mil amostras de solos, com uma metodologia de amostragem de horizontes. Um período depois durante a década de 90 ocorreu o projeto World Inventory of Soil Emission Potentials (WISE) (Batjes, 2009), cujo objetivo era colher informações sobre nutrientes nos solos do mundo, atualizar as informações de classificações de solos mundiais e também compreender

os processos de carbono no solo. Embora existam estas três iniciativas, não é possível a comparação e integração destas bases informações posto que foram utilizadas diferentes metodologias para a coleta dos dados.

Neste contexto, de forma a avançar com o conhecimento da variabilidade espacial dos nutrientes do solo e sua pedogênese, é necessário realizar a compilação destas informações disponíveis e padronizar os dados para possibilitar uma caracterização dos solos Amazônicos de forma comparativa entre regiões (Bishop 1999; McBratney 2010; Nachtergaele 2012; Hengl 2014). Este melhor entendimento das características dos solos desta importante região nos permitirá identificar áreas de florestas mais susceptíveis a eventos de secas devido as condições edáficas, assim como identificar as regiões de florestas mais resilientes, que poderão responder de forma positiva ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera.

2 OBJETIVO GERAL

Integrar dados de solos disponíveis na Bacia Amazônica e investigar a relação entre a variabilidade espacial dos nutrientes nos diferentes tipos de solo, material de origem e período geológico.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (1) Harmonização de dados de solo da Bacia Amazônica.
- (2) Avaliar a relação entre disponibilidade de nutrientes e tipos de solos.
- (3) Avaliar a relação entre disponibilidade de nutrientes e material de origem da rocha.
- (4) Avaliar a relação entre disponibilidade de nutrientes e idade geológica.

Título do Artigo: Avaliação dos solos Amazônicos: integração de dados multifontes para caracterização das condições edáficas .

Journal: Acta Amazônica

Autores: Monique Rodrigues da Silva Andrade Maia^{1*}, Liana Oighenstein Anderson^b, Carlos Alberto Quesada^c e colaboradores.

^aPrograma de Pós-Graduação em Ecologia. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Av. André Araújo, 2936, Manaus, Brazil. PO box 478, 69011-970, lmoniquerds@gmail.com, Phone: +55 (92) 3643 1818

^bCentro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden. Parque Tecnológico de São José dos Campos CEP 12247-016. Telefone: (12) 3208 0154

^cCoordenação de Pesquisa em Dinâmica Ambiental. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Av. André Araújo, 2936, Manaus, Brazil. PO box 478, 69011-970, 14quesada.beto@gmail.com, Phone: +55 (92) 3643-1818, Fax: +55 (92) 3643-3148

* Corresponding Author (moniquerds@gmail.com)

3 INTRODUÇÃO

A floresta Amazônica constitui um dos ecossistemas mais importantes do planeta, se distingue de muitas outras regiões com alta biodiversidade devido a grande extensão de floresta intocada (Fearnside 2013). Estima-se que o carbono estocado nas florestas Amazônicas equivalem a cerca de 10 anos de emissões de gases de efeito estufa antrópicas (Saatchi et al. 2011). A região apresenta uma diversidade de solos (Jenny, 1940, Sombroek, 1966, Higgins, 2011), e vegetação (Phillips et al. 2003; Tuomisto et al 2002, 2003a, ter Steege et al. 2006, de Higgins et al. 2011, Steege et al 2013) e espera-se que a resposta de adaptação da vegetação as mudanças climáticas ocorra de forma distinta entre os ecossistemas. Para compreender o papel da vegetação nas mudanças climáticas (Prentice et al 2001) é necessário ter exaurido as informações e descrições das características dos solos Amazônicos.

Há décadas as interações entre plantas e solos são estudadas por ecologistas e naturalistas na Amazônia (Sombroek, 1966; Stark & Jordan, 1978; Jordan & Herrera, 1981). No passado Sombroek (1966), concluiu que a exuberância da vegetação não era devido a solos ricos em nutrientes, mas sim a própria ciclagem interna da floresta. A Bacia Amazônica é considerada pobre em nutrientes no solo e limitada na disponibilidade de fósforo (Justus Liebig, 1840, apud Fearnside, 1997) sendo os cátions (Al;Mg;Ca;K;Na) retornáveis e ciclados dentro da própria floresta (Luizão, 2007) com o auxílio da decomposição de liteiras, necromassa (Lugli et al, 2013) e a própria movimentação de aerossóis (Artaxo, 2006; Pauliquevis, 2007) e dinâmica das águas (períodos de cheias e vazantes dos rios) (Haugaasen, 2006). Em 1981 os autores Jordan e Herrera concluíram que a disponibilidade de nutrientes na região central e oriental (leste) da Amazônia era inferior a parte oeste e completou que isso seria devido a falta de eventos geológicos. Essa relação associava a disponibilidade de nutrientes com idade geológica, relevo e material de origem da rocha. Enquanto a região leste da floresta, é formada pelo escudo das Guianas – Pré-cambriano (Irion, 1978), a parte oeste (esquerda) é formada pela cordilheira dos Andes – Terciário com um relevo de solos rasos em encostas (Irion, 1978). Recentemente outros estudos identificaram esse gradiente de nutrientes no solo e associaram sua distribuição com a estrutura da vegetação. Diferenciando assim florestas de crescimento rápido, próximo aos Andes e de crescimento lento, próximo a Amazônia Central e Guianas (Fittkau, 1941, Quesada et al. 2010, Quesada et al. 2011, Quesada et al. 2012).

Em geral os solos da Amazônia são considerados pobres em nutrientes (Sanchez 1976; Vitousek 2010) devido pouca ocorrência de eventos de renovação (Jordan 1981, Swaps 2002),

mas algumas regiões apresentam estrutura física adequada por terem sofrido longos períodos de intemperismo (Sombroek, 1966; Irion 1978). Para um solo ser considerado fértil ambas características precisam ser minimamente atingidas como ideal e são elas: porcentagem de Argila, Silte e Areia (Quesada, 2010) e concentração de Potássio, Fósforo, Nitrogênio e Cátions Trocáveis (Paoli and Curran 2007; Kaspari et al, 2008; Yavitt et al. 2011). Alguns estudos comparam os solos da Amazônia com solos de regiões de desertos e savanas prevendo que caso ocorra a conversão da floresta em áreas de pastagem ou agricultura um desastre ambiental por deficiência do solo em sustentar tais estruturas (Anadon, 2014; Broadbent, 2008).

Atualmente informações básicas sobre os atributos de solos na Bacia Amazônica estão despadronizados o que dificulta a compreensão e comparação de informações por regiões (Quesada 2010). E essas informações estão concentradas em três grandes projetos: RADAMBRASIL; WISE e RAINFOR. No passado durante o período de 1973 a 1986 os solos Amazônicos em território brasileiro foram investigados pelo projeto RADAM BRASIL (RADAM, 1978), que teve como intenção conhecer os recursos naturais brasileiros, com um esforço amostral de mais de duas mil amostras, e uma metodologia de amostragem de horizontes, voltada para identificação de grupos de solos. Um período depois durante a década de 90 ocorreu o projeto World Inventory of Soil Emission Potentials (WISE) (Batjes, 2009), cujo objetivo era colher informações sobre nutrientes nos solos do mundo, atualizar as informações de classificações de solos mundiais e compreender os processos de carbono no solo. E finalmente o estudo mais recente realizado em 71 diferentes locais de florestas Amazônicas (Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, Guianas, Suriname e Brasil) entre os anos de 2004 e 2009, pela rede de monitoramento de parcelas, RAINFOR, avaliou a composição química: total de cátion trocáveis (Cálcio, Alumínio, Potássio, Magnésio e Sódio), carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e pH7, e física: argila, areia e silte, os quais foram utilizados para determinar a composição dos solos, e relacionar suas características com a vegetação, cujo encontrou uma grande variabilidade entre as diferentes regiões Amazônicas (Quesada et al. 2010).

Embora existam estas três iniciativas, não é possível a comparação e integração destas bases informações posto que foram utilizadas diferentes metodologias para a coleta dos dados. Para o desenvolvimento de funções de previsões de fertilidade do solo, conservação e sugestão de áreas suscetíveis a infertilidade (Batjes 2012; McBratney 2002; Walker, 1976) é necessário uma compreensão da forma de amostragem e o auxílio de uma estatística robusta que permita a suavização dos dados (Odgers 2012). As propriedades do solo variam continuamente com a profundidade, assim como em toda a paisagem (Bishop, 1999). Neste contexto, de forma a avançar com o conhecimento da variabilidade espacial dos nutrientes do solo e sua pedogênese, é

necessário realizar a compilação destas informações disponíveis e padronizar os dados para possibilitar uma caracterização dos solos Amazônicos de forma comparativa entre regiões (Bishop 1999; McBratney 2010; Nachtergaele 2012; Hengl 2014). Este melhor entendimento das características dos solos nos permitirá identificar áreas de florestas mais susceptíveis a eventos de secas devido as condições edáficas, assim como identificar as regiões de florestas mais resilientes, que poderão responder de forma positiva ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. Isso significa uma recuperação de dados disponíveis, esforços em aquisição de novos dados, criação de equações de pedotransferência para estimar dados de alto custo não quantificado (Batjes, 2011; Yang, 2013).

Com isso tem se que o objetivo central desse trabalho a criação da base de dados harmonizada para a Bacia Amazônica com o intuito de avaliar esses nutrientes nas primeiras camadas de solo, região chamada de rizosfera (Coleman, 2004) e associar esses nutrientes a origem da rocha, tempo geológico e tipos de solos, com intuito de descobrir quais os nutrientes que podem estar disponíveis por processos de pedogêneses, contribuindo assim para estudos e pesquisas de dinâmicas florestais e processos de formações das florestas.

4 MATERIAIS

4.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a floresta tropical da Bacia Amazônica, com uma extensão de cerca de 6.10.000 km² (ANA 2013) distribuída ao longo de 9 países, sendo sua maior extensão localizada no Brasil, apresenta uma estrutura vegetal variada composta por terra firme, vegetação secundária, vegetação alagada e savana (Saatchi 2007; Malhi et al. 2002; Eva, Huber, 2005). Apresentando três grandes regiões geológicas: bacia pré-cambriana, parte central (região das Guianas na porção norte e Brasileira na porção sul), e região dos Andes - parte oeste (Fitikau, 1971; Fitikau, 1975; Irion, 1978 ; Jordan & Herrera, 1981). Devido as variações de relevo, idades geológicas divergentes e intemperismo intenso possui uma diversidade de solos que seguem um padrão oeste-leste de fertilidade (Quesada, 2010). Os valores de precipitação anual media variam entre 2000 e 2200 milímetros (CPTEC, 2010), sendo a região dos Andes com precipitação media anual de 4.000 a 6.400mm, enquanto a região extremo leste volume abaixo de 1.200mm. A região norte próxima as Guianas até a região de Santarém-PA/Brasil observa-se a presença de um corredor seco (Sombroek, 2001). O limite espacial (localizada entre as latitudes 8,647116 N e 18,350914 S e longitude: 78,978653 O e 44,357777 L (Figura 1).) utilizado nesse estudo foi publicado num acordo entre países disponível na publicação de Eva, Huber (2005).

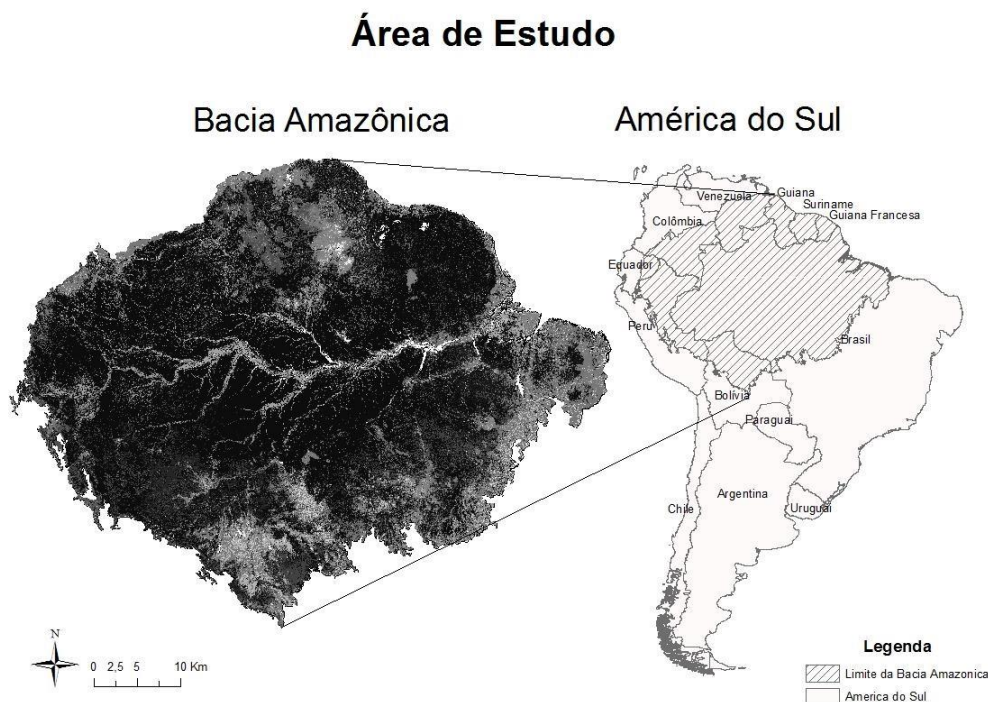


Figura 1: Área de estudo.

4.2 Dados

Neste estudo foram compiladas informações de campo sobre estrutura química e física do solo de três projetos distintos: RADAM (Projeto Radar na Amazônia, 1973–1986, Cooper 2005), WISE (*World Inventory of Soil Emission Potentials*) (Batjes 2008) e Projeto RAINFOR (Rede Amazônica de Inventários Florestais) (Quesada et al. 2010). Na Figura 2, apresenta-se a distribuição total dos pontos amostrados sendo 245 amostras do projeto WISE, 2241 amostras do projeto RADAM e 156 amostras da rede de colaboração RAINFOR. Para as informações de classificação do solo, idade geológica, material de origem da rocha foram usadas as bases de dados SOTERLAC (*The Digital Land Systems Survey of The Amazon*) (Cochrane et al. 2001) e HWSD (*Harmonized World Soil Database*) (Fischer 2008, Batjes 2012). Todas essas informações estão disponíveis em sites e apresentam documentação histórica de como foi realizado o estudo com informações das localizações em latitude e longitude e projeção geográfica.

Esforço Amostral

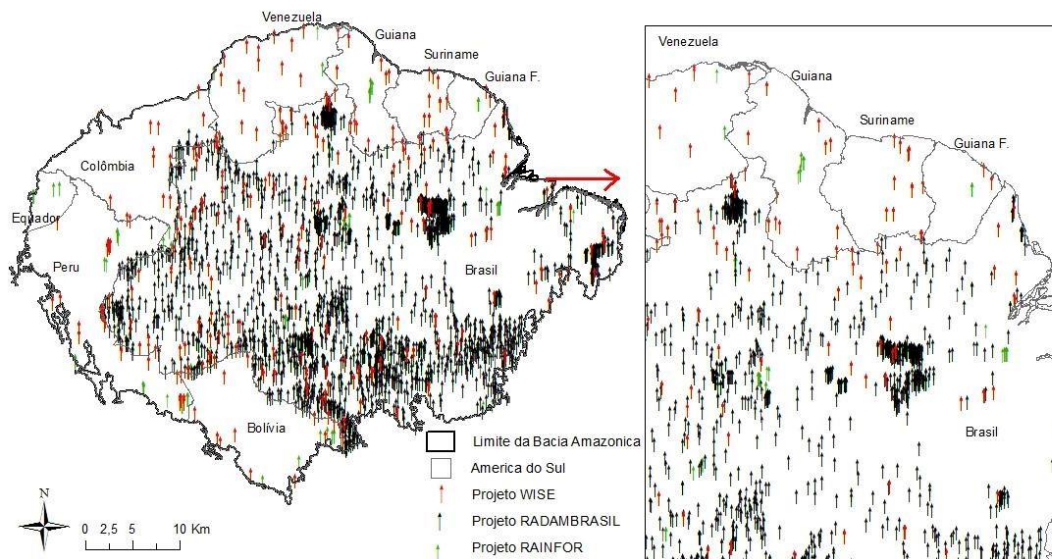


Figura 2: Localização das amostras de solo disponíveis pelas três iniciativas compiladas por este estudo.

4.2.1 Base de dados RADAM

O projeto RADAM (1970–1986) teve como objetivo a incorporação da região Amazônica no cenário da economia nacional. Com o investimento do governo brasileiro (Ministério de Minas e Energia; Departamento Nacional de Produção Mineral; Plano Integração Nacional) em pesquisar os recursos naturais foi realizado um inventário florestal com cerca de 1 500 000 km² (Cooper 2005) ao longo da floresta, cuja as informações de geologia, geomorfologia, uso e cobertura, relevo e cartografia foram adquiridas e catalogadas em cerca de 18 volumes contendo mapas, descrições dos dados e análises (IBGE 2015) A escala dos dados utilizados nessa pesquisa foi de 1: 250.000.

