



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO SOCIEDADE, NATUREZA E
DESENVOLVIMENTO**

AVNER BRASILEIRO DOS SANTOS GASPAR

**INDICADORES FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS EM SOLOS DE
ECOSSISTEMA DE VÁRZEA NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL.**

**SANTARÉM-PA
2024**

AVNER BRASILEIRO DOS SANTOS GASPAR

**INDICADORES FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS EM SOLOS DE
ECOSSISTEMA DE VÁRZEA NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL.**

Tese apresentada ao Programa Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento da Universidade Federal do Oeste do Pará, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Linha de Pesquisa: Impactos ambientais e sociais da mudança do uso da terra na Amazônia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo da Silva.

Coorientadora: Iolanda Maria Soares Reis

**SANTARÉM
2024**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

- G249i Gaspar, Avner Brasileiro dos Santos
Indicadores físicos, químicos e biológicos em solos de ecossistema de várzea na Amazônia Oriental, Brasil./ Avner Brasileiro dos Santos Gaspar. - Santarém, 2024.
145 p. : il.
Inclui bibliografias.
- Orientador: Rodrigo da Silva.
Coorientadora: Iolanda Maria Soares Reis.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e Inovação Tecnológica, Programa de Pós-Graduação Sociedade, Natureza e Desenvolvimento.
1. Fertilidade do solo. 2. Sazonalidade. 3. Planícies de inundação. 4. Microbiologia do solo. 5. Agricultura de várzea. 6. Qualidade do solo. I. Silva, Rodrigo da, *orient.* II. Reis, Iolanda Maria Soares, *coorient.* III. Título.


CDD: 23 ed. 631.4209811

AVNER BRASILEIRO DOS SANTOS GASPAR


**INDICADORES FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS EM SOLOS DE
ECOSSISTEMA DE VÁRZEA NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL.**

Tese apresentada como quesito parcial para como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais, ao Programa Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento da Universidade Federal do Oeste do Pará.


Conceito: Aprovado
Data de Defesa: 21/06/2024
Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO DA SILVA**
Data: 01/07/2024 11:58:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Rodrigo da Silva. PPGSND/UFOPA (Orientador/ Presidente)

Documento assinado digitalmente
 **IOLANDA MARIA SOARES REIS**
Data: 05/07/2024 09:34:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dra. Iolanda Maria Soares Reis – IBEF/ UFOPA (Coorientadora)

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO ALMEIDA VIEIRA**
Data: 02/07/2024 09:11:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Thiago Almeida Vieira – PPGSND/UFOPA (1º Examinador)

Documento assinado digitalmente
 **RAPHAEL PABLO TAPAJOS SILVA**
Data: 04/07/2024 17:50:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Raphael Pablo Tapajós Silva – PPGRNA/UFOPA (2º Examinador)

Documento assinado digitalmente
 **WILDERCLAY BARRETO MACHADO**
Data: 04/07/2024 13:49:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wilderclay Barreto Machado – IEG/ UFOPA (3º Examinador)

Documento assinado digitalmente
 **IVANILDO AMORIM DE OLIVEIRA**
Data: 04/07/2024 10:54:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Ivanildo Amorim de Oliveira – IFRO (4º Examinador- Externo)




UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIEDADE, NATUREZA E DESENVOLVIMENTO

ATA DE DEFESA DE TESE


Aos vinte e um dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte quatro, às 9 horas, utilizando a plataforma virtual google meeting <https://meet.google.com/ost-jkiz-win>, em secção publica, instalou-se a banca de defesa de Tese de Doutorado do discente AVNER BRASILEIRO DOS SANTOS GASPAS do PPGSND/UFOPA. A banca examinadora foi composta pelo Prof. Dr. Rodrigo da Silva, PPGSND/UFOPA, orientador e presidente da banca, e pelo Prof. Dr. Ivanildo Amorin de Oliveira do Instituto Federal de Rondônia (examinador externo), pelo Prof. Dr. Raphael Pablo Tapajós da Silva (examinador externo), pelo Prof. Dr. Wilderclay Barreto Machado (examinador externo), pelo Prof. Dr. Thiago Almeida Vieira (examinador interno), e pela Profa. Dra. Iolanda Reis, (Coorientador). Deu-se início à secção, por parte do Presidente, que, após apresentar e agradecer os membros da e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou ao candidato que iniciasse a apresentação da tese, intitulada "INDICADORES FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS EM SOLOS DE ECOSSISTEMA DE VÁRZEA NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL.", informando ao discente que possui de 30 a 60 minutos para a apresentação. Concluída a exposição, o presidente da banca, passou a palavra a examinador externa, Dr. Ivanildo Amorin de Oliveira, para arguir o candidato e proferir seu parecer, e, em seguida, aos professores examinadores Wilderclay Machado, Raphael Tapajós e por fim o Prof. Thiago Vieira, para que fizessem o mesmo, nesta ordem. Por unanimidade, a Banca proferiu parecer favorável pela **aprovação** do candidato. Após o término das arguições o presidente da banca passou a palavra para a Coorientadora do candidato, Profa. Iolanda Reis e em seguida para o candidato proferir suas considerações finais. Ficou estabelecido que a versão final da tese deverá ser entregue ao programa, no prazo de trinta dias após a defesa, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora. Por fim, o presidente deu por encerrada a presente secção publica de defesa de tese de doutorado, declarando o candidato Avner Brasileiro dos Santos Gaspar **aprovado**, conforme as normas vigentes do PPGSND e UFOPA. Nada mais havendo por constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora, Presidente da Banca e Doutorando. Santarém (PA), vigésimo primeiro dia do mês de junho do ano de dois mil e vinte e quatro, às treze horas.

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO DA SILVA**
Data: 25/06/2024 09:32:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Rodrigo da Silva
Orientador - Presidente

Documento assinado digitalmente
 **IVANILDO AMORIM DE OLIVEIRA**
Data: 25/06/2024 11:10:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Ivanildo Amorin de Oliveira
Instituto Federal de Rondônia - IFRO

Documento assinado digitalmente
 **WILDERCLAY BARRETO MACHADO**
Data: 26/06/2024 04:13:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Wilderclay Barreto Machado
Coordenador BCA - IEG/UFOPA

Documento assinado digitalmente
 **RAPHAEL PABLO TAPAJÓS SILVA**
Data: 25/06/2024 21:00:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Rapahel Pablo Tapajós da Silva
PPGRNA - IEG/UFOPA

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO ALMEIDA VIEIRA**
Data: 26/06/2024 11:13:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Thiago Almeida Vieira
PPGSND - IBEF/UFOPA

Documento assinado digitalmente
 **IOLANDA MARIA SOARES REIS**
Data: 26/06/2024 11:35:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Iolanda Reis
Coorientadora IBEF/UFOPA

Documento assinado digitalmente
 **AVNER BRASILEIRO DOS SANTOS GASPAS**
Data: 26/06/2024 06:10:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avner Brasileiro dos Santos Gaspar
Discente PPGSND/UFOPA

Dedico esta tese aos meus pais, Rosaldina Borges e Valdo Gaspar cuja fé inabalável e apoio constante me inspiraram a seguir meus sonhos. A vocês, que me ensinaram o valor da educação e do esforço, minha eterna gratidão. A minha esposa Leidiely Ghizoni, por seu amor, paciência e compreensão durante todo este processo. Seu apoio foi fundamental para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTO

A conclusão desta tese só foi possível graças ao apoio e contribuição de muitas pessoas e instituições, às quais gostaria de expressar minha mais profunda gratidão. Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Rodrigo da Silva, e à minha coorientadora, Iolanda Reis, por suas incansáveis orientações, paciência e dedicação ao longo de todo o processo. Suas valiosas sugestões e conhecimento aprofundado foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Sou grato aos meus colegas de pesquisa e amigos de turma pelo apoio moral, pelas discussões intelectualmente estimulantes e pelo encorajamento constante. A colaboração e camaradagem de vocês foram essenciais para superar os desafios enfrentados durante esta jornada. Agradeço também à Universidade Federal do Oeste do Pará pela infraestrutura e recursos fornecidos, que foram indispensáveis para a realização desta pesquisa. Um agradecimento especial a toda a equipe da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento pelo suporte técnico e administrativo.

Não poderia deixar de mencionar minha família, que foi meu pilar de suporte emocional. Agradeço aos meus pais e irmãs, por sempre acreditarem em mim e me incentivarem a seguir em frente, e a esposa pelo amor e paciência ao longo de todos esses anos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Sem o apoio de vocês, esta tese não teria sido possível.

Muito obrigado(a) a todos!

"Não importa quão devagar você vá, desde que você não pare."

(Confúcio)

RESUMO

Os ecossistemas de várzea são periodicamente enriquecidos pela deposição de sedimentos durante inundações sazonais ou de maré, resultando em fertilidade do solo relativamente maior que nas terras não-inundadas ou “terra-firme”, apesar de a várzea apresentar um solo fértil, em virtude do processo de sedimentação, existem fatores limitantes neste ambiente, como: a sazonalidade das águas, portanto, o objetivo neste trabalho foi analisar características, dinâmica e qualidade dos indicadores químicos, físicos e biológicos do solo em função do regime de inundação da floresta de várzea. Partindo da hipótese que o regime de inundação gera impactos na integridade dos solos do ecossistema de várzea, foram analisadas amostras de áreas de floresta de várzea da calha do rio Amazonas, em diferentes estações sazonais. A partir meio da análise multivariada de dados, avaliou-se qualitativamente as características do solo em cada estação sazonal, além de verificar as variáveis que mais estão relacionadas com cada uma dessas estações. Esta tese está dividida em capítulos, a saber: **Capítulo I** – É apresentado a fundamentação teórica da tese, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre as principais características biogeoquímica dos solos de várzea e os indicadores de qualidade de solo; **Capítulo II** – Caracterização dos indicadores químicos e granulometria em solos de florestas de várzea na Amazônia oriental, a área de estudo compreendeu a área várzea na calha do rio Amazonas, onde foram coletadas amostras em diferentes pontos do trecho que compreende o município de Santarém e Gurupá no estado do Pará; **Capítulo III** – Avaliação dos indicadores físico, químico e biológico de qualidade do solo em agroecossistemas de várzea com diferentes manejo no município de Santarém-PA, amostras foram coletadas nas comunidades Piracaera de baixo, Pixuna do tapará, Costa do Aritapera e Arapixuna que tem sua atividade agrícola concentrada no período de baixa das águas. **Capítulo IV**- Avaliou a dinâmica, interação e aporte dos indicadores físicos, químicos e biológicos de solos em função do regime de inundação na floresta de várzea na mesorregião do baixo Amazonas e para análise da dinâmica dos indicadores as amostras de solo foram coletadas, entre agosto de 2020 até julho de 2022, em um fragmento de floresta de várzea de aproximadamente 50.000m² na comunidade de Arapixuna, Santarém-PA. Estudar os indicadores de qualidade do solo é fundamental para o monitoramento ambiental, além de direcionar o manejo e uso sustentável do solo.