4.2.2 Base de dados WISE

O projeto WISE (1991-1996) inicialmente teve como objetivo estudar a relação entre a Poluição Atmosférica Global e Mudanças Climáticas (Batjes, 1992), e composição química e física de solos do mundo. Após essa investigação, o projeto seguiu com mapeamentos digitais mais refinados e com levantamento de dados que preenchiem lacunas dos dados do projeto SOTER (FAO, 1986) dando origem juntos ao Banco de Dados Mundial Harmonizado - HWSD em 2012.

4.2.3 Base de dados RAINFOR

O projeto RAINFOR (Rede Amazônica de Inventários Florestais) foi criado com o objetivo de compreender os ecossistemas Amazônicos, monitorando a floresta ao longo de gradientes de solo e clima (Quesada 2010). Com parcelas permanentes que acompanham o desenvolvimento da vegetação e tentam compreender os processos ecológicos no contexto de solo e clima (Phillips et al. 2009, Lewis et al. 2012, Gloor et al. 2012) .

4.2.4 Base de dados SOTERLAC

O projeto *Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean* (SOTERLAC) é uma atividade colaborativa entre ISRIC (*World Soil Information*), FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), UNEP (*United Nations Environment Programme*) e, coordenada pela IUSS (*International Union of Soil Sciences*) (Oldeman e van Engelen 1993; van Engelen e Wen 1995) cujo objetivo é monitorar e gerar informações sobre as mudanças nos terrenos e solos do mundo, com auxílio de tecnologias de mapas digitais (Batjes 2005). No projeto SOTER pioneiro ao SOTERLAC, foi criada uma metodologia que combinasse atributos do solo, características do terreno e topologia para determinação dos limites do polígonos e categorias espaciais (Dijkshoorn 2005).

5 MÉTODOS

5.1 Pré-processamento da base de dados

Após estabelecido o limite da área de estudo da Bacia Amazônica (Eva; Huber 2005), os dados de solos disponíveis foram convertidos em dados espacializados com o auxílio do programa ArcGIS (ESRI 2011). Para cada perfil de solo havia uma localização geográfica e número do perfil identificados nas documentações dos projetos. As coordenadas dos dados foram formatadas no sistema de projeção *Universal Transverse Mercator - UTM*, datum WGS 84 como sugerido por Batjes (2008).

5.1.1 Seleção das amostras com base na literatura do RADAM

Os dados do projeto RADAM foram investigados segundo o uso e ocupação do local durante o período da amostragem. As publicações do projeto conta com uma sessão (“CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E ANALÍTICA DA UNIDADE”) (IBGE 2015) que identifica o ponto de amostragem e em alguns casos caracteriza o uso do local. As amostras localizadas em áreas de pastagem, agricultura e desmatamento foram excluídas desse estudo. O objetivo dessa limpeza dos dados é a tentativa de representar da melhor forma a variabilidade de nutrientes ao longo da Bacia Amazônica, sem interferência humana direta, adição de fertilizantes ou exposição a lixiviação intensa.

5.1.2 Seleção das amostras sem informações por imagem

Em alguns casos os dados do RADAM não obtiveram informações sobre o uso e ocupação do local no período da amostragem, nesses casos foi necessária uma limpeza desses dados com auxílio de imagem de satélite (LANDSAT 3 e 4) da cobertura vegetal das décadas de 70 e 80 ou Google Earth (Fig. 3) para a verificação da cobertura. Locais em que geraram dúvidas entre áreas desmatadas e floresta, foram excluídos.

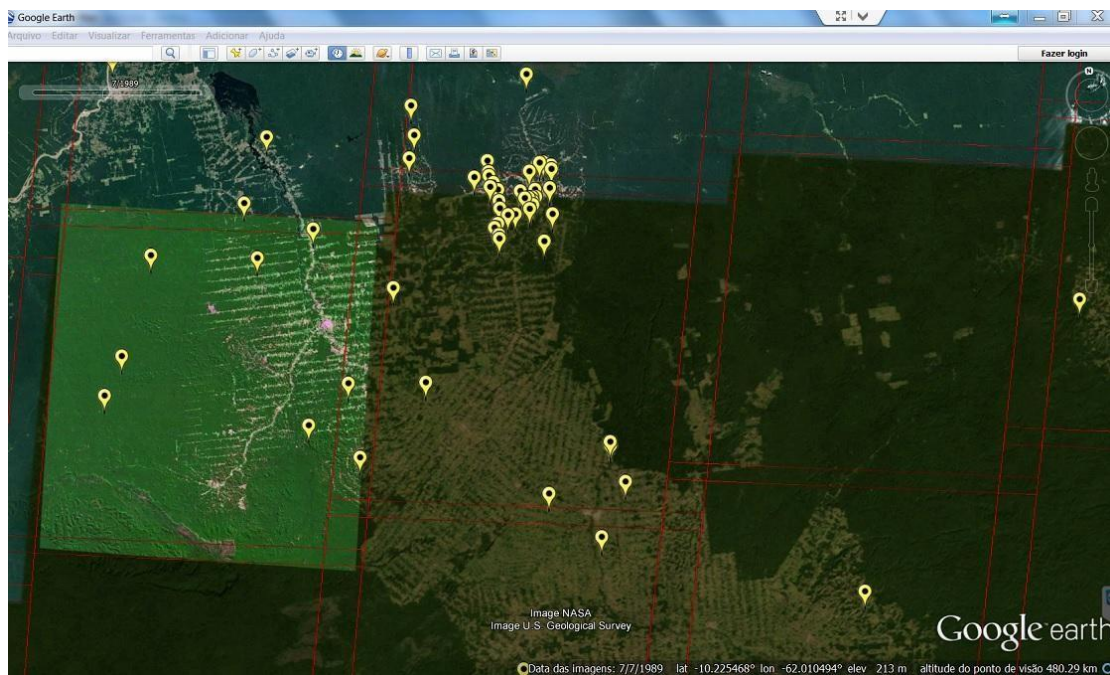


Figura 3: Exemplo da localização de amostras sem identificação de uso e cobertura do local de coleta. Ao fundo observa-se a imagem do Google Earth, acoplada a outras bases de sensoriamento remoto compiladas neste estudo para identificação do uso e cobertura nos anos de aquisição das amostras.

Do total de 2241 amostras originais do projeto RADAM, permaneceram-se após a filtragem 1657 amostras. Para o projeto WISE, a limpeza dos dados por interpretação de imagem finalizou com 187 amostras.

5.1.3 Conversões das unidades

Para a conversão das unidades foi feita uma divisão (\div) por 10 para os dados do WISE nas amostras de Carbono e Nitrogênio que estavam em g/kg^{-1} , ficando assim similar as informações do RADAM que se encontram em porcentagem. Para os demais nutrientes

foi feita uma conversão multiplicando (x) por 10 para cmol/kg ou meq/100g passar para a grandeza mmol. Essa conversão foi adotada para facilitar a padronização dos dados no formato de pesquisa do grupo RAINFOR e para a elaboração de funções de pedotranferência desenvolvidas pelo grupo (Tabela 1).

Tabela 1 Base de dados e unidades de conversão.

Legenda: C*: carbono (%); N*: nitrogênio (%);

Ex: trocáveis; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Na: sódio; K: potássio; Al: alumínio;

	C*	N*	ExCa	ExMg	ExNa	ExK	ExAl
WISE	÷ 10	÷ 10	cmol/kg	cmol/ kg	cmol/ kg	cmol/ kg	cmol/ kg
RADAM	%	%	meq/100g solo	meq/ 100g solo	meq/ 100g solo	meq/ 100g solo	meq/ 100g solo
RAINFOR	%	%	mmol	mmol	mmol	mmol	mmol

5.2 Integração da base de dados

Para a padronização dos dados, foi utilizado o programa R statistical (R Development Core Team 2008) e a ferramenta Spline Function (Figura 4) (Bishop 1999; Hengl 2014). Essa metodologia tem sido utilizada atualmente nos estudos dos solos, com intuito de agrupar e disponibilizar dados regionais de solos para uma abordagem simplificada e global (McBratney 2010; Nachtergaele 2012). As profundidades utilizadas nessa pesquisa foram: 0-5; 5-10; 10-20; 20-30, de acordo com a metodologia proposta por Quesada et al 2010.

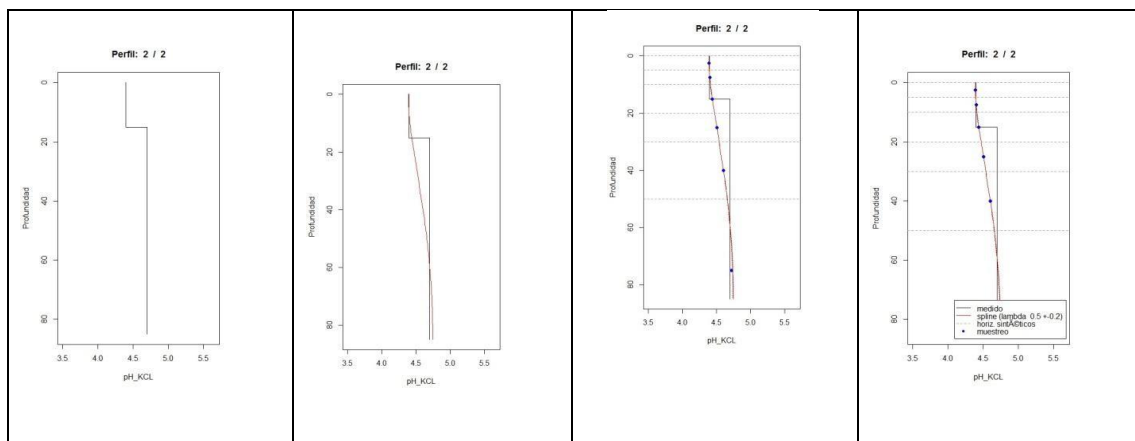


Figura 4: Exemplo da função *Spline* aplicado aos dados de solo. Da esquerda pra direita apresentam se os passos executados da função. O primeiro quadro mostra a identificação das profundidades do dado original. Segundo quadro a linha de tendência suavizada, em vermelho. O passo seguinte (quadro 3) são identificadas as concentrações do nutriente por profundidade. O ultimo quadro (direita) apresenta o resultado final da função com o melhor ajuste da curva.

5.3 Análise dos dados

5.3.1 Variabilidade dos nutrientes

Para análise dos dados a ferramenta ArcGIS foi utilizada na espacialização das informações nas seguintes profundidades 0-5; 5-10; 10-20; 20-30 cm. Uma comparação entre os gradientes, e os valores máximos e mínimos por profundidade foi realizada para a melhor compreensão da dinâmica de cada um dos nutrientes.

5.3.2 Variabilidade dos nutrientes por tipo de solo

Para as análises de variabilidade dos nutrientes por tipo de solo foi realizada análise estatística categórica e plotada no formato de gráfico boxplot.

Os nutrientes avaliados foram: Porcentagem de Carbono, Nitrogênio, Cátions trocáveis: Potássio, Alumínio, Magnésio, Cálcio e Sódio. Os tipos de solos analisados foram: Acrisol (AC), Cambisol (CA), Fluvisol (FL), Ferralsol (FE), Gleysol (GL), Leptosol (LE), Lixisol (LI), Nitisol (NI), Plinthosol (PL), Podzol (PO), Regosol (RE), Solonchak (SO).

5.3.3 Variabilidade dos nutrientes por idade geológica

Para as análises de variabilidade dos nutrientes por tempo geológico foram realizadas análise estatística categórica e plotada no formato de gráficos boxplot. As categorias de idade geológica foram divididas em duas partes, uma primeira representação com as informações disponíveis pelo SOTERLAC.

5.3.4 Variabilidade dos nutrientes por material de origem da rocha

Para as análises de variabilidade dos nutrientes por material de origem (tipo de substrato que formou o solo) foram realizadas análise estatística categórica e plotada no formato de gráficos boxplot. As categorias de idade geológica foram divididas em duas partes, num primeiro momento as categorias analisadas foram: Andesito (III1), Basalto (IB2), sedimentos de origem Clástica (SC), Rocha coluvial inconsolidada (UC), Conglomerados (SC1), Fluvial (UF), Gabbro (IB1), Gneisse (MA2), Gneisse rico em minerais ferrico-magnésicos (MB3), Granito (IA1), Grano-diorito (IA2), Quartzito (MA1), Rocha ácida metamórfica (MA), Rocha básica metamórfica (MB), Rocha ígnea ácida (IA), Rocha ígnea básica (IB), Rocha ígnea intermediária (II), Rocha marinha não consolidada (UM), Rocha orgânica não consolidada (UO), Arenito (SC2), Xisto (MB2), Shale (SC4), Siltitos (SC3), Slate ácido (MA3), Slate básico (MB1), WR ou águas internas (WR). Num segundo momento as categorias foram simplificadas e reclassificadas em: Ignea (III1; IB2; IB1; IA1; IA2; IA; IB; II;), metamórfica (MA2; MB3; MA1; MA; MB; MB2; MA3; MB1) sedimentar (SC; SC1; SC2; SC4; SC3) e sedimentar inconsolidado (UC; UF; UM; UO);

5.3.5 Análises estatísticas

Para a melhor compreensão dos resultados do boxplot os dados foram analisados por meio do método de ordenação, (NMDS - *Nonmetric Multidimensional Scaling*) proposto por Kruskal (1964) e com o método estatístico Análise de Variância Multivariada (ANOVA Multivariada) (Borgen and Selig , 1978).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Base de dados homogeneizadas

O resultado da homogeneização das bases de dados obtiveram amostras de solos na Bacia Amazônica, que são passíveis de intercomparação metodológica e também por profundidade. A tabela abaixo (Tabela 2) apresenta um sumário de como esses dados estão organizados e no material suplementar a base de dados disponíveis.

Tabela 2: Exemplo da organização da tabela de dados após a harmonização.

IDnames	Long	Lat	0_5	5_10	10_20	20_30	30_50	50_100	100_150	150_200	Max Depth	Variável
1_0.2167_-65.8833	-65,88	-0,21	1,63	1,61	1,53	1,36	1,08	0,46	0,08	NA	120	C
1_-0.1_-69.9167	-69,91	-0,10	6,18	6,27	6,58	7,28	8,59	11,30	NA	NA	100	ExAl

6.2 Variabilidades espacial dos nutrientes do solo

6.2.1 Variabilidade Espacial media de 0 a 30 cm de profundidade

Conforme observado no item I do material suplementar, a inspeção visual com base nos valores dos gradientes das diferentes profundidades (0-5; 5-10; 10-20; 20-30 cm) não apresentam variação significativa, sendo assim para a análise espacial e comparação por regiões foram utilizados os valores médios de nutrientes de 0 a 30 cm de profundidade.

A partir da combinação das bases de dados do RADAM e o WISE, composta por 1844 amostras, foram feitas análises para investigar a variação de cada nutriente na Bacia Amazônica (Tabela 3). A Bacia Amazônica apresenta uma variação média de carbono no solo de aproximadamente 2,20% para a camada de 0-30 cm, sendo que os valores máximos e mínimos variam entre 28,90 e 0,02%, respectivamente.

O nitrogênio apresenta uma média de cerca de 0,18 % com porcentagens mínimas próximas de zero e máximas de 3,60%. Em relação aos cátions trocáveis (Ex), as análises mostram que os elementos com maior abundância são o cálcio, alumínio e magnésio, enquanto que os valores médios mais baixos são de sódio e potássio.

Tabela 3: Análise dos valores de máximo, mínimo, media e mediana, dos nutrientes com base em 1844 amostras de solo, compiladas pelas base do RADAM e WISE.

Dados	Maximo	Mínimo	Mediana	Media	Número de amostras	Amostras sem inf.
C*	28.83	0.02	1.71	2.19	1767	89
N*	3.65	0.00	0.14	0.18	1300	499

Cálcio	527.30	0.06	2.75	20.21	1504	337
Magnésio	176.90	0.00	2.13	7.53	1508	352
Sódio	64.30	0.00	0.30	0.64	1752	73
Potássio	17.16	0.00	1.04	1.43	1753	74
Alumínio	215.30	0.00	11.47	18.09	1737	73
Areia %	99.00	0.00	52.03	48.82	1789	27
Silte %	99.00	0.00	16.88	22.41	1789	27
Argila %	88.98	0.00	18.25	22.42	1786	30

*Nutrientes quantificados em porcentagem.