Palavras chaves: fertilidade do solo, sazonalidade, planícies de inundação, microbiologia do solo, agricultura de várzea, qualidade do solo.

ABSTRACT

Floodplain ecosystems are periodically enriched by the deposition of sediments during seasonal or tidal floods, resulting in relatively higher soil fertility compared to non-flooded lands or "terra firme." Despite the floodplain having fertile soil due to the sedimentation process, there are limiting factors in this environment, such as the seasonality of the waters. Therefore, the objective of this study was to analyze the characteristics, dynamics, and quality of the chemical, physical, and biological soil indicators in relation to the flooding regime of the floodplain forest. Based on the hypothesis that the flooding regime impacts the integrity of the floodplain ecosystem soils, samples from floodplain forest areas along the Amazon River were analyzed during different seasonal periods. Through multivariate data analysis, the soil characteristics in each seasonal period were qualitatively evaluated, as well as the variables most related to each of these periods. This thesis is divided into chapters, namely: Chapter I - where the theoretical foundation of the thesis is presented, including a bibliographic survey on the main biogeochemical characteristics of floodplain soils and soil quality indicators; Chapter II - Characterization of chemical indicators and granulometry in floodplain forest soils in the eastern Amazon, with the study area comprising the floodplain along the Amazon River, where samples were collected at different points between the municipalities of Santarém and Gurupá in the state of Pará; Chapter III - Evaluation of physical, chemical, and biological soil quality indicators in floodplain agroecosystems with different management practices in the municipality of Santarém, PA, with samples collected in the communities of Piracão de Baixo, Pixuna do Tapaná, Costa do Aritaperá, and Arapixuna, where agricultural activity is concentrated during the low water period; Chapter IV - Evaluation of the dynamics, interaction, and contribution of physical, chemical, and biological soil indicators in relation to the flooding regime in the floodplain forest in the mesoregion of the lower Amazon, with soil samples collected from August 2020 to July 2022 in a floodplain forest fragment of approximately 50,000 m² in the community of Arapixuna, Santarém, PA. Studying soil quality indicators is fundamental for environmental monitoring, as well as guiding the management and sustainable use of soil.

Keywords: soil fertility, seasonality, floodplains, soil microbiology, floodplain agriculture, soil quality

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO GERAL	10
2-	CAPITULO I: REVISÃO DE LITERATURA	12
	2.1- Características dos ecossistemas de várzea	12
	2.1.1- Vegetação.....	13
	2.1.2- Clima e hidrologia.....	13
	2.1.3- Solos de várzea	15
	2.1.4- Uso e ocupação de solos de várzea	16
	2.2- Serviços ecossistêmicos do solo	17
	2.3- Indicadores de qualidade do solo.....	19
	2.3.1- Indicadores químico	22
	2.3.2- Indicadores físicos	26
	2.3.3- Indicadores biológicos	27
3-	HIPOTESES	32
4-	OBJETIVOS	32
	2.1- Objetivo Geral.....	32
	2.2- Objetivos específicos	32
5-	REFERÊNCIAS	33

CAPÍTULO II: INDICADORES QUÍMICOS E GRANULOMETRIA EM SOLOS DE FLORESTA DE VÁRZEA NA AMAZÔNIA ORIENTAL.

1	INTRODUÇÃO	45
2	MATERIAL E MÉTODOS	46
	2.1- Área de estudo	46
	2.2- - Coleta e análise do solo	47
	2.3- Análise dos dados	48
3-	RESULTADOS	49
	3.1 Avaliação das análises descritivas dos atributos químicos e granulométricos dos solos de várzea e terra firme	49
	3.2 Qualidade de solos de várzea e terras firme	52
	3.3 Comparação das propriedades do solo de várzea e terra firme	53
	3.4 Análise exploratória multivariada de propriedades químicas e texturais de solos de várzea e terras altas	54
	3.5 Análise espacial de atributos químicos e físicos de solo em floresta de várzea na calha do rio amazonas	56
4.	DISCUSSÃO	59
5.	CONCLUSÃO	61
6.	REFERÊNCIAS	62

CAPÍTULO III: - ANÁLISE DA QUALIDADE DO SOLO EM AGROECOSSISTEMA DE VÁRZEA COM DIFERENTES USO E MANEJO NO MUNICÍPIO DE SANTARÉM-PA, BRASIL.

1.	INTRODUÇÃO	69
2.	MATERIAL E MÉTODOS	70
	2.1- Área de estudo	70

2.2- Diagnostico das áreas	72
2.3-Coleta e análise da qualidade do solo	72
2.4- Análise dos dados	73
3. RESULTADOS	74
3.1 Análises descritivas e análises de variância dos atributos de solo de várzea.....	74
3.2- Análise de multivariada dos indicadores de qualidade do solo.....	75
4. DISCUSSÃO	80
CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS	82

CAPÍTULO IV- DINÂMICA SAZONAL DE INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM FRAGMENTO DE FLORESTA DE VÁRZEA, AMAZONIA, BRASIL.

1 INTRODUÇÃO.....	88
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	90
2.1- Área de estudo	90
2.2- Clima e períodos hidrológicos	92
2.3 Coleta e análise de solo	93
2.4- Análise dos dados	94
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
3.1 Estatística Descritiva e Análise de Variância dos Indicadores Químicos, Físicos e Biológicos do Solo em Floresta de Várzea em Diferentes Períodos Hidrológicos	95
3.2 Estatística multivariada dos indicadores químicos, físicos e biológicos do solo em Floresta de várzea em diferentes períodos hidrológicos.....	107
CONCLUSÃO	109
REFERÊNCIAS.....	110

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
----------------------------------	------------

ANEXO I- CAPÍTULO I PUBLICADO NA REVISTA AFRICAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH	121
------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

ANEXO II- GRÁFICOS DE ÍNDICE DE MORAN E MAPAS INTERPOLADOS KRIGAGEM.....	141
---------------------------------------------------------------------------------	------------

1- INTRODUÇÃO GERAL

A Amazônia é o maior ecossistema de floresta tropical e sua alta diversidade pode ser explicada por fatores ecológicos, modelos ambientais e paleontológicos (SÁ & CARVALHO, 2017), as florestas localizadas ao longo de rios de águas brancas na região amazônica, conhecidas como florestas de várzea, representam o tipo mais extenso de floresta inundada na América do Sul, cobrindo aproximadamente 180.000 km² da bacia amazônica (BAYLEY E PETRERE, 1989). Os rios de águas brancas se originam nos Andes geologicamente jovens ou nas regiões pré-andinas são definidos por paisagens facilmente erodíveis (RÄSÄNEN ET AL. 1995) que contribuem com grandes quantidades de sedimentos em suspensão ricos em nutrientes para os rios e devido ao influxo sazonal de nutrientes, as florestas de várzea são eutróficas e permanecem excepcionalmente produtivas (JUNK, 2013).

Ecossistemas de várzea são periodicamente enriquecidos pela deposição de sedimentos durante inundações sazonais ou de maré, resultando em fertilidade do solo relativamente maior que nas terras não-inundadas ou “terra-firme”, apesar de a várzea apresentar um solo fértil, em virtude do processo de sedimentação, existem fatores limitantes neste ambiente, como: a sazonalidade das águas (MAGALHÃES & GOMES, 2013). Estas inundações são periódicas e ocorrem durante um período do ano, que dura cerca de 4 a 5 meses, e caracterizam “estações climáticas” no ecossistema de várzea: enchente (subida das águas), cheia (nível máximo das águas), vazante (descida das águas) e seca (nível mais baixo das águas) (JUNK, 2013; RIBEIRO & CARNEIRO, 2016).

Os solos de várzea são desenvolvidos nas planícies de inundação, sobre sedimentos depositados pelas águas dos rios. Estes sedimentos proporcionam composição granulométrica e química e biológica diversificada, com variação de características entre um local e outro, causando alterações na paisagem (RIBEIRO & CARNEIRO, 2016). Segundo Junk et.al. (2020), as áreas alagáveis cobrem extensos trechos ao longo dos grandes rios no mundo inteiro exercendo funções importantes na paisagem como elas tamponar as flutuações do nível de água dos rios, absorver material em solução e suspensão, produzir e reciclar material orgânico e liberar parte dele para o canal dos rios, interagir com a atmosfera por meio dos ciclos de água, carbono, nitrogênio e muitos componentes orgânicos voláteis, e servir como habitat para muitas plantas e animais aquáticos e terrestres, alguns deles endêmicos.

O regime de inundação garante que os solos do ecossistema de várzea apresentem altos níveis de fertilidade, devido às deposições de sedimentos trazidos pelas águas no período de inundação. Contudo a fertilidade dos solos varia espacialmente, refletindo fatores como regimes de maré, nível de água, diferenciação no relevo local, manejo ou uso e distância do canal principal, além do regime dos rios nessas áreas, assim os atributos químicos, físicos e biológicos dos solos que compõe as margens dos rios, podem variar de acordo com as estações climáticas (OLIVEIRA et al., 2000). Ferreira, (2016), destaca que características das águas que compõem os rios agregam características biogeoquímicas específicas do ambiente de formação, com diferente quantidade de material em suspensão (MES), pH, alcalinidade e quantidade de nutrientes.

As mudanças no uso da terra são uma grande pressão sobre os ecossistemas ribeirinhos (HJÄLTÉN et al., 2016). A conversão da vegetação natural em pastagem e agricultura nas áreas ribeirinhas pode influenciar negativamente as funções e serviços do ecossistema por meio de mudanças na estrutura da vegetação, bem como na estrutura e qualidade dos solos e corpos d'água (DA SILVA et al., 2017 ; SOUZA et al. , 2013).

Neste sentido, avaliar os atributos químicos, físicos e biológico ao longo da sazonalidade do rio, é fundamental, pois são importantes indicadores de qualidade do solo, possibilitando gerar informações que podem ajudar na manutenção e monitoramento ambiental deste recurso natural. A hipótese do estudo é de que o regime de inundação gera impactos na integridade dos solos dos ecossistemas de várzea, afetando os fluxos de serviços por eles prestados como estoque de carbono no solo, fertilidade do solo e, conseqüentemente, a qualidade dos solos agricultáveis pelas populações ribeirinhas.

Assim, o objetivo deste estudo é avaliar, a dinâmica dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo em função do regime de inundação no ecossistema de várzea na Amazônia oriental, Brasil. Portanto, para atingir esse objetivo foi necessária uma pesquisa voltada para a compreensão da dinâmica e multifuncionalidade do ecossistema em um contexto de paisagem, essencial para avaliar os impactos das perturbações nos ecossistemas naturais e nos sistemas agrícolas (BARKMANN et al., 2004; BRADSHAW & SYKES, 2014).