A distribuição espacial das concentrações médias de 0 a 30 cm para cada um dos elementos se encontra na Figura. 5. As concentrações de carbono nos solos Amazônicos seguem fortemente a distribuição da concentração de argila (Material Suplementar II) nos solos (Telles et al. 2002; Dick et al. 2005) (Figura 5a). Além da relação com a quantidade de argila, observa-se uma correlação espacial do carbono do solo nas regiões onde não há estação seca na Bacia (chuvas mensais inferiores a 100mm). Estas áreas apresentam porcentagens maiores de carbono no solo, o que pode estar também associado a uma ciclagem mais rápida dos componentes da floresta (serapilheira e necromassa) aumentando a concentração do carbono no solo. A porcentagem de nitrogênio total no solo é relativamente baixa não ultrapassando 4% nos solos Amazônicos. O nitrogênio apresenta-se correlacionado com a distribuição espacial da matéria orgânica, e é considerado um elemento limitante ao desenvolvimento da vegetação em florestas temperadas mas não nas florestas tropicais (Towsend et al, 1992) (Figura 5b). Para o nutriente de cálcio é possível observar um padrão espacial de valores mais altos na região oeste da Amazônia próximo aos Andes e também na região da formação “Pebas” (Figura 5c), conforme descrito por Quesada et al. (2010). O nutriente Potássio (Figura 5d) apresenta claramente uma distribuição que segue os padrões de idade geológica (Quesada et al. 2010) com menores concentrações na Amazônia Central quando comparado aos limites norte e sul da Amazônia, e maiores concentrações próximo a região Andina. Para magnésio observam-se as maiores concentrações no sudoeste da Amazônia, não ultrapassando 180 mmol/dm³ (Figura 5e) e na região costeira. Para as amostras de sódio, observa-se uma maior frequência de concentrações baixas do nutriente distribuída na Bacia (Figura 5f), sendo a região costeira com maiores concentrações. Para as amostras

de alumínio (Figura 5g) a região oeste da Bacia Amazônica possuem as mais altas concentrações, sendo considerado um elemento importante na nutrição da planta pois em solos ácidos pode tornar o substrato tóxico as raízes. Entretanto não existem observações de toxicidade por alumínio em florestas nativas da região, estando os altos níveis deste elemento associados aos minerais de argila 2:1 com altos teores de Al os quais não estariam “disponíveis” na solução do solo (Marques et al. 2002).

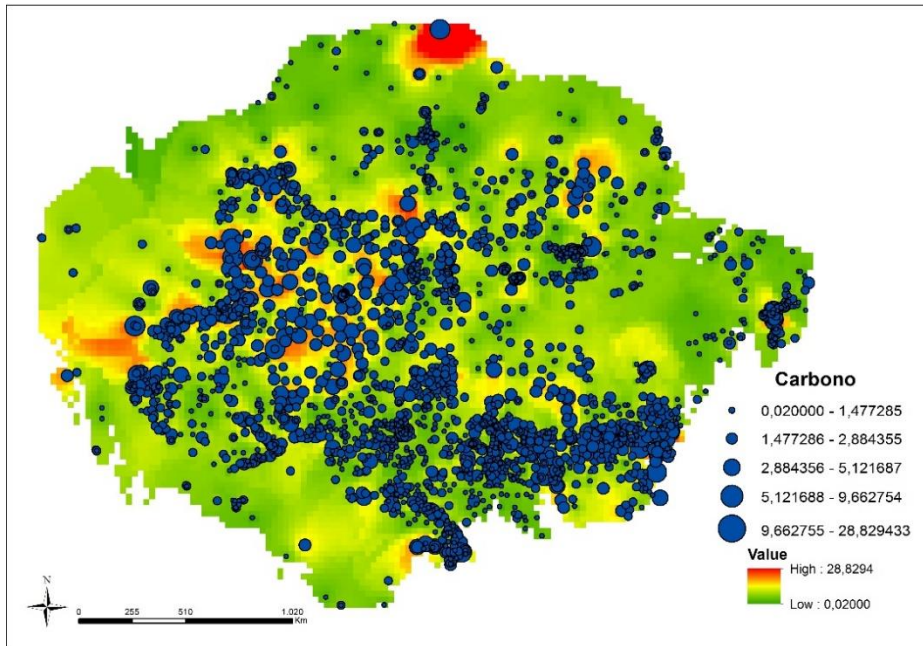


Figura 5 a: Gradiente de porcentagem de Carbono.

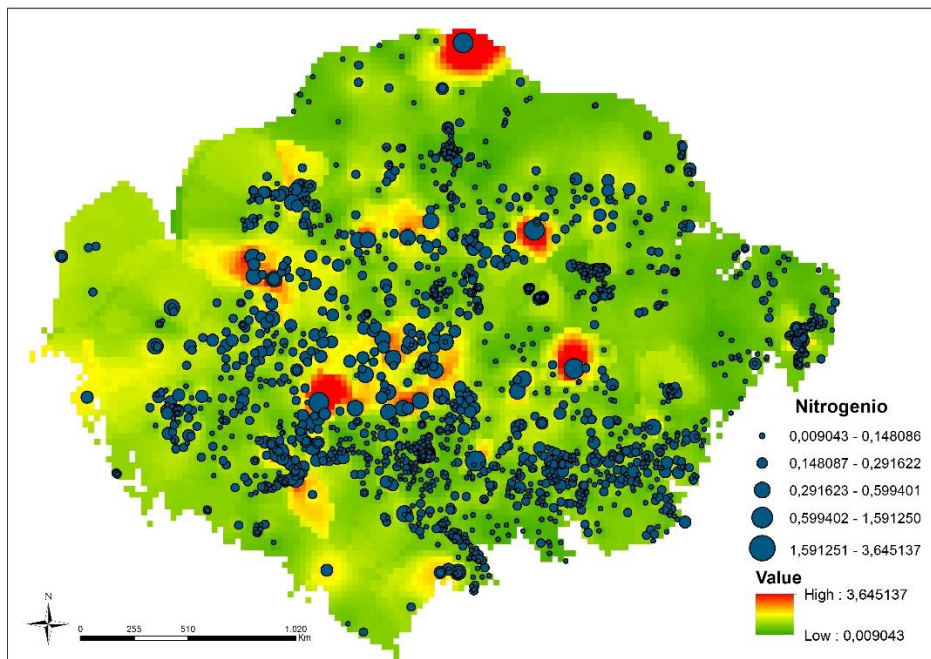


Figura 5 b: Gradiente de porcentagem de Nitrogênio.

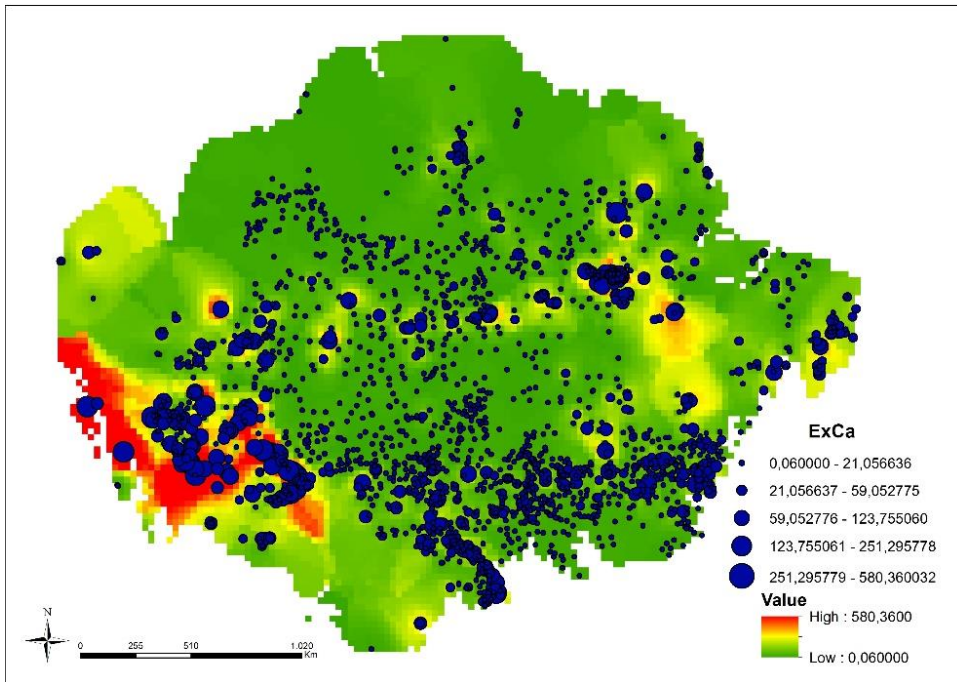


Figura 5 c: Gradiente de concentração de Cálcio.

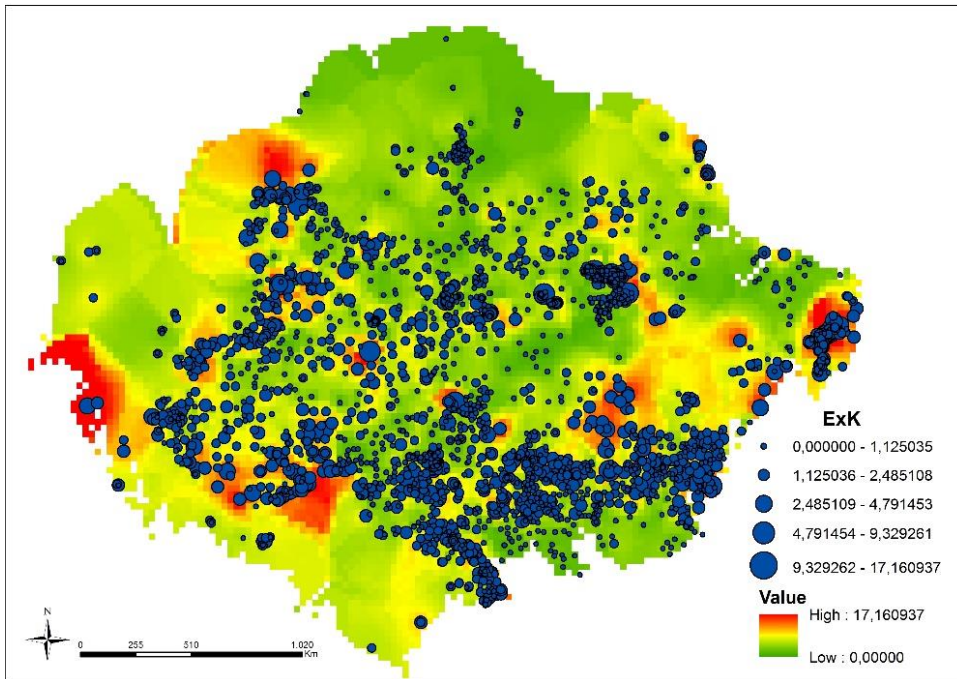


Figura 5 d: Gradiente de concentração de Potássio.

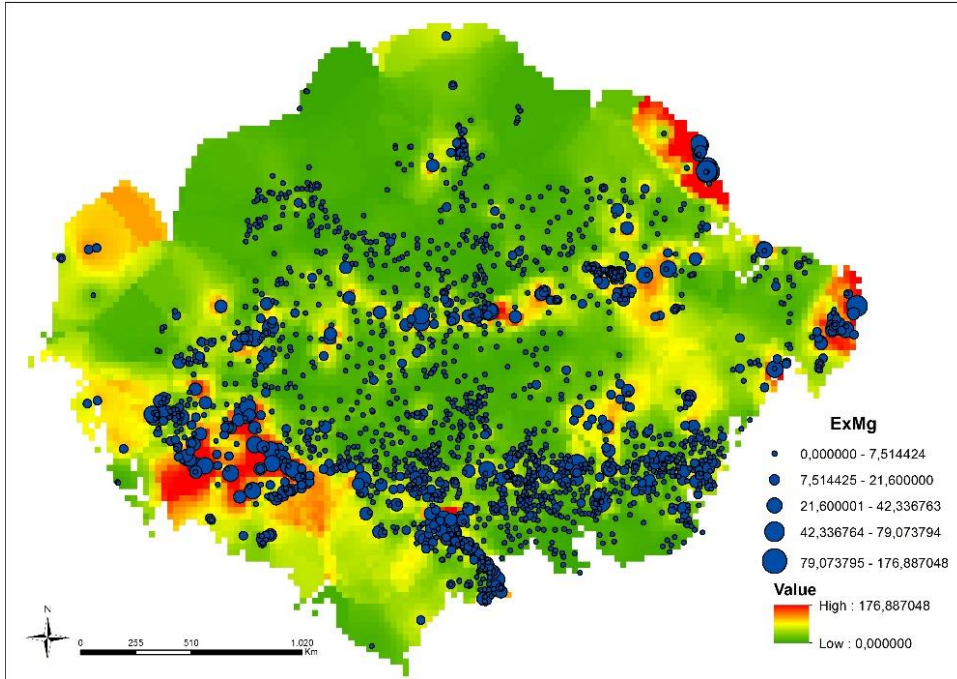


Figura 5 e: Gradiente de concentração de Magnésio.

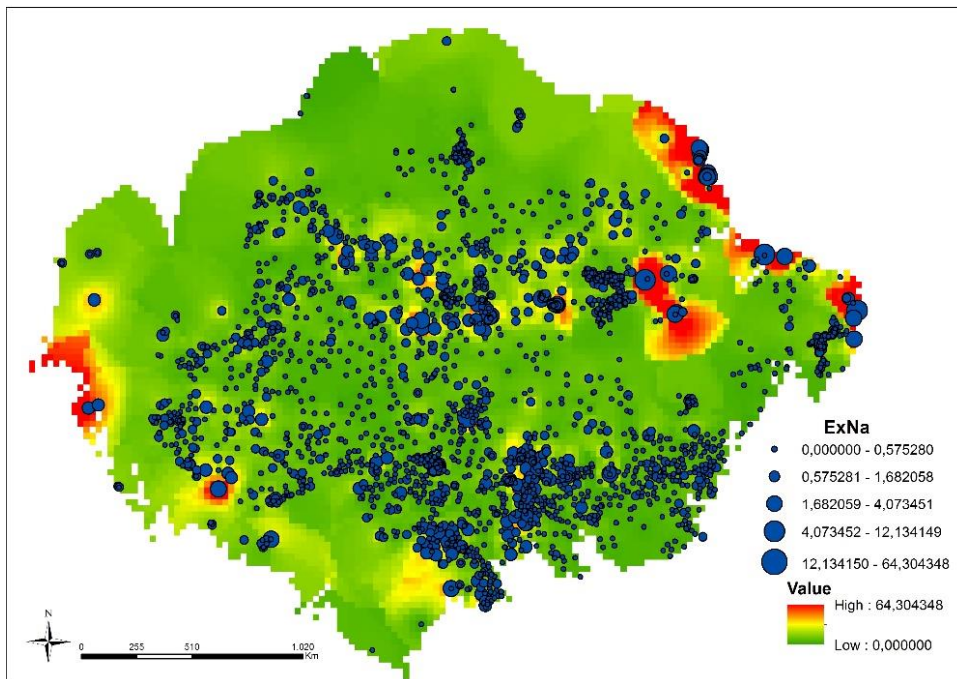


Figura 5 f: Gradiente de concentração de Sódio.

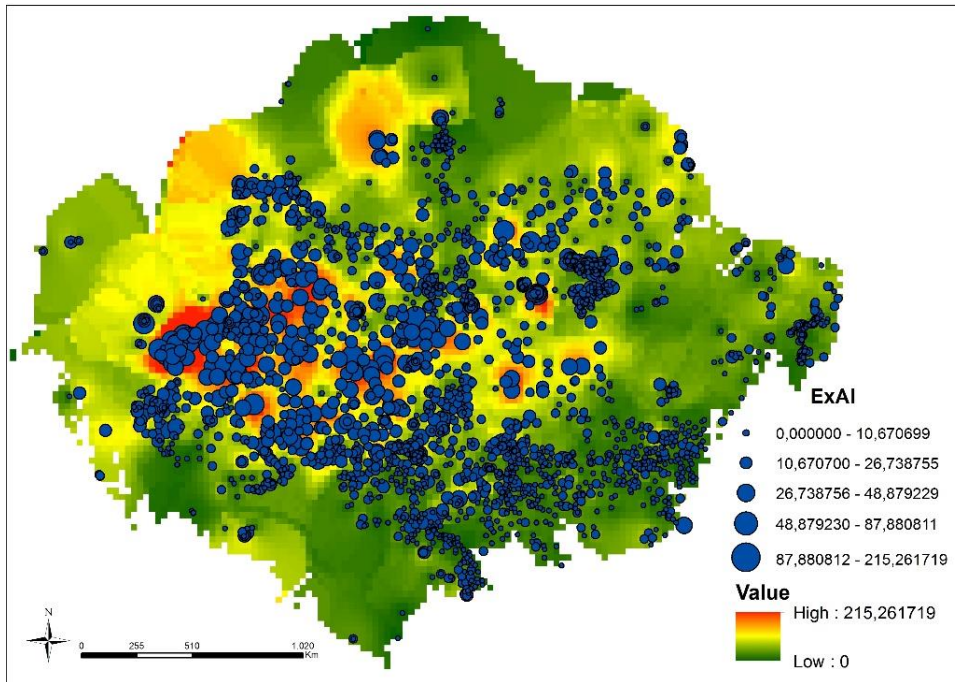


Figura 5 g: Gradiente de concentração de Alumínio

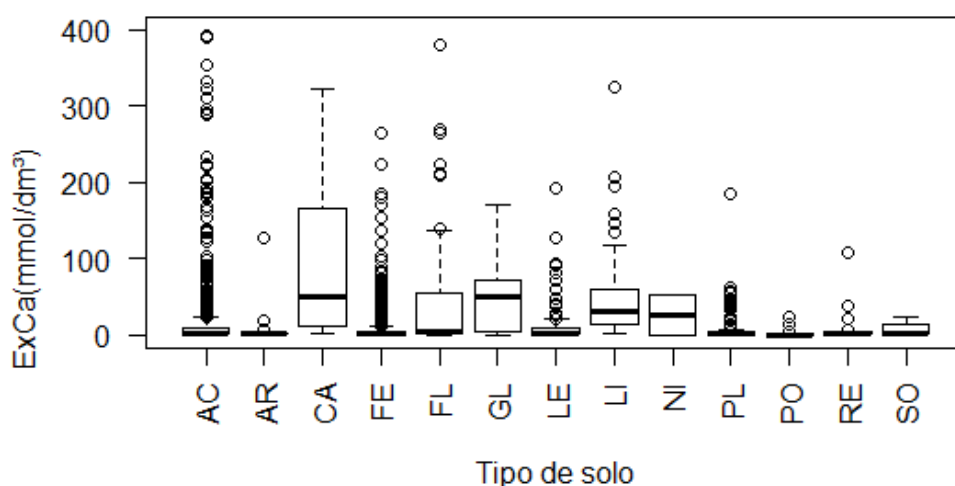
6.3 Variabilidades dos nutrientes por tipo de solo, período geológico e material de origem da rocha