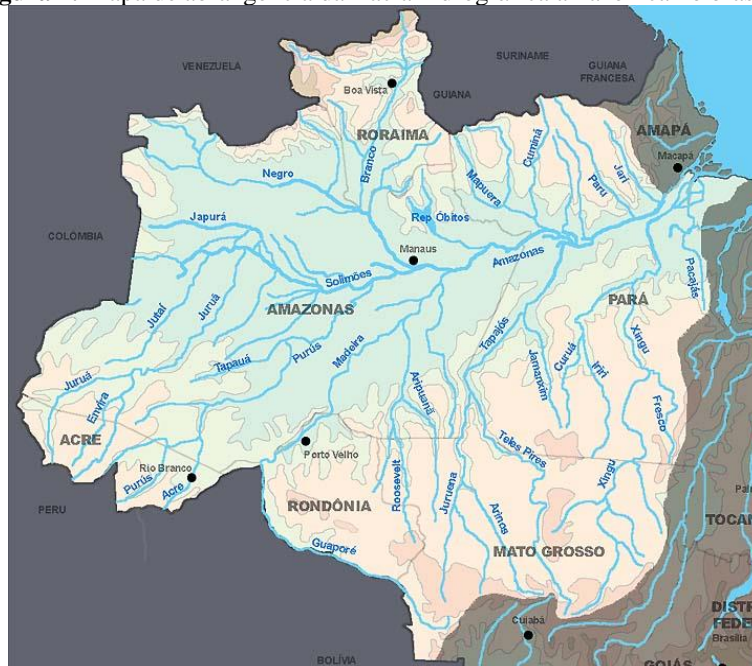
2- REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - Características dos ecossistemas de várzea

Na Amazônia as áreas de várzeas começam no sopé do andes indo até a ilha do marajó, se estendendo cerca de 5000 km ao longo do rio Solimões-amazonas e seus tributários e de água-branca. Ao longo de todo esse trecho de áreas de várzea, há alterações na amplitude do pulso de inundação, morfologia da várzea, cobertura vegetal, a densidade da população humana e o tipo do aproveitamento dos recursos naturais além das consideráveis diferenças entre si em respeito aos parâmetros hidrológicos, hidro morfológicos, geoquímicos e biológicos (JUNK et al., 2020).

A planície Amazônica, segundo Falest, (1967), pode ser dividida em duas áreas distintas: área de "terra firme" de formação terciária e planície de inundação propriamente dita, denominada de várzea ou terreno quaternário recente. As várzeas do estuário amazônico (Figura 1) são áreas que margeiam os rios, lagos, furos e igarapés (ABREU et al., 2014) e estão concentradas nas planícies de inundação, cujos sedimentos começaram a se depositar no Holoceno durante os últimos 10.000 anos (FERREIRA et al., 2005).

Figura 1. Mapa de abrangência da Bacia hidrográfica amazônica no brasil.



Fonte: <https://meioambiente.culturamix.com/ecologia/complexo-regional-da-amazonia>

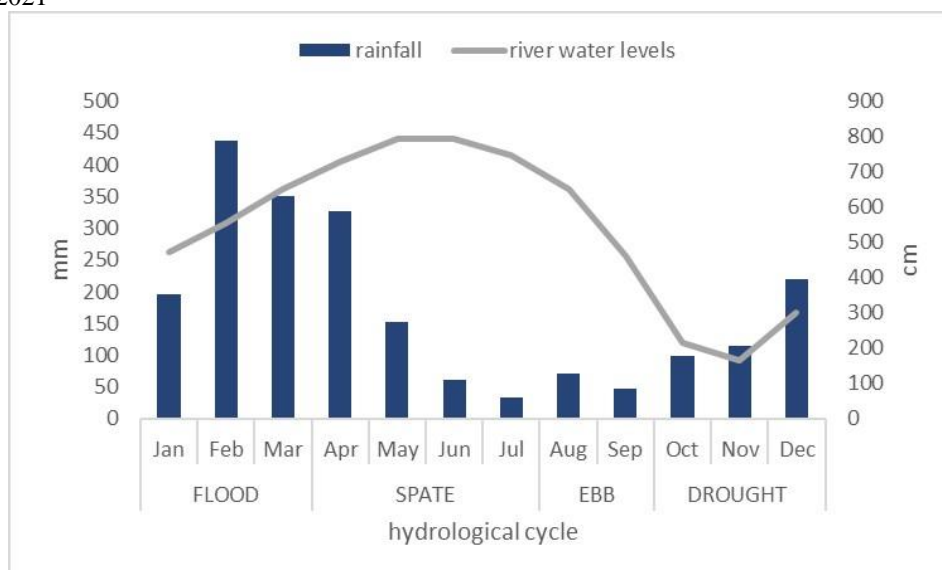
2.1.1 Vegetação

A composição florísticas da vegetação nos ecossistemas aquáticos e terrestres em ambiente de várzeas, são determinados pelas características físicas e químicas da água e dos solos, o clima e a hidrologia (JUNK et al. 2020.). Segundo Wittmann & Junk, 2003, a dinâmica hidrológica e geomorfológica dos rios resulta em um mosaico de habitats e na representação de poucas famílias e espécies de plantas, que conseguem sobreviver e disseminar de modo a dominar a paisagem de varzea (SANTOS; JARDIM, 2006), e isso ocorre devido as espécies, que habitam as areas inundáveis, sincronizarem seus processos ecológicos de reprodução e dispersão de sementes, com as inundações sazonais (PAROLIN, 2009), além de garantir a permanência de certas espécies na floresta com o alto investimento em indivíduos jovens, essenciais para a colonização dos ecossistemas de varzea (BATISTA; JARDIM, 2013).

2.1.2 Clima e Hidrologia

O principal fator natural de perturbação, em ambientes de várzea, é o pulso de inundação que influencia na dispersão de sementes, germinação, estabelecimento das plântulas e, conseqüentemente, interferindo na estrutura e composição do povoamento florestal (NILSSON et al., 2010; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ et al., 2010; GEE; KING; KEIM, 2014), portanto, a variação do nível das águas (Figura 2) determina o aspecto físico do sistema bem como o comportamento da sua biota, (SIOLI ,1984), além de causar mudanças na química do solo (FREIRE & NOVAIS, 1980).

Figura 2. Ciclo hidrológico da várzea amazônica na região de baixo amazonas para o período 2018-2021



Fonte: autores, 2022. (dados: Agência Nacional de Águas-ANA)

Segundo a classificação de áreas úmidas, proposta por Junk et al. (2020), a região amazônica esta categorizada, como área de pulso monomodal previsível de alta amplitude e longa duração (Tabela 1), portanto, o pulso de inundação é a força que determina as estruturas e as funções de Áreas úmidas (AU) na Amazônia e está sujeito a mudanças, entre as áreas, quanto a amplitude, duração frequência e previsibilidade, fazendo com que tais áreas variem significativamente em relação a hidrologia, química da água, fertilidade do solo, cobertura vegetal, densidade de espécies de plantas e animais. (JUNK et al., 2011).

Tabela 1: Classificação das áreas úmidas (AUs) brasileiras de acordo com sua situação hidrológica

AUs sem pulso de inundação			Tipo de AU afetada
			Turfeiras, veredas, campos úmidos, buritizais, carnaubais
AUs com pulso de inundação			Tipo de AU afetada
Previsibilidade	Frequência	Amplitude	
previsível	Monomodal	alta	AUs ao longo de grandes rios (p. ex., várzeas e igapós amazônicos)
previsível	Monomodal	baixa	Grandes AUs Inter fluviais, AUs de baixa amplitude conectadas a alguns rios (p. ex., Pantanal), AUs em dunas costeiras (p. ex., Lençóis Maranhenses)
previsível	Polimodal	Variável	AUs costeiras com maré
imprevisível	Polimodal	variável	AUs ao longo de pequenos rios, em pequenas depressões e em dunas costeiras
imprevisível	Multianual	baixa	AUs no Nordeste semiárido
variável	variável	variável	AUs dentro e ao redor de corpos de água com flutuação de nível da água influenciada pelo homem

Fonte: Adaptado de JUNK et al. 2020.

2.1.3 Solos de várzea

Os solos amazônicos de terra firme em sua maioria de origem geológica antiga com uma avançada decomposição mineral, resultam em solos pobre em nutrientes e uma baixa produtividade natural, considerando que a absorção e liberação das substâncias químicas pelas plantas e a composição química das formações rochosas originais influenciam qualidade química da água e dos solos. (JUNK et al., 2020).

Segundo Teixeira et al. (2019), nas várzeas amazônicas predominam solos jovens, em alguns casos, apenas sedimentos em processo incipiente de pedogênese, portanto, solos de várzeas recente são mais férteis, porque eles são provenientes da carga em suspensão do Rio Amazonas, que contém montmorilonita com alta capacidade de intercâmbio de íons e ilita, que libera potássio durante a decomposição (LIMA et al. 2006) (TEIXEIRA et al 2006

Gleissolos Háplicos e Neossolos Flúvico são solos predominantes nas várzeas, correspondendo respectivamente a 6,99% e 0,76 % das terras da Amazônia Legal e apresentam a sua gênese relacionada a processos hidromórficos (TEIXEIRA et al., 2019). O Sistema brasileiro de Classificação do Solo-SiBCS define os Gleissolos Háplicos como solos hidromórficos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte glei, que pode ser um horizonte subsuperficial (C, B ou E) ou superficial A e o horizonte superficial apresenta cores desde cinzentas (Figura 3.) até pretas, espessura normalmente entre 10 e 50 cm e teores médios a altos de carbono orgânico (EMBRAPA, 2006).