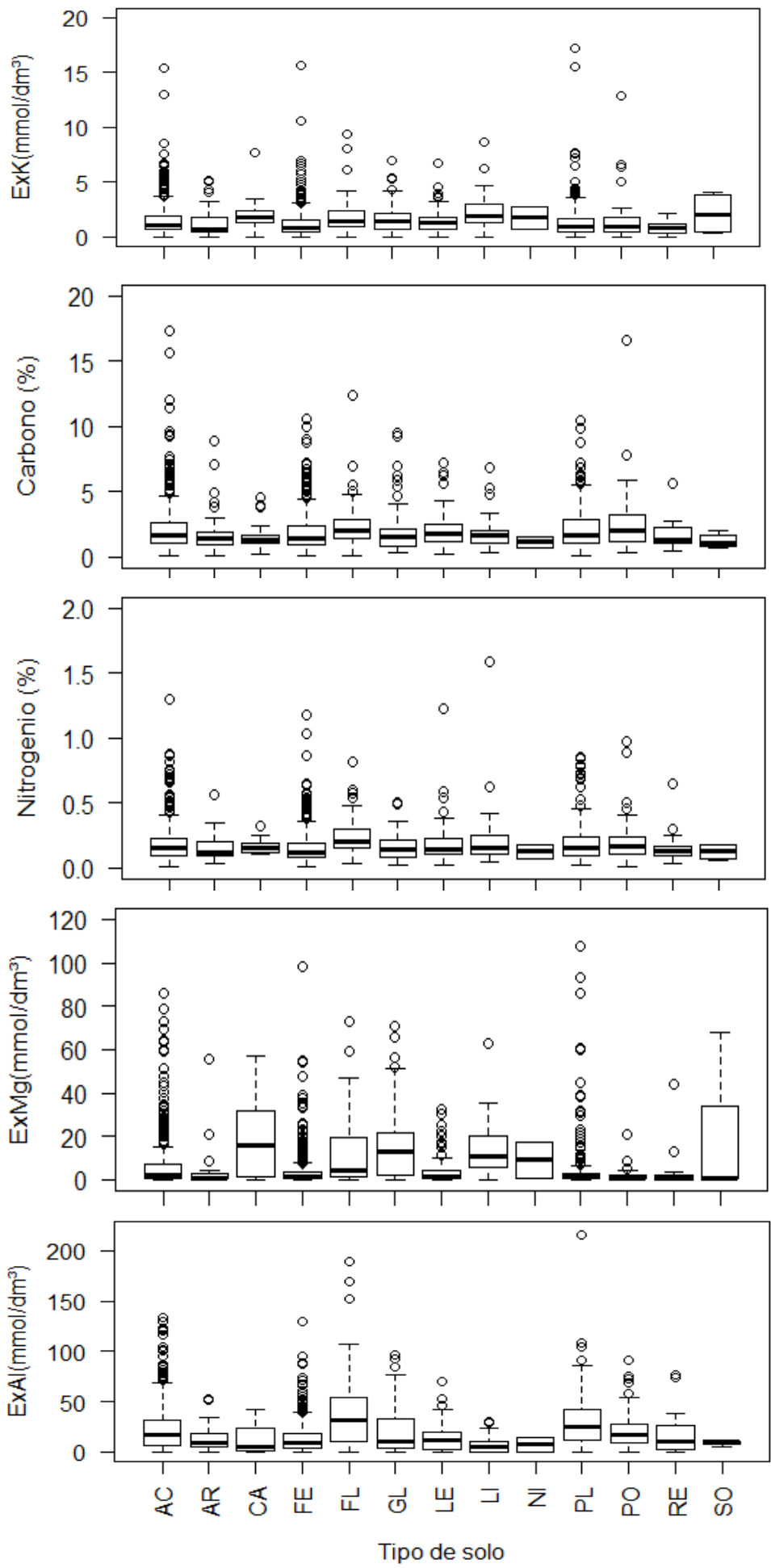
6.3.1 Tipos de solo

A variabilidade dos nutrientes por tipo de solo foi analisada e os dados de ExCa (Figura 6e), a maioria dos solos apresentam baixas concentrações desse cátion, possivelmente devido as altas taxas de intemperismo e lixiviação da Amazônia. Entretanto, as maiores concentrações ocorreram nos solos Cambisol (mediana de $50 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) seguido por Gleysol e Fluvisol. Os três tipos de solo representam solos de baixo desenvolvimento pedogenético o que explica suas maiores concentrações de Ca em um ambiente de alto intemperismo (Quesada et al., 2010, 2011). Outros solos mais desenvolvidos como Lixisols e Nitisols também possuem maiores concentrações médias, o que provavelmente está associado ao melhor material de origem destes solos (Quesada et al. 2011). O cátion trocável potássio (Figura 6f) apresenta uma baixa concentração em todos os tipos de solos. Este nutriente é comumente associado com limitações nutricionais da produtividade da floresta Amazônica e em outros sistemas tropicais (Quesada et al. 2012; Wright et al. 2011). Os mesmos solos que apresentaram maiores concentrações de Ca também possuem

maiores concentrações médias de K e Mg (Figura 6c). Enquanto o Solonchark (solo normalmente limitado por excesso de sais) apresenta grandes concentrações de potássio. Para o alumínio (Figura 6g), as concentrações já são um pouco mais elevadas em relação aos cátions anteriores, sendo que os solos que apresentam os maiores valores são os solos mais jovens como o Fluvisol, Gleysol e Plinthosol. Esta observação está relacionada com a predominância de minerais primários do solo ricos em alumínio que possuem camadas de Al nos minerais 2:1 (Marques et al. 2002). Isto evidencia que a percepção de que solos mais antigos como Ferralsols e Acrisols tem maiores níveis de Al é errônea, e que na verdade estes solos (Ferralsols e Acrisols) tem uma maior saturação de Al, mas na verdade suas concentrações totais são menores. Bem como o Ca, o magnésio (Figura 6c) apresenta concentrações mais altas nos Cambisols, Fluvisols, Gleysols e nos solos com material de origem especial como nos Nitisols e Lixisols. Entretanto concentrações muito altas também aparecem no Solonchak.

Na Figura 6d observa-se que o sódio apresenta baixas concentrações nos solos Amazônicos, com exceção nos solos Solonchaks. Isto explica-se pela grande mobilidade deste elemento nos solos (Thomas 1976). Para as porcentagens de nitrogênio (Figura 6b) e carbono (Figura 6a) observa-se uma correlação entre os, tendo os Fluvisols as porcentagens mais altas de nitrogênio e Plintosols as porcentagens mais altas de carbono. Na figura 6h uma soma de cátions foi realizada para a melhor compreensão da disponibilidade dos nutrientes. Em geral solos mais jovens e de origem inconsolidada são os que apresentam maior capacidade de cátions trocáveis efetiva.





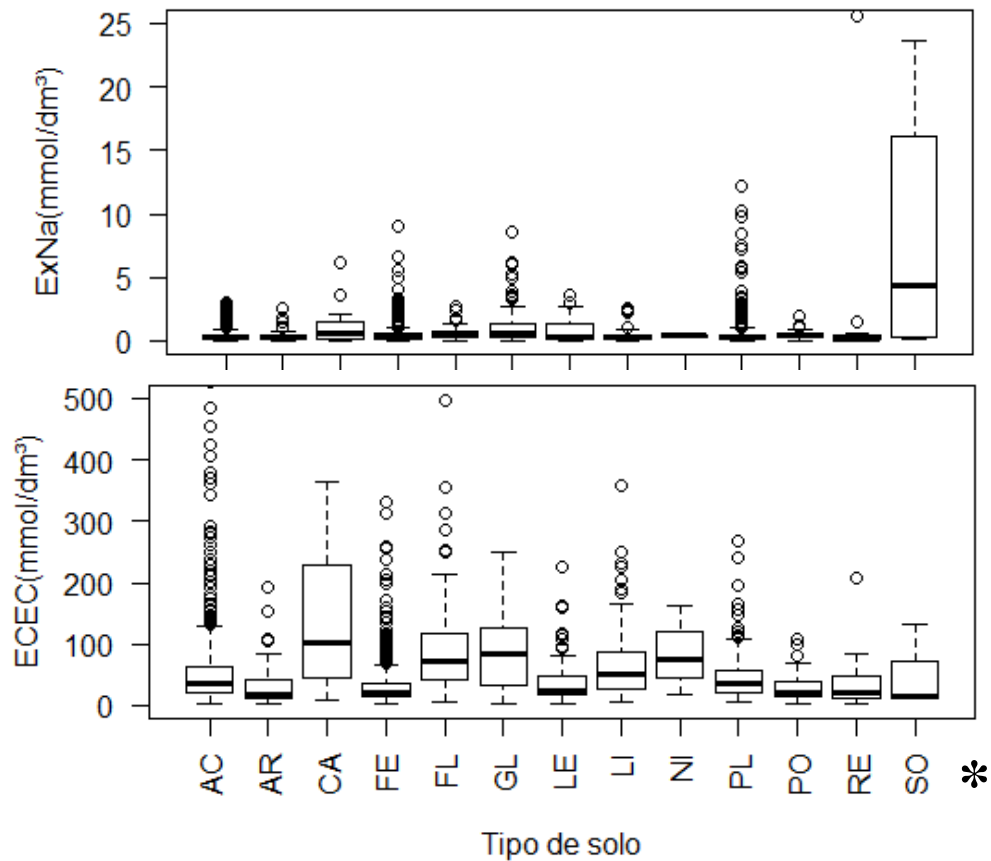


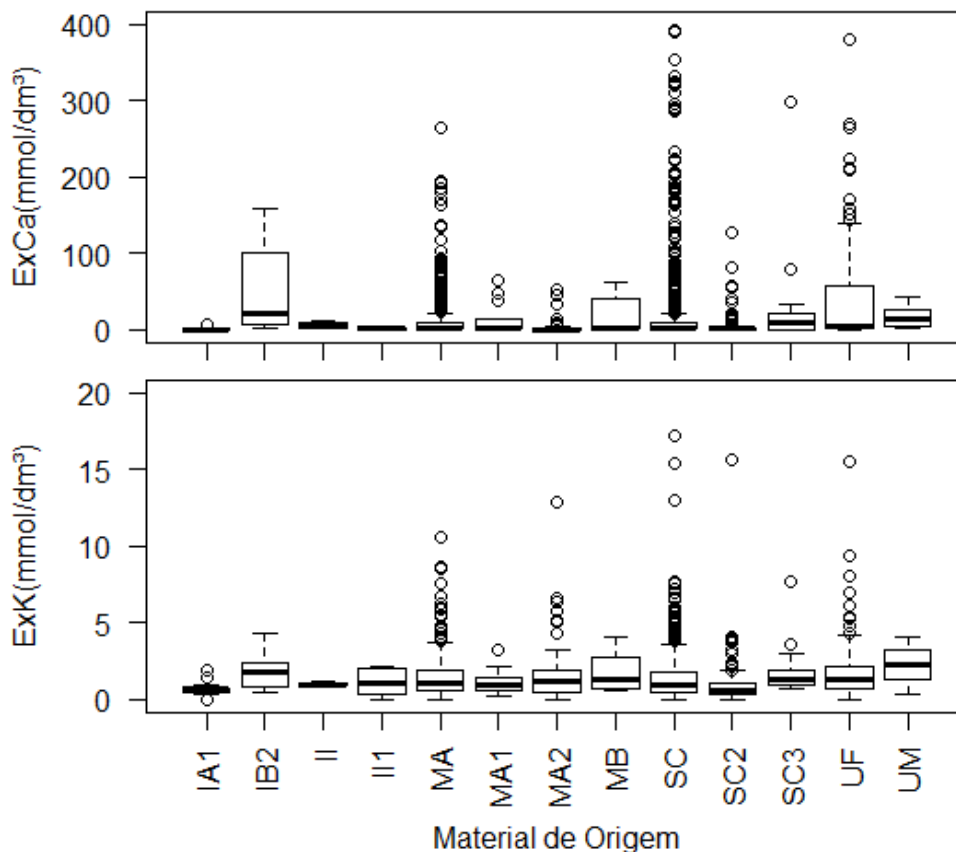
Figura 6 Distribuição da concentração de nutrientes por tipos de solos Amazônicos. A legenda das classes de solos apresentadas no eixo x encontram-se na tabela 4. *ECEC (Capacidade Efetiva de Cátions Trocáveis = $K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + Al^{3+}$)

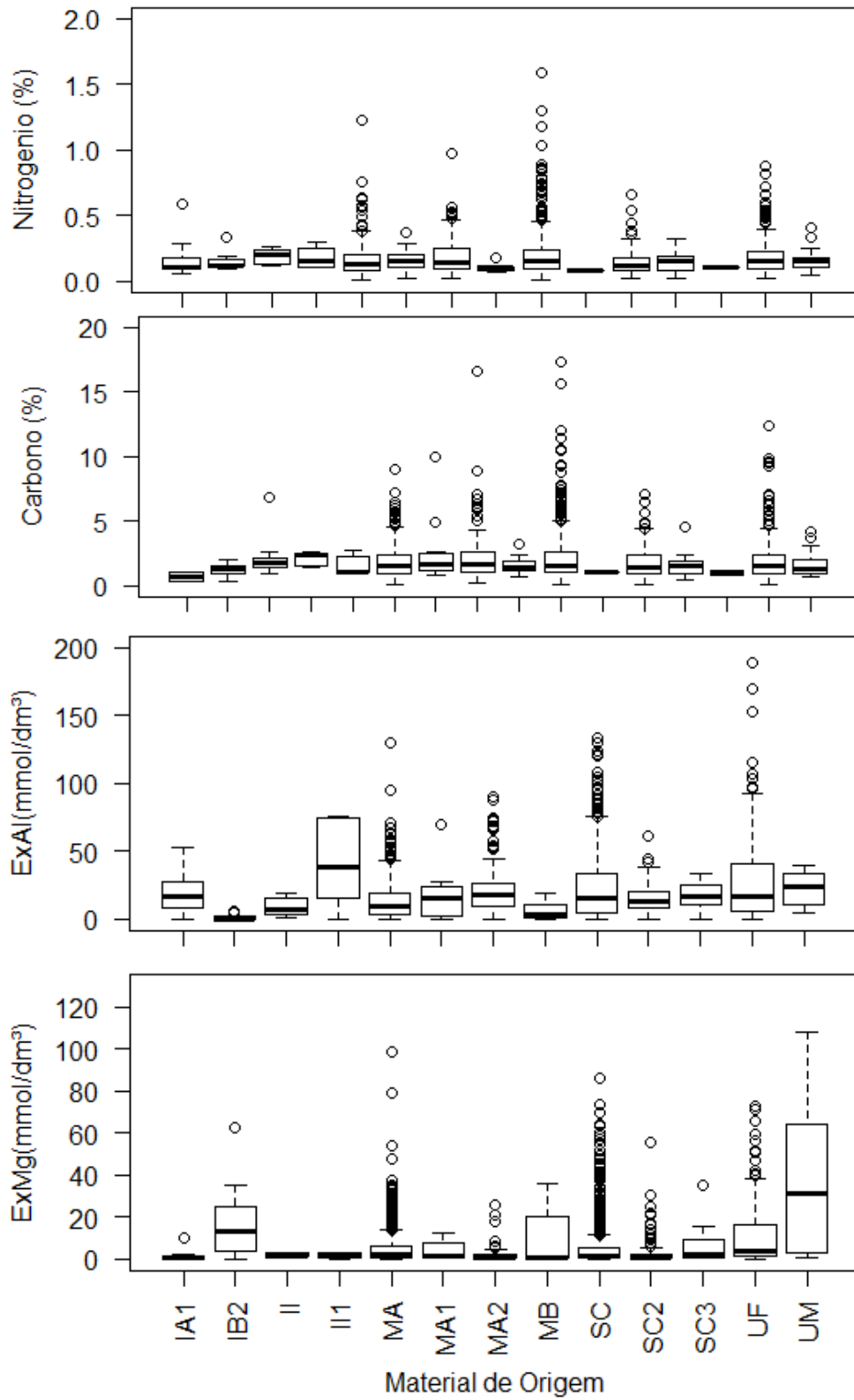
Tabela 4: Numeração das classes e legenda por subclasse de solo e nome do grande grupo de solos.

Acrisol	AC
Arenosol	AR
Ferralsol	FE
Leptosols	LE
Podzols	PO
Plinthosols	PL
Cambisols	CA
Fluvisols	FL
Regosols	RE
Lixisols	LI
Solonchaks	SO
Gleysols	GL

6.3.2 Material de origem

Para avaliação dos nutrientes em relação a rocha de origem tem se que existe um acoplamento entre o carbono e o nitrogênio, posto que eles estão presentes na matéria orgânica (Figura 7d e 7c, respectivamente). O alumínio apresenta suas maiores concentrações nos tipos de rocha Ígneas Andesito (nome dado em homenagem aos Andes que apresenta essa rocha em grande quantidade) e nas rochas sedimentares inconsolidada fluvial (Figura 7e). Os cátions de cálcio com as maiores concentrações ocorre no material de basalto, de origem ígnea (Figura – 7a), e o magnésio apresenta um padrão com baixa concentração nos diferentes materiais de origem, com exceção do material de origem de rocha marinha não-consolidada (Figura 7f). O potássio por sua vez, apresenta baixas concentrações para todos os materiais de origem geológica presentes na Amazônia (Figura 7b). Novamente, no material de origem geológico de rocha marinha não-consolidada, as concentrações do cátion Na, apresentam-se discrepantes em relação aos outros materiais de origem geológica (Figura 7g).





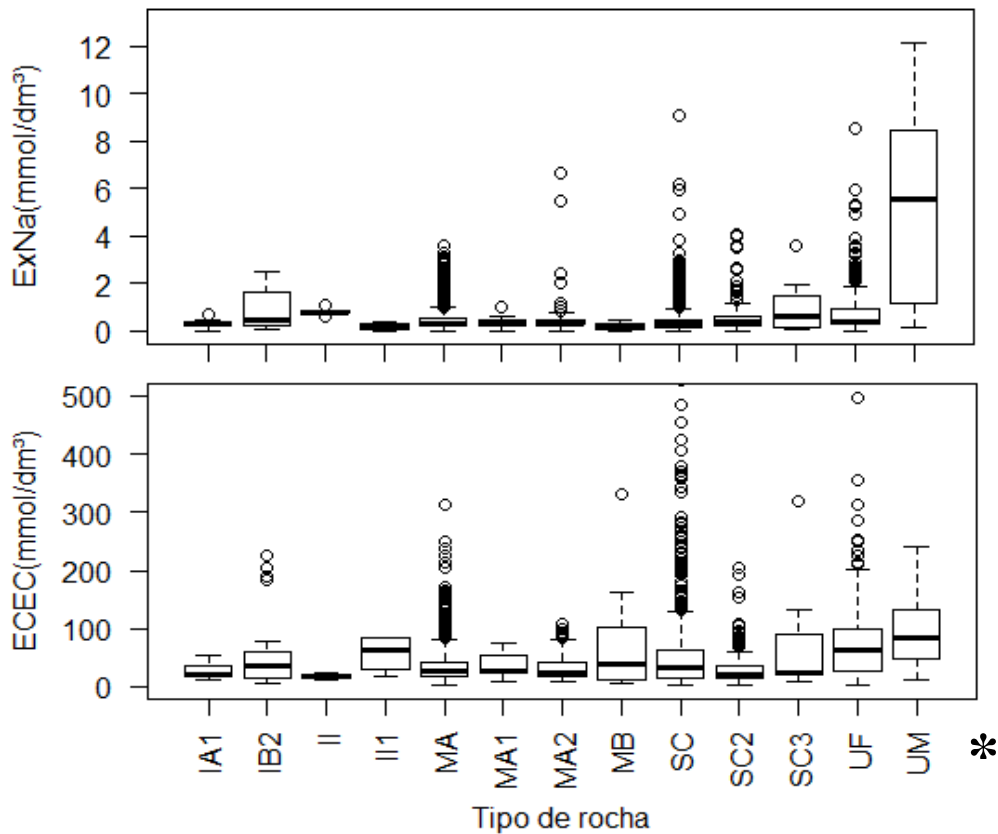


Figura 7 Distribuição da concentração e porcentagem de nutrientes por material de origem geológica da Amazônia. A legenda das classes do material de origem geológica apresentados no eixo x encontram-se na tabela 5. * ECEC (Capacidade Efetiva de Cátions Trocáveis = $K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + Al^{3+}$)

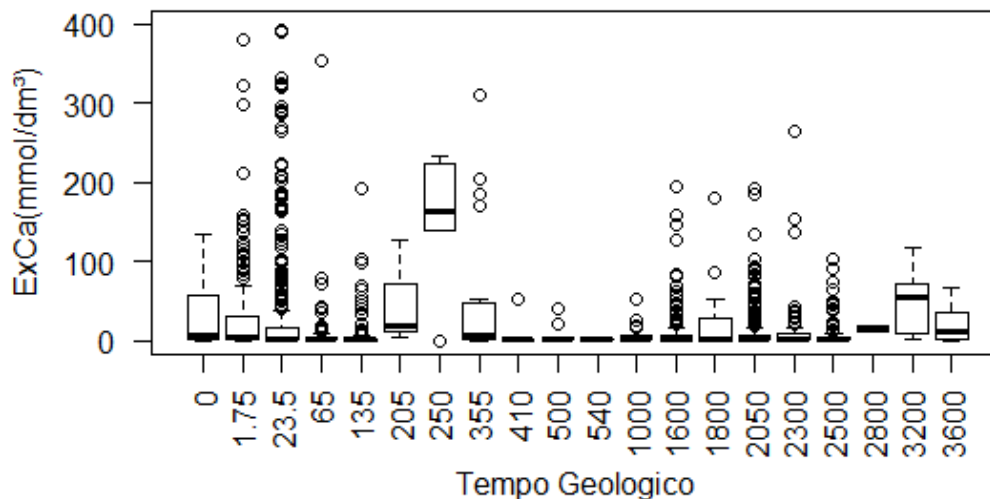
Tabela 5: Legenda das classes do material de origem geológica.

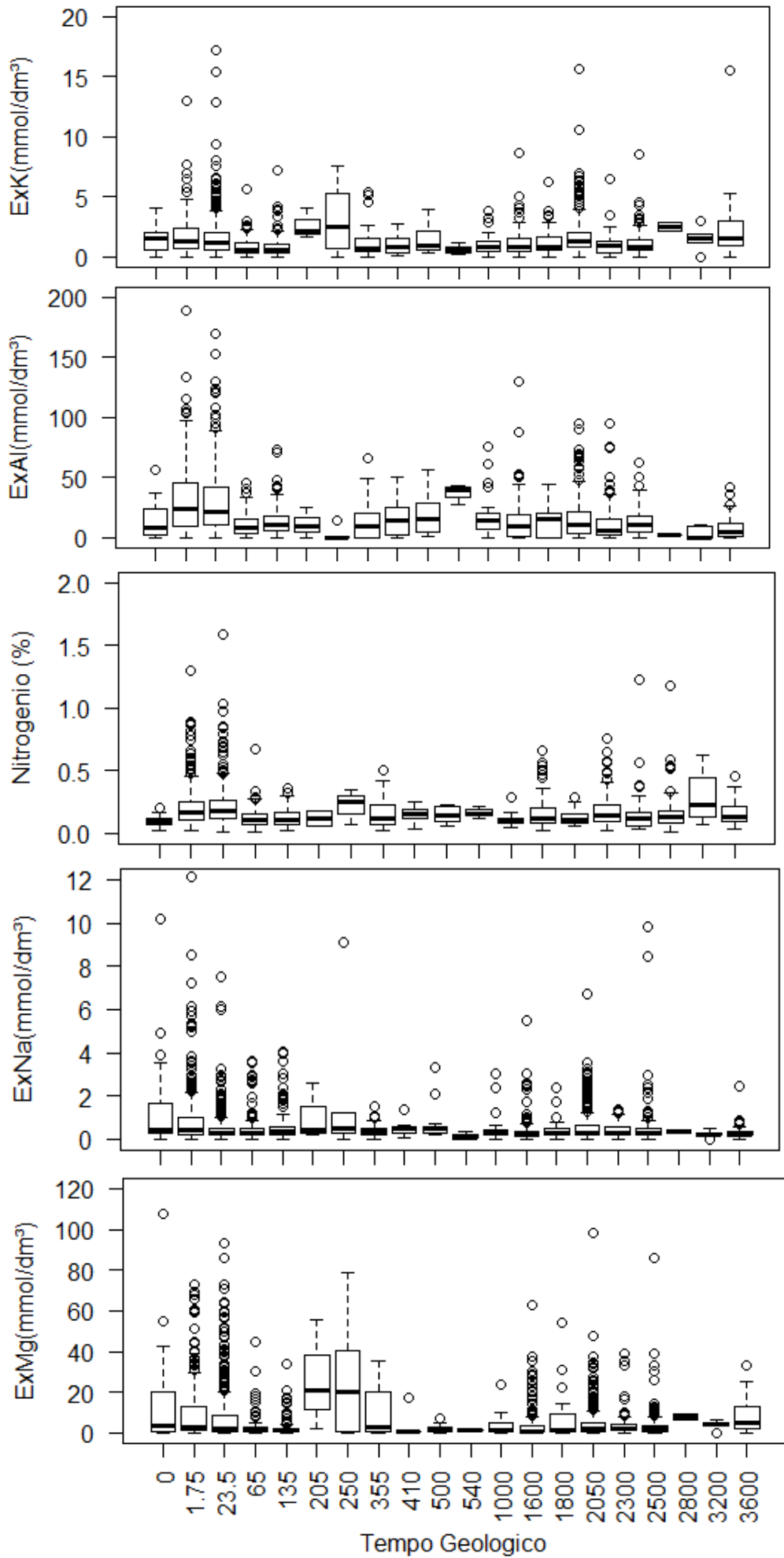
Legenda	Material Parental	Legenda	Legenda	Material Parental	Legenda
UF	Fluvial	Sedimentar Inconsolidado	IA	Rocha ígnea acida	Ignea
UO	Rocha orgânica não consolidada	Sedimentar Inconsolidado	II1	Andesito	Ignea
MA2	Gneiss	Metamorfica	II	Rocha ígnea intermediária	Ignea
MA1	Quartzito	Metamorfica	MB3	Gneiss rico em minerais ferrico-magnésio	Metamorfica
SC1	Conglomerado	Sedimentar	SC	Clastic sedimentos	Sedimentar
IA1	Granito	Ignea	MA	Rocha acida metamórfica	Metamorfica
IB1	Gabbro	Ignea	IA2	Grano-diorito	Ignea

WR	WR	WR	SC3	Siltstone	Sedimentar
SC2	Sandstone	Sedimentar	SC4	Shale	Sedimentar
UM	Rocha marinha não consolidada	Sedimentar Inconsolidado	MB1	Slate	Metamorfica
MB2	Schist	Metamorfica	IB2	Basalto	Ignea
MB	Rocha básica metamórfica	Metamorfica	UC	Colluvial unconsolidated rock	Sedimentar Inconsolidado
MA3	Slate	Metamorfica	IB	Rocha ígnea básica	Ignea

6.3.3 Período geológico

Para as informações de período geológico tem se que as maiores concentrações de sódio (Figura 8g) se apresentam nos períodos Quaternário e Triássico. Enquanto para o potássio (Figura 8b) não é possível reconhecer esse gradiente de mais jovem para antigo, mas é possível notar a maior disponibilidade do nutriente no material do período Triássico (Mesozoico) e o que antecede Jurássico. Para a porcentagem de carbono (Figura 8f) e de nitrogênio (Figura 8e) não há variações óbvias. O cálcio (Figura 8a) apresenta maiores concentrações no material geológico do período triássico, possivelmente associado a material erodido dos Andes (Quesada et al. 2010; Irion 19XX). As concentrações de alumínio (Figura 8c) apresentam seus maiores valores nos materiais de origem mais jovens pelas razões descritas na seção anterior. O elemento magnésio acompanhou os padrões dos outros cátions (Figura 8 d). O ECEC (Figura 8h) apresentou suas maiores disponibilidade em solos mais jovens.





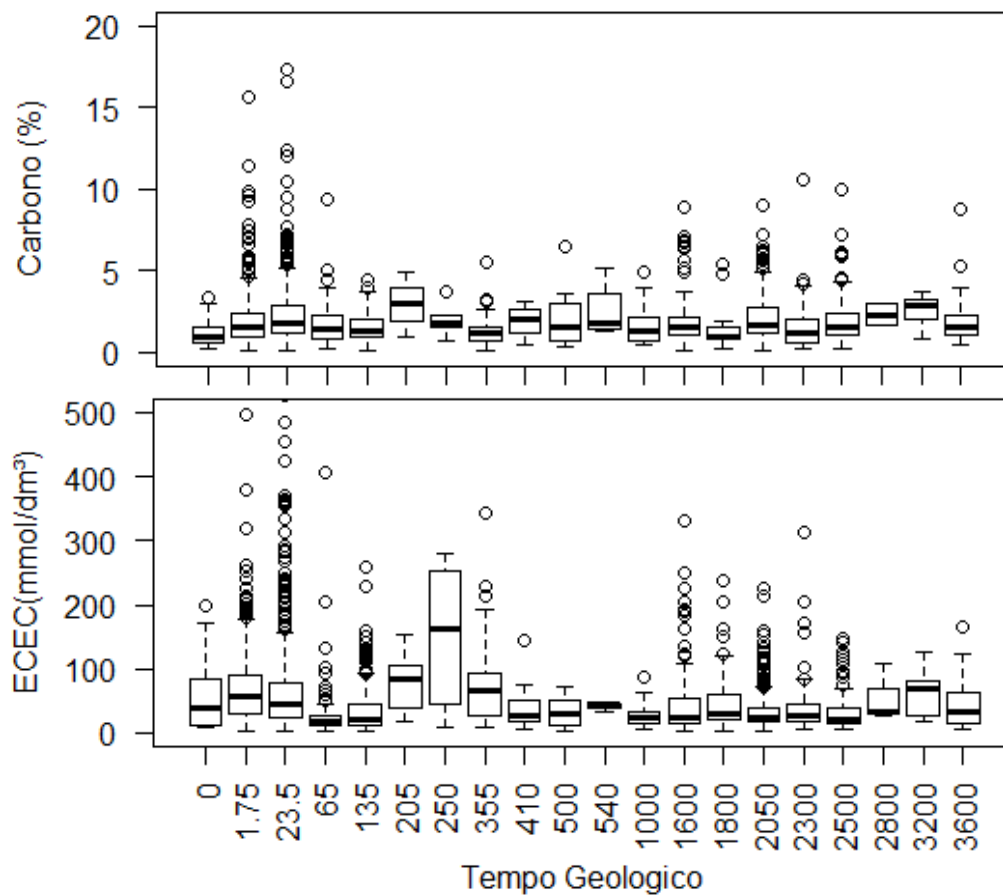


Figura 8 Distribuição da concentração e porcentagem de nutrientes por períodos geológicos na Amazônia. A legenda das classes do material de origem geológica apresentados no eixo x encontram-se na tabela 6. * ECEC (Capacidade Efetiva de Cátions Trocáveis = $K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + Al^{3+}$)

6.4 Análises estatísticas

6.4.1 Modelo NMDS

As análises de escalonamento multidimensional não-métrico bidimensional quando utilizado todos os pontos amostrais (Fig. 9. a;b;c;), não apresentou um padrão claro. Sendo assim o método estatístico NMDS foi aplicado as medias dos valores, o que apresentou uma distribuição mais clara e semelhante ao encontrado nas análises de boxplot (Fig. 10 a;b;c;).