Figura 3. Perfil de gleissolo hapico na região de Santarém-PA



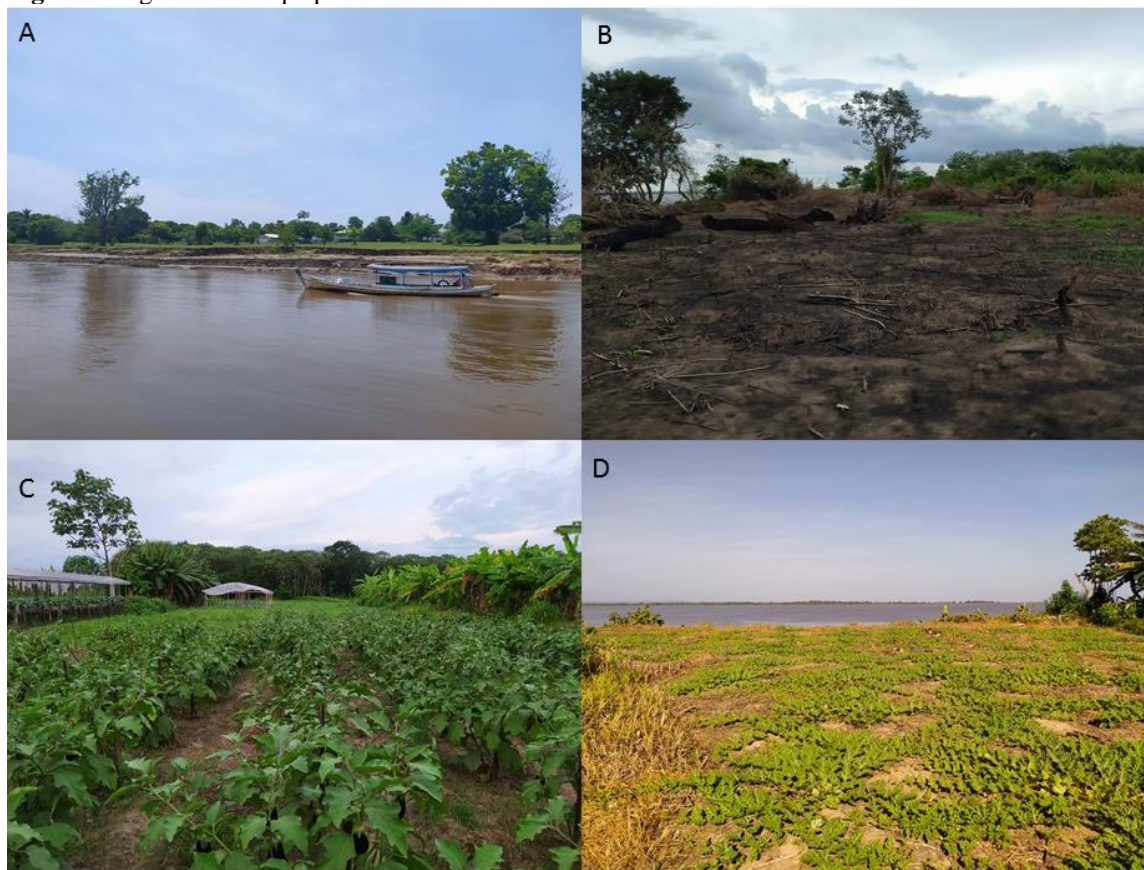
Fonte: autores

2.1.4- Uso e ocupação de solos de várzea.

As populações ribeirinhas são, em sua maioria, dependentes dos recursos da várzea. Suas comunidades estão inseridas dentro da planície de inundação e, portanto, atividades de extração de recursos como madeira e outros produtos florestais, agricultura de pequena escala, produção animal, pecuária e pesca, sustentam seus meios de subsistência (MCGRATH et al., 1993).

As características desse ambiente, como a elevada fertilidade natural dos solos e proximidade dos rios e lagos piscosos, que servem como principal modalidade de transporte, favoreceram a concentração humana desde os tempos pré-históricos, indicada pela elevada concentração de sítios arqueológicos próximos a esses ambientes (KERN et al., 2010). Graças à fertilização natural, os agricultores que habitam a região de várzea costumam utilizar consecutivamente (“replantar”) uma mesma área por um período que variava de 1 a 15 anos consecutivos, por 6,5 anos em média (RICHERS, 2010).

Figura 4: Agricultura de pequena escala na várzea de Santarém-PA



Fonte: Autores

2.2 Serviços ecossistêmicos do solo

O solo é responsável por diversos serviços ecossistêmicos, muitos dos quais são fundamentais para a manutenção da biodiversidade (Figure 5) (FAO, 2014). Daily et al., (1997; 2009) definiu serviços ecossistêmicos como: “os benefícios fornecidos às sociedades humanas por ecossistemas naturais”.

A capacidade do solo de fornecer serviços ecossistêmicos, é alterada, segundo a Prado et al (2016) pela a supressão de florestas e conversão em terras agrícolas aliada as práticas inadequadas de manejo, o uso indiscriminado de agrotóxicos, causando impactos em ecossistemas aquáticos e terrestre, e como consequência, à degradação do solo, poluição das águas, redução dos índices de produtividade e perda da biodiversidade, além de impactos relacionados às mudanças climáticas, como a emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Figura 5: Serviços ambientais prestados pelo solo



Fonte: Fao, 2014

A compreensão da dinâmica e multifuncionalidade de ecossistema e agroecossistemas, conseqüentemente, os serviços ecossistêmicos prestados por eles, são essenciais para avaliar os impactos das mudanças (BRADSHAW & SYKES, 2014), além disso, as pesquisas com serviços ecossistêmicos ajudam na tomada de decisões para problemas reais enfrentados pela sociedade e pelos ecossistemas (Daily et al., 2009). Nesse sentido, Blum (2005), European Commission (2006), Haygarth & Ritz (2009) e Dominati et al. (2010) propõem uma série de serviços ecossistêmicos derivados das diversas funções desempenhadas pelo solo (Tabela 2).

O sistema solo funciona como uma interface tampão/reactiva/controladora e as funções do solo estão inter-relacionadas, Prado et al. (2016) afirmam que cada função depende da outra para desempenhar seu papel, portanto, a compreensão dessa dinâmica permite que as funções do solo sejam consideradas na avaliação e quantificação do Serviço ecossistêmico.

Tabela 2. Funções do solo e serviços ecossistêmicos.