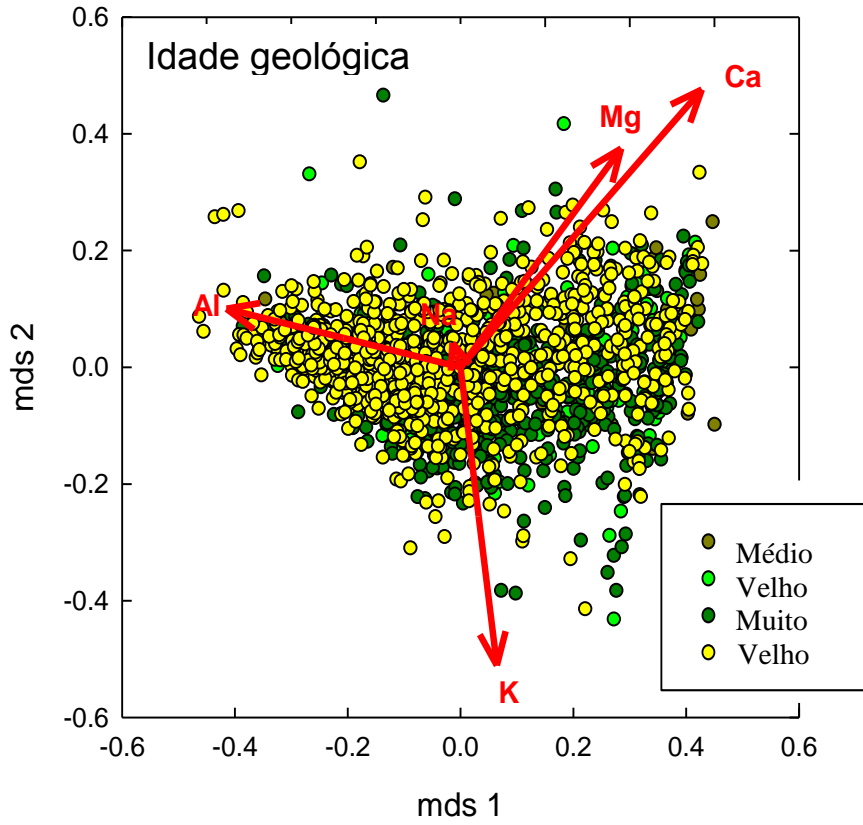


Figura 9 a Distribuição dos nutrientes por idade geológica

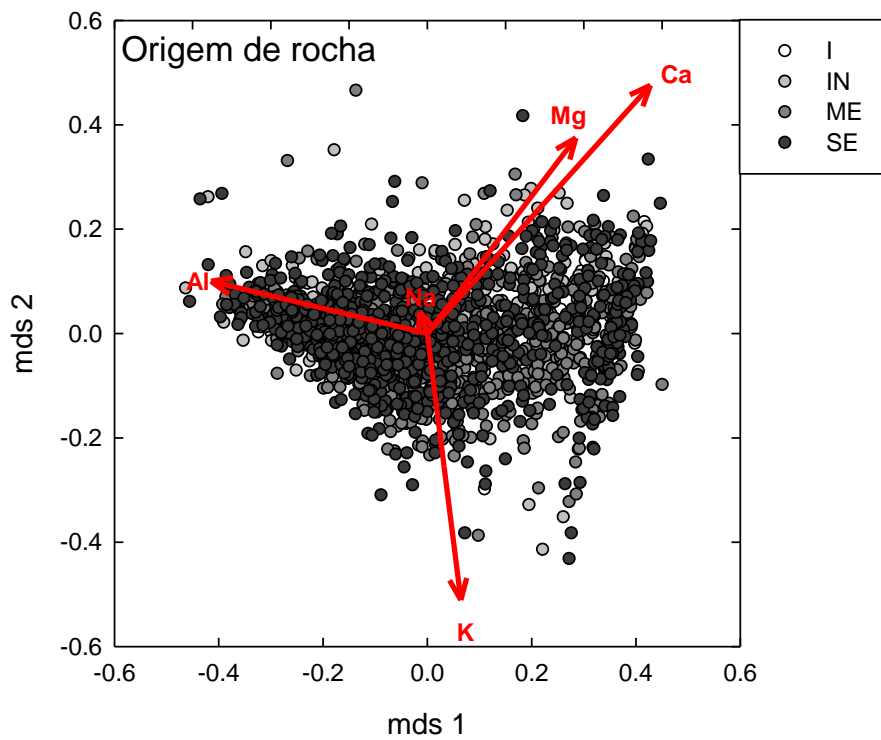


Figura 9 b Distribuição dos nutrientes por origem da rocha

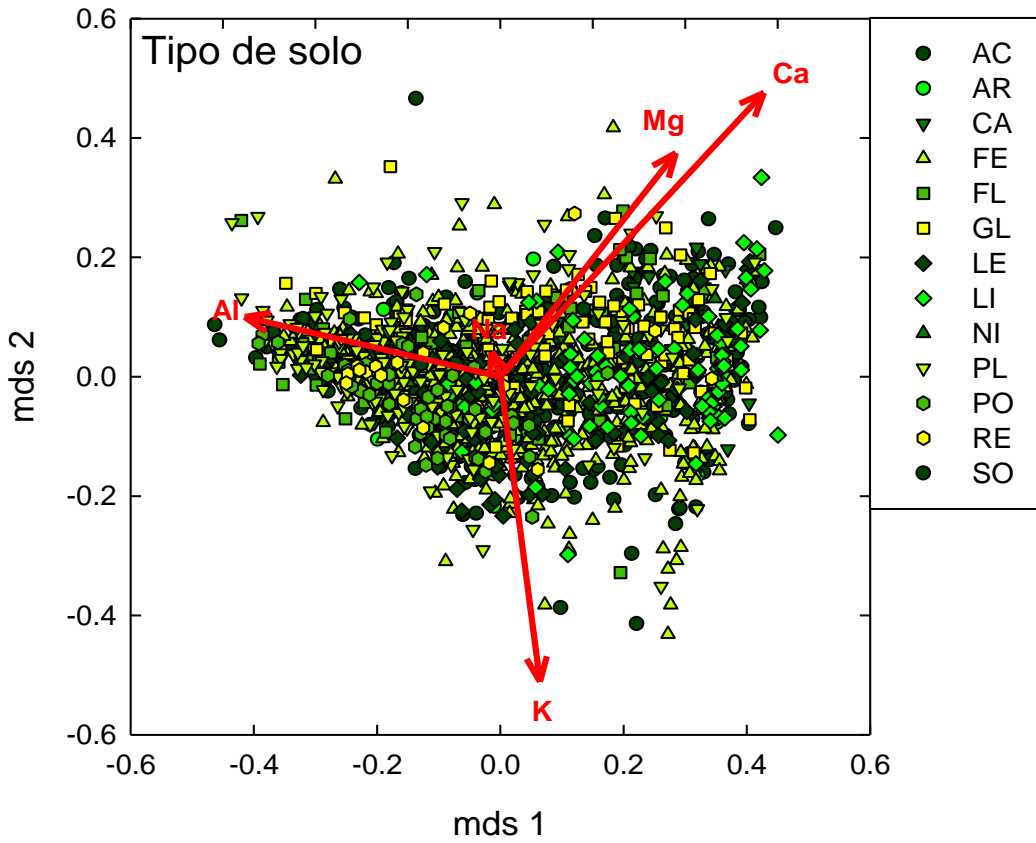


Figura 9 c Distribuição dos nutrientes por tipo de solo

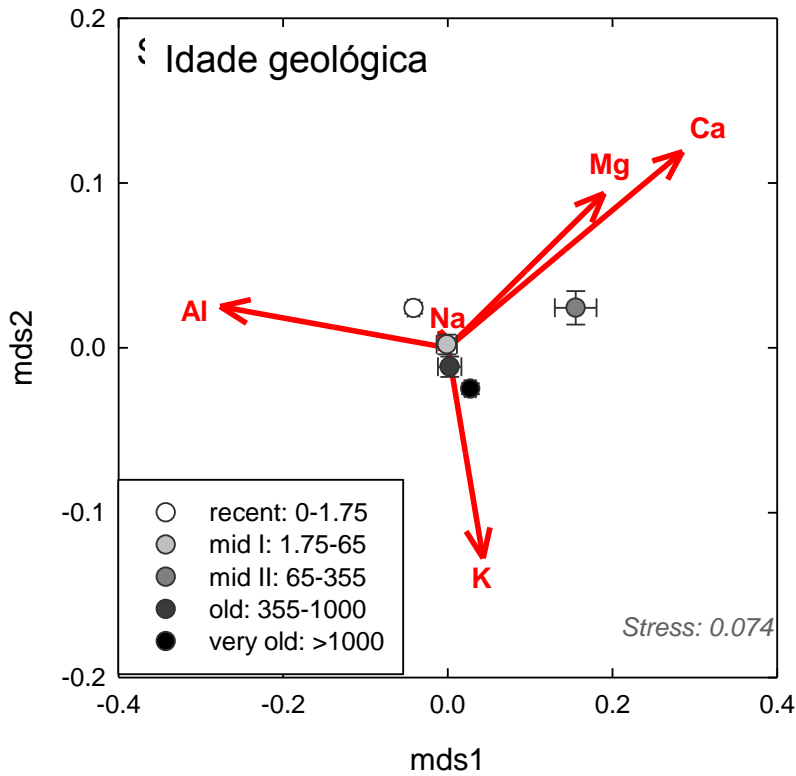


Figura 10 a Distribuição média dos pontos por idade geológica

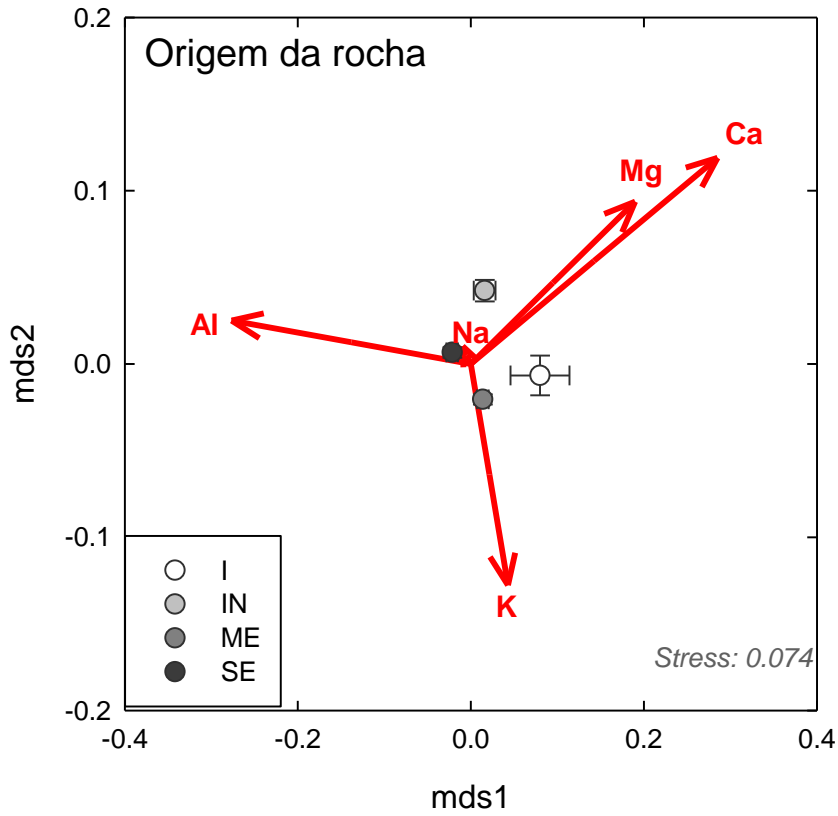


Figura 10 b Distribuição média dos pontos por origem da rocha.

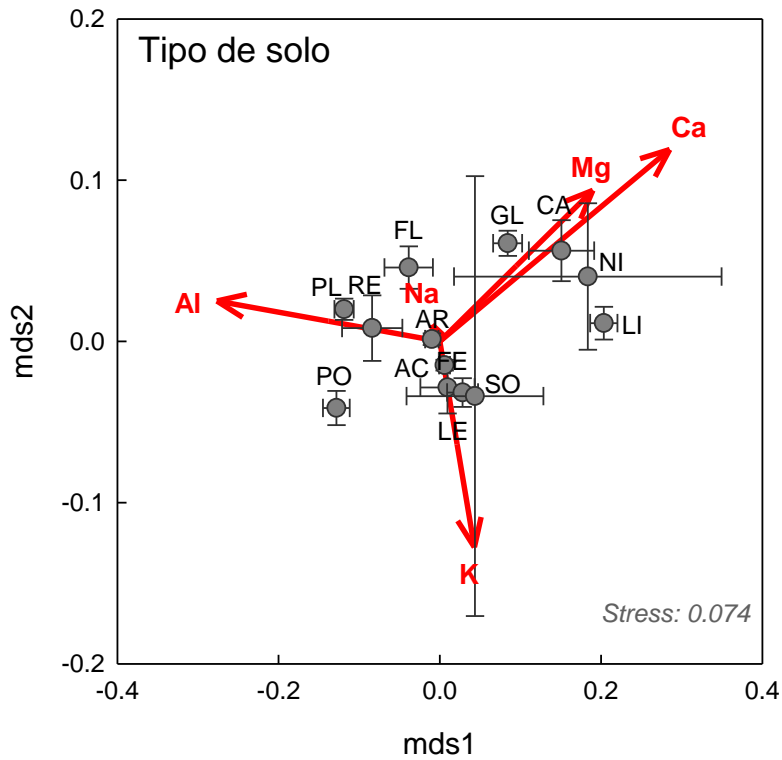


Figura 10 c Distribuição média dos pontos por tipos de solo

6.4.2 Análise de Variância Multivariada (ANOVA Multivariada)

Os resultados encontrados na análise de variância foram significativos, apresentando um efeito de: Idade geológica ($R^2 = 0.01$; $p < 0.001$) ; Material origem ($R^2 = 0.02$; $p < 0.001$) ; Tipo.de.solo ($R^2 = 0.1$; $p < 0.001$) , sendo que esses fatores quando somados explicam cerca de 15% da variação dos dados (Tabela 7).

Tabela 6. ANOVA Multivariada de permutações

Resultados ADONIS	Df	Sums Sqs	Mean Sqs	F	R²	p	
Material origem	3	140316	46772	19.93	0.02	0.001	***
Tipo.de.solo	12	562787	46899	19.98	0.10	0.001	***
Idade geológica	4	82759	20690	8.81	0.01	0.001	***
Material origem:Tipo.de.solo	10	132871	13287	5.66	0.02	0.001	***
Material origem:idade geológica	12	43645	3637	1.54	0.01	0.133	
Tipo.de.solo:idade geológica	26	103502	3981	1.69	0.02	0.063	
Material origem:idade geológica	11	31750	2886	1.23	0.01	0.251	
Materialorigem:Tipo.de.solo:idade geológica	10	9182	918	0.39	0.00	0.912	
Residuals	1917	4498454	2347	0.77			
Total	2026	5806038	1				

7 CONCLUSÃO

Esta pesquisa desenvolve uma base de dados que integram 1844 amostras de solos do RADAM e WISE padronizadas no modelo das profundidades dos protocolos desenvolvidos pelo RAINFOR. Atualmente, esta é a maior base de dados de amostras de solos padronizados para a Amazônia.

Uma vez que existe uma forte variação nas concentrações dos elementos no solo com a profundidade, este tipo de harmonização dos perfiz de solo tem importantes implicações para o uso destas bases de dados. Uma vez harmonizadas, será muito mais fácil inclui-las em estudos de variação espacial dos dados de solo, bem como sua utilização como parâmetros em modelos. Além disso, a harmonização das três bases de dados expandiram muito a cobertura dos dados para as regiões fora do Brasil.

Em relação ao material de origem, conclui-se que mesmo sendo a bacia Amazônica pobre em nutrientes no solo, o material de origem sedimentar inconsolidado e rochas ígneas apresentam maior disponibilidade de nutrientes. Entretanto, as maiores variações de nutrientes parecem estar relacionadas a uma associação entre a idade geológica e o tipo de material de origem. Os nutrientes no solo apresentam uma tendência de maiores concentrações próximos aos rios e ao oeste da Bacia Amazônica, onde os solos são mais jovens e férteis. Esse estudo servira como base para estudos futuros de modelagem de interação vegetação e solo, assim como estimativas de nutrientes limitantes como fosforo para a Bacia Amazônica.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. Agência Nacional de Águas. 2013. Gerenciamento Integrado e Sustentável dos Recursos Hídricos Transfronteiriços na Bacia do Rio Amazonas. (<http://www2.ana.gov.br/Paginas/projetos/GEFAmazonas.aspx>).
- Anadon, J.D., Sala, O.E. & Maestre, F.T. 2014. Climate change will increase savannas at the expense of forests and treeless vegetation in tropical and subtropical Americas. *Journal of Ecology*, 102, 1363–1373.
- Aragão, L.E.O. & Shimabukuro, Y.E. 2010. The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. *Science* 328, 1275–1278
- Artaxo, P. Oliveira, P. H. Lara, L. L. Pauliquevis, T. M. Rizzo, L. V. Pires, C. Paixão, M.A. Longo, K.M.Freitas, S. Correia, A. L. 2006. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia, *Rev. Bras. Meteorologia*, 21(3), 168–189.
- Barcelo, J.; Poschenrieder, C. 2002. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. *Environmental and Experimental Botany* 48: 75–92.
- Batjes, N. H. 1992. World Inventory of Soil Emissions: Report of Working Group Discussions and Recommendations. *Proceedings of an International Workshop organized in the framework of the Netherlands National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change*. WISE Report N°1, ISRIC, Wageningen, 20pp.
- Batjes, N. H. 2005. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. *Soil Use and Management*. 21: 22-34.
- Batjes, N. H.; Al-Adamat, R.; Battacharyya, T.; Bernoux, M.; Cerri, C.P.E.; Gicheru, P. et al. 2007. Preparation of consistent soil data sets for modelling purposes: Secondary SOTER data for four case study areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 122: 26–34.
- Batjes, N.H. 2008. ISRIC-WISE harmonized global soil profile dataset (version 3.1). *Report 2008/02, ISRIC –World Soil Information, Wageningen*. Available at: http://www.isric.org/isric/webdocs/Docs/ISRIC_Report_2008_02.pdf.
- Batjes, N.H. 2009. Harmonized soil profile data for applications at global and continental scales: updates to the WISE database. *Soil Use and Management*, 25, 124–127.
- Batjes, N.H. 2011. Soil organic carbon stocks under native vegetation - revised estimates for use with the simple assessment option of the Carbon Benefits Project system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142, 365–373.

- Batjes, N. H. 2012. Projected changes in soil organic carbon stocks upon adoption of recommended soil and water conservation practices in the upper Tana river catchment, Kenya. *Land Degradation & Development*. 25: 278-287.
- Bishop, T. F. A.; McBratney, A. B.; Laslett, G. M. 1999. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma*, 91: 27-45.
- Bockheim, J. G. 2005. Soil endemism and its relation to soil formation theory. *Geoderma*, 129, 109-124.
- Borgen F. H. and Selig, M. J. 1978. Uses of Discriminant Analysis Following MANOVA: Multivariate Statistics for Multivariate Purposes. *Journal of Applied Psychology*, Vol. 63, No. 6, 689-697
- Brienen, R. J. W; Phillips, O. L. Feldpausch, T. R. Gloor. et al. 2015. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519, 344–348.
- Broadbent, E.; Asner, G.P.; Keller, M.; Knapp, D.; Oliveira, P.; Silva, J. 2008. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. *Biological Conservation*, 140, pp. 142–155.
- Cochrane, T. A.; Cochrane, T. T.; Killeen, T. 2001. The digital land systems survey of the Amazon. 2001. Disponível em: <http://www.agteca.com/publications/CLAS_dig.pdf>, acesso em 29 de maio de 2015.
- Coleman, D.C.; Crossley, D.A.; Hendrix, P.F. 2004. *Fundamentals of Soil Ecology* (2nd Ed.) *Elsevier Academic Press*, Amsterdam–Boston.
- Cooper, M.; Mendes, L. M. S.; Silva, W. L.C; Sparovek, G. 2005. A National Soil Profile Database for Brazil Available to International Scientists. *Soil Science Society of America*, 69, 649-652.
- Costa, M. H.; Foley, J. A. 2000. Combined Effects of Deforestation and Doubled Atmospheric CO₂ Concentrations on the Climate of Amazonia. *J. Climate*. 13: 1834.
- Cox, P. M.; Betts, R. A.; Jones, C. D.; Spall, S. A.; and Totterdell, I. J. 2000. Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature*, 408, 184–187, doi:10.1038/35041539.
- CPTEC, Centro de Previsão de Tempo e Clima. 2010. (<http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/>)
- Dijkshoorn, K.; Huting, J.; Tempel, P. 2005. Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC). Report 2005/01, ISRIC – World Soil Information, Wageningen.
- ESRI. 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

- Eva, H. D.; Huber, O. 2005. A proposal for defining the geographical boundaries of Amazonia. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- FAO. 1986. *Reporto n natural resources for food and agriculture in the Asia and Pacific region*. FAO Environment and Energy Paper. 124p.
- FAO/ISRIC. 2000. *Soil and Terrain Database, Land Degradation Status and Soil Vulnerability Assessment for Central and Eastern Europe Version 1.0 (1:2.5 million scale)*. Land and Water Digital Media Series # 10.
- Fearnside, P. M. 1997. Limiting factors for development of agriculture and ranching in Brazilian Amazonia. *Revista Brasileira de Biologia* 57: 531-549.
- Fearnside, P. M. 2013. Climate Change as a Threat to Brazil's Amazon Forest. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*,4:1-12.
- Fischer, G.; Nachtergaele, F.; Prieler, S.; Velthuisen, H.T.; Verelst, L.; Wiberg, D. 2008. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy.
- Fittkau, E. J.: Esboço de uma divisão ecológica da região amazônica. *Proc. Symp. Biol. Trop. Amaz., Florencia y Leticia*, 1969, 363-372, 1971.
- Gloor, M.; Gatti, L.; Brienen, R.; Feldpausch, TR; Phillips, OL; Miller, J; et al. 2012. The carbon balance of South America: A review of the status, decadal trends and main determinants, *Biogeosciences*, 9: 5407-5430.
- Good, P.; Lowe, J. A.; Collins, M.; Moufouna-Okia, W. 2008. An objective tropical Atlantic sea surface temperature gradient index for studies of south Amazon dryseason climate variability and change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*. 363: 1761-1766.
- Grace, J.; Lloyd, J.; McIntyre, J.; Miranda, A. C.; Meir, P.; Miranda, H. S. et al. 1995. Carbon Dioxide Uptake by an Undisturbed Tropical Rain Forest in Southwest Amazonia, 1992 to 1993. *Science*,270: 778-780.
- Hansen, J.; Sato, M.; Ruedy, R.; Lo, K.; Lea, D. W.; Medina-Elizade, M. 2006. Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,103: 14288-14293.
- Harris, P. P.; Huntingford, C.; Cox, P. M. 2008. Amazon Basin climate under global warming: the role of the sea surface temperature. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*,363: 1753-1759.
- Haugaasen, T.; Peres, C. A. 2006. Floristic, edaphic and structural characteristics of flooded and unflooded forests in the lower Rio Purús region of central Amazonia, Brazil. *Acta Amazonica*, 36(1), 25-35.
- Hedin, L. O. 2015. Signs of saturation in the tropical carbon sink. Vol 519 Nature.

- Hengl, T.; Jesus, J. M.; MacMillan, R. A.; Batjes, N. H.; Heuvelink, G. B. M.; Ribeiro, E. 2014. SoilGrids 1km – Global Soil Information Based on Automated Mapping. *PlosOne*, 9: e105992.
- Herbert, D. A., Fownes, J. H., 1995. Phosphorus limitation of forest leaf area and net primary production on a highly weathered soil. *Biogeochemistry*, Volume 29, Issue 3, pp 223-235.
- Higgins, M.A.; Ruokolainen, K.; Tuomisto, H., Llerena, N.; Cardenas, G.; Phillips, O.L. et al. 2011. Geological control of floristic composition in Amazonian forests. *J. Biogeogr.*, 38, 2136–2149.
- IBGE. 2015. Levantamento de Recursos Naturais. (http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv24035_a.pdf). Acesso em 29 de maio de 2015.
- Irion, G. 1978. Soil infertility in the Amazonian rain forest. *Naturwissenschaften* 65: 515-519.
- Jordan, C F and Herrera, R. 1981; Tropical rain forests: are nutrients really critical ? *The American Naturalist* 117: 167-180.
- Kasparia, M.; Yanoviak, S. P.; Dudley, R. 2008; On the biogeography of salt limitation: A study of ant communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105: 17848–17851.
- Kruskal, J.B. 1964. Nonmetric multidimensional Scaling: a numerical method. *PSYCHOMETRIKA-VOL. 29, NO. 2 JUNE*.
- Lewis, S. L.; Bonaventura, S.; Sunderland, T.; Begne, S. K.; Lopez-Gonzalez, G.; Van der Heijden, G. M.F. et al. 2012. Above-ground biomass and structure of 260 African tropical forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 7: 788807.
- Lewis, S. L.; Brando, P. M.; Phillips, O. L.; Van der Heijden, G. M. F.; Nepstad, D. 2011. The 2010 Amazon drought. *Science*. 331: 554-554.
- Lewis, S., 2012. On the ground monitoring of tropical forests, RAINFOR, AfriTRON and forestplot.net. Disponível em: (http://www.gofc-gold.unijena.de/wg_biomass/wp-content/uploads/2012/06/Lewis_Simon.pdf). Acesso em 25 de maio de 2015.
- Li, W. H.; Fu, R.; Dickinson, E. 2006. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC-AR4. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111: 2111.
- Lindenmayer, D. B.; Franklin, J. F. 2002. *Conserving Forest Biodiversity: a comprehensive multiscaled approach*. Washington: Island Press.
- Lugli D. L., Manzi, A. O., Emilio, T., Fearnside, P. M, Pimentel, T., Quesada, C. A. 2013. Nutrient stocks in coarse wood debris and standing litter crop vary as a function of edaphic properties in Central Amazon forests.

- Luizão, F. J. 2007. Ciclos de Nutrientes na Amazônia: Respostas às mudanças ambientais e climáticas. *Cienc. Cult.* vol.59 no.3 São Paulo July/Sept.
- Malhi, Y.; Phillips, O.L.; Baker, T.; Almeida, S.; Fredericksen, T.; Grace, J.; Higuchi, N. et al. 2002. An international network to understand the biomass and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). *Journal of Vegetation Science*, 13:439-450.
- Malhi, Y.; Wright, J. A. 2004. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical forest regions, *Phil. T. Royal Soc.*, 311–329.
- Malhi, Y. Aragão, L. E. O. C.; Metcalfe, D. B.; Paiva, R.; Quesada, C. A.; Almeida, S. 2009. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 15: 1255-1274.
- Malhi, Y.; Aragão, L.E.O.C.; Galbraith, D.; Huntingford, C.; Fisher, R.; Zelazowski, P.; Sitch, S.; McSweeney, C.; Meir, P. 2009. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106: 20610-20615.
- Marengo, J. A. 2004. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical Applied Climatology*, 78: 79-96.
- Marengo, J. A.; Nobre, C. A.; Tomasella, J. 2008. The drought of Amazonia in 2005. *J. Climate*, 21:495-516.
- Marengo, J. A.; Tomasella, J.; Alves, L. M.; Soares, W. R.; Rodriguez, D. A. 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, 38: 1-5.
- McBratney, A. B.; Minasny, B.; Cattle, S. R.; Vervoort, R. W. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109: 41-73.
- McBratney, A. B.; Minasny, B.; Tranter, G. 2010. Necessary meta-data for pedotransfer functions. *Geoderma*, 160: 627-629.
- Nachtergaele, F.; Van Velthuyzen, H.; Verelst, L.; Wiberg, D. 2012. *Manual Harmonized World Soil*. Database v1.2.
- Nepstad, D. C.; Verssimo, A.; Alencar, A.; Nobre, C.; Lima, E.; Lefebvre, P. et al. 1999. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, 398: 505-508.
- Nepstad, D. C.; Moutinho, P.; Dias-Filho, M. B.; Davidson, E.; Cardinot, G.; Markewitz, D. et al. 2002. The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. *Journal of Geophysical Research*, 107: 8085.
- Nepstad, D.; Lefebvre, P.; Lopes da Silva, U.; Tomasella, J.; Schlesinger, P.; Solorzano, L.; Guerreira Benito, J. 2004. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: A basin wide analysis. *Global Change Biology*, 10(5), 704-717.

- Nepstad, D. C.; Tohver, I. M. Ray, D.; Moutinho, P.; Cardinot, G. 2007. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. *Ecology*, 88: 2259-2269.
- Odgers, N. P.; Libohova, Z.; Thompson, J. A.; 2012. Equal-area spline functions applied to a legacy soil database to create weighted-means maps of soil organic carbon at a continental scale. *Geoderma*, 189-190: 153-163.
- Oldeman, L. R.; Van Engelen, V. W. P. 1993. A world soils and terrain digital database (SOTER)- Na improved assesement of land resources. *Geoderma*, 60:309 -325.
- Paoli, G. D.; Currans, L.M. 2007. Soil Nutrients Limit Fine Litter Prodsuction and Tree Growth in Mature Lowland Forest of Southwesterns Borneo. *Ecosystems*, 10: 503-518.
- Pauliquevis, T.; Artaxo, P.; Oliveira, P. H.; Paixão, M. 2007. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico. *Cienc. Cult.* 59(3): 48-50.
- Phillips, O. L.; Vargas, P. N.; A.; Monteagudo, L.; Cruz, A. P.; Zans, M. E. C.; Sánchez, W.G.; YliHalla, M.; Rose, S. 2003. Habitat association among Amazonian tree species: a landscape scale approach. *Journal of Ecology* 91:757– 775.
- Phillips, O. L.; Aragão, L. E. O. C.; Lewis, S. L.; Fisher, J. B.; Lloyd, J.; Gonzalez, G. L. 2009. Drought sensitivity of the Amazona rainforest. *Science*, 323: 13441347.
- Prentice, I.C.; Farquhar, G.D.; Fasham, M.J.R.; Goulden, M.L.; Heimann, M.; Jaramillo, V.J.; Khesghi, H.S.; Quéré, C. L.; Scholes, R.J.; Wallace, D.W.R. 2001. The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report*, Cambridge University Press.
- Quesada, C. A.; Lloyd, J. Schwarz, M.; Patiño, S.; Baker, T. R.; Czimezik, C. I. et al. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. 2010. *Biogeosciences*, 7: 1515-1541.
- Quesada, C. A.; Lloyd, J.; Anderson, L. O.; Fyllas, N. M.; Schwarz, M.; Czimezik, C. I. 2011. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, 8(6).
- Quesada, C. A.; Phillips, O. L.; Schwarz, M.; Czimezik, C. I.; Baker, T. R.; Patiño, S. et al. 2012. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, 9: 2203-2246.
- R Development Core Team (2008). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (<http://www.R-project.org>.)
- RADAMBRASIL. Levantamento dos Recursos Naturais (Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral. 1978 Rio de Janeiro (Brazil).

- Raich, J. W. Russell, A. E. Crews, T. E., et al. Both nitrogen and phosphorus limit plant production on young Hawaiian lava flows. 1996. *Biogeochemistry* 32: 1-14.
- Saatchi, S.; Houghton, R. A.; Santos, R. C. A.; Soares, J. V.; Yu, Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 13: 816–837.
- Saatchi, S. S.; Harris, N. L.; Brown, S.; Lefsky, M.; Mitchard, E. T. A.; Salas, W. et al. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108: 9899-9904.
- Sanchez, P. 1976. Properties and Management of Soils in the Tropics. *Soil Science*, 124: 187.
- Sombroek, W. G. 1966. A reconnaissance of Amazonian Soils. 293 p. Utrecht University Press.
- Stark, N. M. and Jordan, C. F. 1978. Nutrient Retention by the Root Mat of an Amazonian Rain Forest. *Ecology* 59:434–437. <http://dx.doi.org/10.2307/1936571>.
- Steege et al. 2006. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. *Nature* Sep 28;443(7110):444-7.
- Steege et al. 2013. Hyperdominance in the Amazonian Tree Flora. *Science* 18 October. Vol. 342 no. 6156. DOI: 10.1126/science.1243092
- Swap, R.; Garstang, M.; Greco, S.; Talbot, R.; Kållberg, P. 1992. Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus B*, 44(2), 133-149.
- Tuomisto, H.; Ruokolainen, K.; Poulsen, A. D.; Moran, R. C.; Quintana, C.; Cañas, G.; Celi, J. 2002. Distribution and diversity of pteridophytes and melastomataceae along edaphic gradients in Yasuní National Park, Ecuadorian Amazonia. *Biotropica*, 34(4), 516-533.
- Tuomisto, H.; Ruokolainen, K.; Yli-Halla, M. 2003. Dispersal, environment, and floristic variation of western Amazonian forests. *Science*, 299(5604), 241-244.
- Uppala, S. M.; Kallberg, P. W.; Simmons, A.J.; Andrae, U.; Da Costa Bechtold, V.; Fiorino, M.; et al. 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131: 2961 -3012.
- Van Engelen, V.W.P.; Wen, T.T.; 1995. Global and National Soils and Terrain Digital Databases SOTER. Procedures manual (revised edition). FAO–ISRIC–ISSS–UNEP, Wageningen, Holland. 91p.
- Vitousek, P. M., and Sanford, R. L. 1986. Nutrient Cycling in Moist Tropical Forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 17: 137-167. DOI: 10.1146/annurev.es.17.110186.001033
- Vitousek, P.M. & Farrington, H. 1997. Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochemistry* 37: 63–75.

- Vitousek, P. M. .2004.Nutrient Cycling and Limitation: Hawai'i as a Model System. Princeton University Press, 2004 - 223 páginas.
- Vitousek, P. M.; Porder, S.; Houlton, B. Z.; Chadwick, O. A. 2010.Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20: 5-15.
- Walker, T. W.; Syers J. K. 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geeoderma*, 15:1-19.
- Yang, X.; Post, W. M.; Thornton, P. E.; Jain, A. 2013. The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. *Biogeosciences*, 10(4), 2525-2537.
- Yavitt, J. B; Harms, K.E; Garcia, M. N; Mirabello, A.J; Wright, S.J. 2011 Soil fertility and fine root dynamics in response to 4 years of nutrient (N, P, K) fertilization in a lowland tropical moist forest, Panama. *Austral Ecol*, 36: 433–445.

Material Suplementar I Análise de perfis verticais de solo

Na análise visual dos nutrientes por diferentes profundidades foi observado que entre os nutrientes Alumínio (ExAl - Figura S2), Sódio (ExNa - Figura S3), Magnésio, aumentaram suas concentrações conforme aumento a profundidade, enquanto os nutrientes Potássio (ExK - Figura S1) e Cálcio diminuí a concentração conforme diminuí a profundidade. O potássio apresenta maiores concentrações na camada mais superficial de 0-5 cm (Figura 5), atingindo o máximo de 19,00 mmol/dm³. Na profundidade de 5 a 10 cm, a concentração atinge no máximo 18,00 mmol/dm³, entre 10 e 20 cm a concentração máxima é de 16,00 mmol/dm³ e finalmente na camada mais profunda amostrada, de 20 a 30 cm, a concentração máxima por amostra é de 14,00 mmol/dm³. A localização das maiores concentrações na maioria das vezes coincidem com a proximidade da cadeia montanhosa dos Andes (região de solos mais jovens) e próximo aos grandes rios (Amazonas e Rio Madeira). Mas em geral o potássio se apresentou em baixas concentrações (Figura S1).

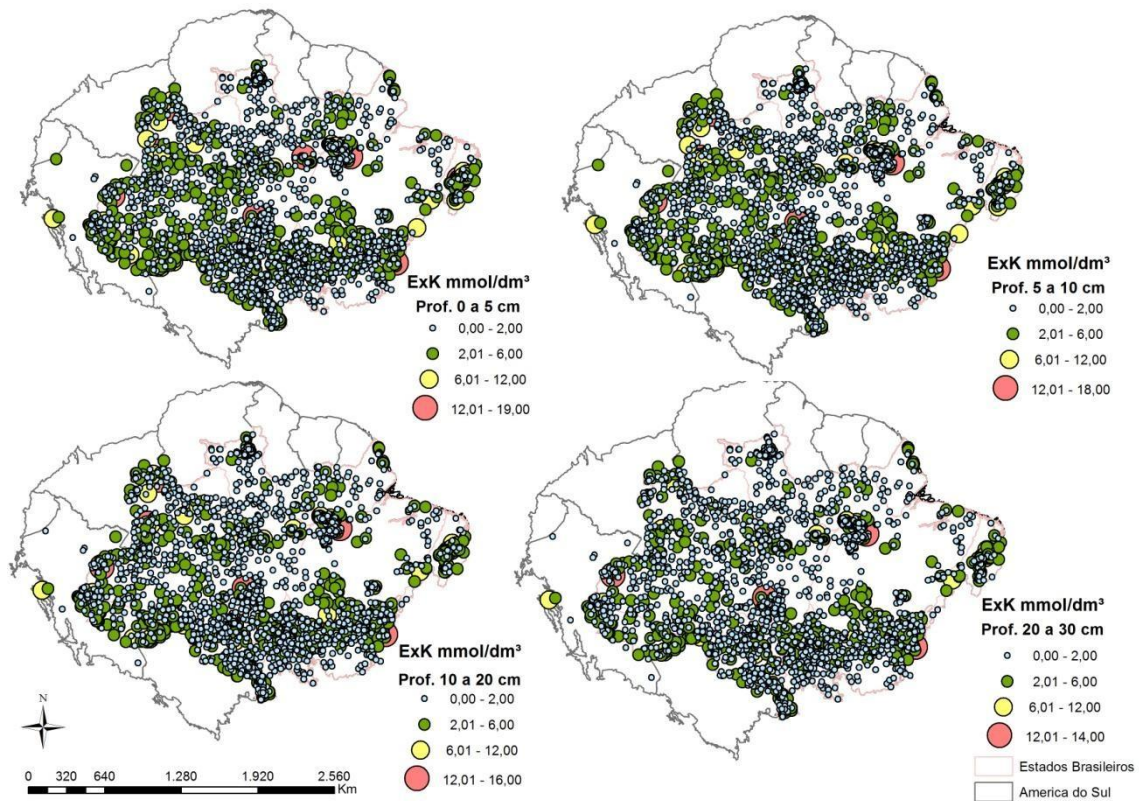


Figura S1 Amostras de potássio para as diferentes profundidades

A distribuição das concentrações de alumínio apresenta um padrão espacial em que valores maiores são observados ao noroeste da Bacia (Figura S2), próximo a cordilheira dos Andes e a região dos rios Solimões e Amazonas. Além disso, dentre os nutrientes

estudados nesta pesquisa, o alumínio é o que apresenta as maiores concentrações, atingindo mais de 200 mmol/dm³ próximo ao Peru (região de entrada de nutrientes dos Andes de solos jovens) e rio Solimões. Este resultado reforça observações feitas por outros autores (Quesada et al., 2009) que discutem que estas altas concentrações de alumínio, e também de ferro, tornam o solo da Amazônia tóxico (Barcelo et al., 2002) e até mesmo inférteis em determinados locais. Observa-se também que existe uma macroregião, localizada no sudeste da Bacia (entre os estados do Pará e Mato - Grosso) que apresenta menores concentrações em todas as profundidades.

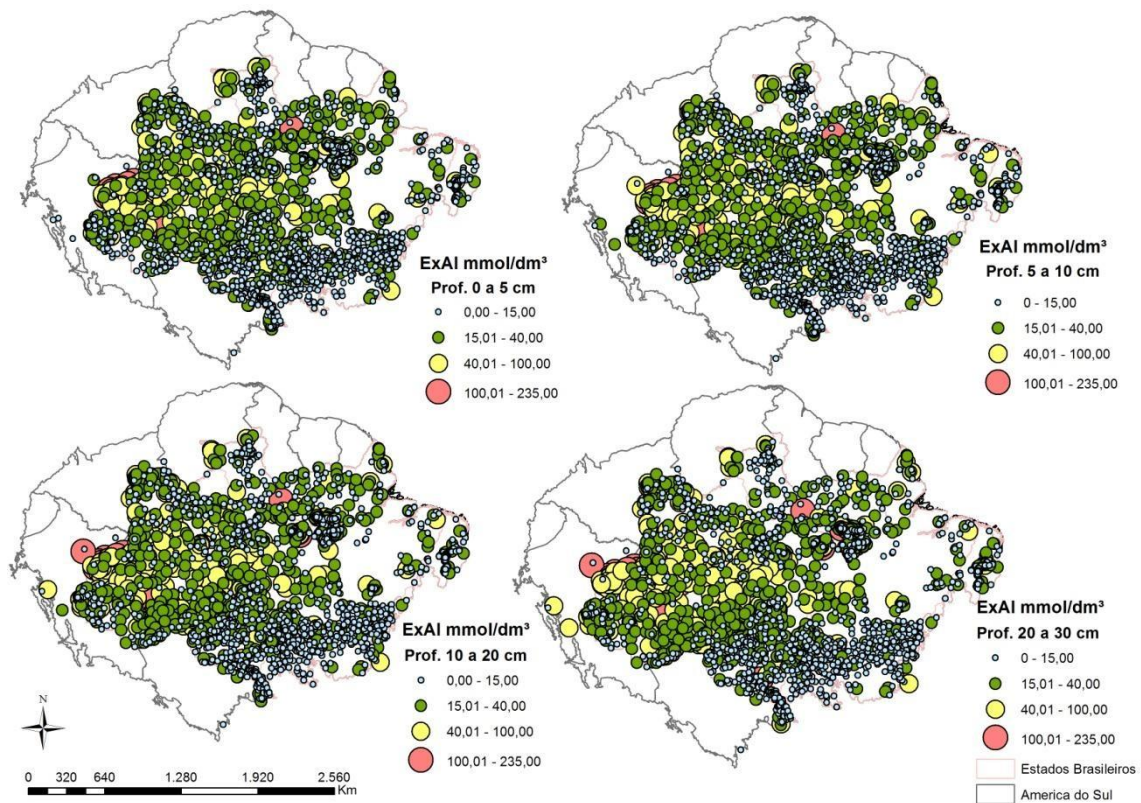


Figura S2 Amostras de alumínio para as diferentes profundidades.

Os demais nutrientes abordados nesta pesquisa não apresentam variações tão claras em suas concentrações nas diferentes profundidades. Apresenta-se abaixo a distribuição do sódio, que apresenta baixas concentrações em todas as profundidades (Figura S3). As amostras na maioria das profundidades apresentam os valores inferiores a 10 mmol/dm³. De uma forma geral as mais altas concentrações de nutrientes parecem estar relacionadas com a proximidade da Cordilheira dos Andes e proximidades dos principais rios da Bacia Amazônica.

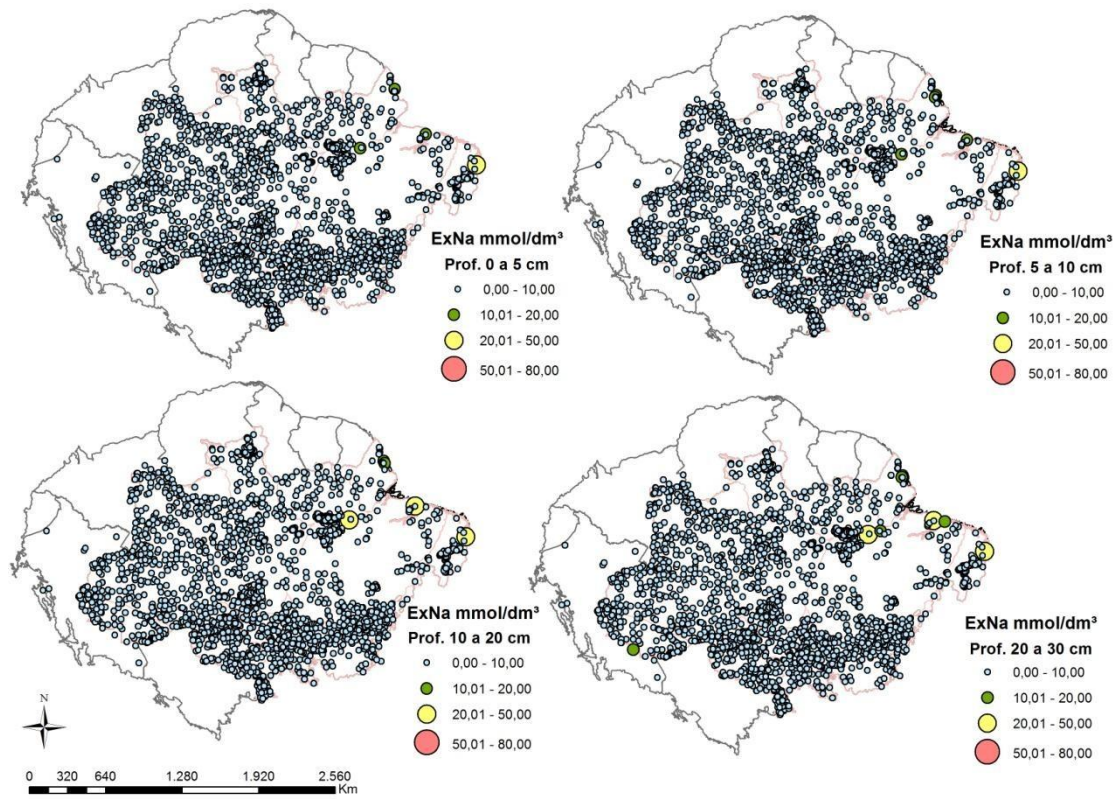


Figura S3 Amostras de Sódio para as diferentes profundidades

Material Suplementar – II Análise de estrutura física do solo

Propriedades físicas como a concentração da areia apresenta porcentagens de até próximo de 100% espalhadas em grande parte da Bacia Amazônica, com exceções as regiões de Amazônia internacional (Figura S4 a). Já as concentrações de argila (Figura S4 b) não ultrapassam as porcentagens máximas de 88% sendo em sua grande maioria os valores variando entre 18 e 30 % e para região central próximo ao rio Amazonas os valores apresentam as maiores concentrações. A distribuição destes parâmetros segue grandes padrões de formação de solo e material de origem conforme descrito por Sombroek (1966; 2000). O silte apresenta uma variação na porcentagem até 92% sendo que os valores mais altos encontram-se próximos aos grandes rios (Figura S4 c)

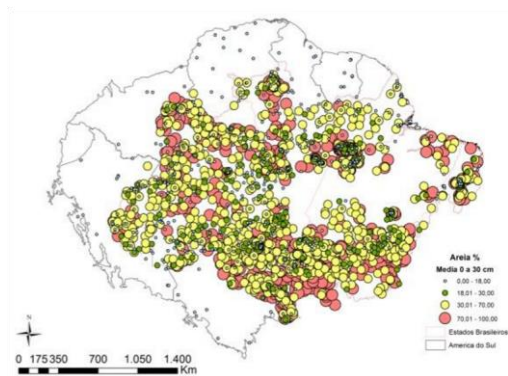


Figura S4 a

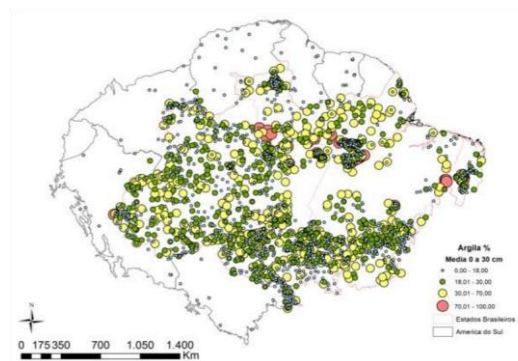


Figura S4 b

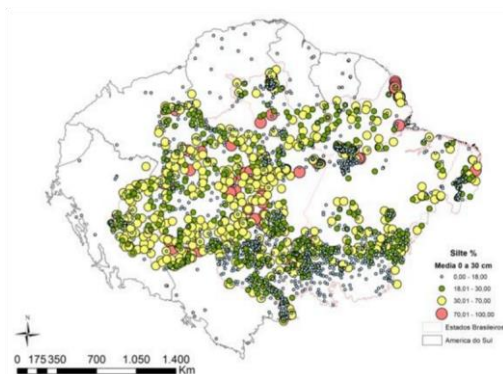
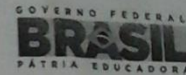


Figura S4 c

Figura S4 Amostras das estruturas físicas do solo.



Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ECOLOGIA DO INSTITUTO NACIONAL
DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA.

Aos 23 dias do mês de julho do ano de 2015, às 09:00 horas, no Auditório do PPG/ATU/ECO, Campus III, INPA/V8, reuniu-se a Comissão Examinadora de Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: o(a) Prof(a). Dr(a). **Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça**, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, o(a) Prof(a). Dr(a). **Sônia Sena Alfaia**, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA e o(a) Prof(a). Dr(a). **Fernanda Tunes Villani**, do Instituto Federal do Amazonas - IFAM, tendo como suplentes o(a) Prof(a). Dr(a). **Elisa Vieira Wandelli**, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, e o(a) Prof(a). Dr(a). **João Baptista Silva Ferraz**, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, sob a presidência do(a) primeiro(a), a fim de proceder a arguição pública do trabalho de **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO** de **MONIQUE RODRIGUES DA SILVA ANDRADE MAIA**, intitulado: “**Avaliação dos solos Amazônicos: integração de dados multifontes para caracterização das condições edáficas**” orientado pelo(a) Prof(a). Dr(a). **Carlos Alberto Nobre Quesada** do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA e coorientado pelo(a) Prof.(a) Dr(a). **Liana Oighenstein Anderson** do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Após a exposição, o(a) discente foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final:

- APROVADO(A) REPROVADO(A)
 POR UNANIMIDADE POR MAIORIA

Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

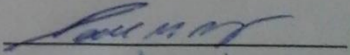
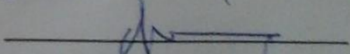
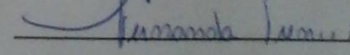
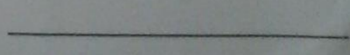
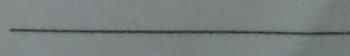
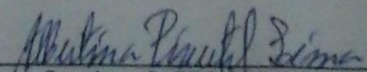
Prof(a).Dr(a). Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça

Prof(a).Dr(a). Sônia Sena Alfaia

Prof(a).Dr(a). Fernanda Tunes Villani

Prof(a).Dr(a). Elisa Vieira Wandelli

Prof(a).Dr(a). João Baptista Silva Ferraz







Coordenação PPG-ECO/INPA



305.96966830

AULA DE QUALIFICAÇÃO

PARECER

Aluno(a): MONIQUE RODRIGUES DA SILVA ANDRADE MAIA
 Curso: ECOLOGIA
 Nível: Mestrado
 Orientador(a): Dr. Carlos Alberto Nobre Quesada (INPA)
 Co-orientador (a): Dra. Liana Oighenstein Anderson (INPE)

Título:

“Bacia Amazônica: condições edáficas e a produtividade de madeira acima do solo”

BANCA JULGADORA:

TITULARES:

PAULO MAURÍCIO LIMA DE ALENCASTRO GRAÇA (INPA)
 FLÁVIO JESUS LUIZÃO (INPA)
 THAISE EMÍLIO LOPES DE SOUSA (INPA)

SUPLENTES:

EULER MELO NOGUEIRA (INPA)
 FLÁVIA REGINA CAPELOTTO COSTA (INPA)

PARECER

ASSINATURA

PAULO MAURÍCIO LIMA DE A. GRAÇA (INPA)	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado () Reprovado	
FLÁVIO JESUS LUIZÃO (INPA)	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado () Reprovado	
THAISE EMÍLIO LOPES DE SOUSA (INPA)	() Aprovado <input checked="" type="checkbox"/> Reprovado	
EULER MELO NOGUEIRA (INPA)	() Aprovado () Reprovado	
FLÁVIA REGINA CAPELOTTO COSTA (INPA)	() Aprovado () Reprovado	

Manaus(AM), 22 de Abril de 2014

OBS: A BANCA APROVOU A ALUNA COM BASE NO POTENCIAL DE TRABALHO.
Porém, a ALUNA APRESENTOU DEFICIÊNCIA NA FORMULAÇÃO DAS HIPÓTESES.
Portanto, recomendamos uma adaptação mais próxima aos
orientadores em relação às questões ecológicas.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA INPA
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA PPG-ECO
 Av. Efigênio Sales, 2239 – Bairro: Aleixo – Caixa Postal: 2223 – CEP: 69.060-020, Manaus/AM.
 Fone/Fax: (+55) 92 3643-1909 / 1838

site: <http://pg.inpa.gov.br>

e-mail: pgecologia@gmail.com