Serviço	Função do solo	Serviço ecossistêmico
Apoiar	Suporte para vegetação terrestre	Produção primária
	Processos de formação do solo	Formação e renovação do solo
	Armazenamento, ciclagem, processamento de nutrientes e entrega às	Ciclagem de nutrientes

	plantas	
	Estruturas de apoio à ocupação e atividades humanas (por exemplo: habitação, indústria, infraestrutura)	Plataforma
	Habitat para populações residentes e transitórias (um componente vital para habitats terrestres)	Refúgio
Provisão	Retenção e abastecimento de água na paisagem	Armazenamento de água
	Fornecimento de crescimento e produção de plantas	Fornecimento de alimentos, fibras, combustíveis e madeira (biomateriais)
	Fornecimento de materiais de origem	Fornecimento de matérias-primas de origem mineral
	Fonte de materiais e produtos biológicos únicos (biota do solo)	Biodiversidade e recursos genéticos
	Regulação populacional (biota do solo) para controle de pragas, patógenos e doenças	Controle de possíveis pragas e patógenos
Regulamento	Descarte e decomposição de resíduos e poluentes	Ações de reciclagem e remediação
	Filtração e tamponamento da água	Regulação da qualidade da água
	Regulação dos fluxos hidrológicos, amortecimento e moderação do ciclo hidrológico	Regulação do abastecimento de água e controle de inundações e correntes de ar
	Sequestro e acúmulo de carbono, regulação da composição química da atmosfera e processos climáticos	Regulação de GEE atmosférico e regulação climática
	retenção de sedimentos	Controle de erosão
Cultural	Apoio a atividades recreativas	Lazer
	Apoio a atividades não comerciais	Desenvolvimento de experiências e atividades cognitivas, estéticas, educacionais, espirituais e científicas
	Possui registro arqueológico de ocupação terrestre e civilizações	Patrimônio histórico e cultural

Fonte: Adaptado de Haygarth & Ritz (2009) e Dominati et al. (2010).

2.3 Indicadores de qualidade do solo

No solo, existem diversas inter-relações entre os atributos físicos, químicos e biológicos que controlam os processos e os aspectos relacionados à sua variação no tempo e no espaço. Assim, qualquer alteração no solo pode alterar diretamente sua estrutura e sua atividade biológica e, conseqüentemente, sua fertilidade, com reflexos nos agroecossistemas (BROOKES, 1995), podendo promover prejuízos à qualidade do solo e à produtividade das culturas.

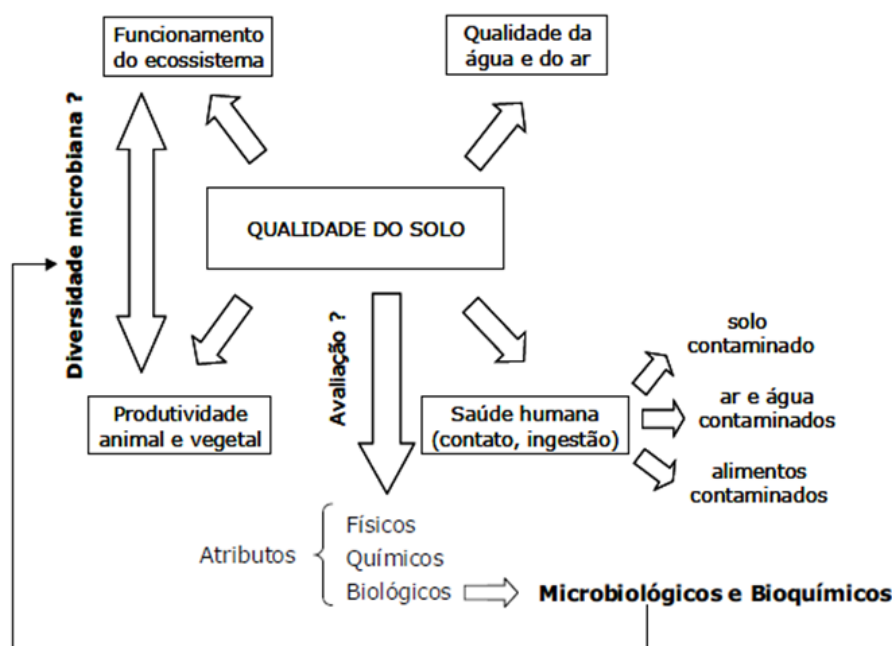
A natureza do solo é moldada por suas propriedades químicas, físicas, biológicas e desempenha um papel fundamental na determinação do crescimento, na composição e produtividade da comunidade vegetal (VAN DER PUTTEN et al., 2013).

Plantas podem influenciar as propriedades do solo por meio da entrada de compostos químicos e matéria orgânica, impactando os processos hidrológicos e as temperaturas da superfície do solo, bem como fornecendo habitats e/ou recursos para organismos microscópicos e macroscópicos. Segundo, Deng et al. (2018), as respostas da vegetação podem induzir o desenvolvimento do solo e determinar a sucessão e o desenvolvimento da comunidade microbiana do solo.

A vegetação pode alterar direta ou indiretamente as propriedades do solo e a manutenção da fertilidade do solo (WANG et al., 2011; DENG et al., 2018), devido à estreita relação entre plantas e microrganismos, afetando assim a comunidade microbiana do solo e sua estrutura, atividade e função (FROUZ et al., 2016; WANG et al., 2019). Os microrganismos do solo são fatores importantes nas interações planta-solo (ZABALOY et al., 2016), participando e regulando muitos processos ecológicos do solo.

A qualidade do solo é definida pela sua capacidade em desempenhar funções, dentro dos limites de ecossistemas naturais ou manejados, para sustentar a produtividade das plantas e dos animais, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar, e dar suporte à saúde e habitação humanas (Figura 6).

Figura 6: Qualidade do solo e os atributos utilizados para sua Quantificação.

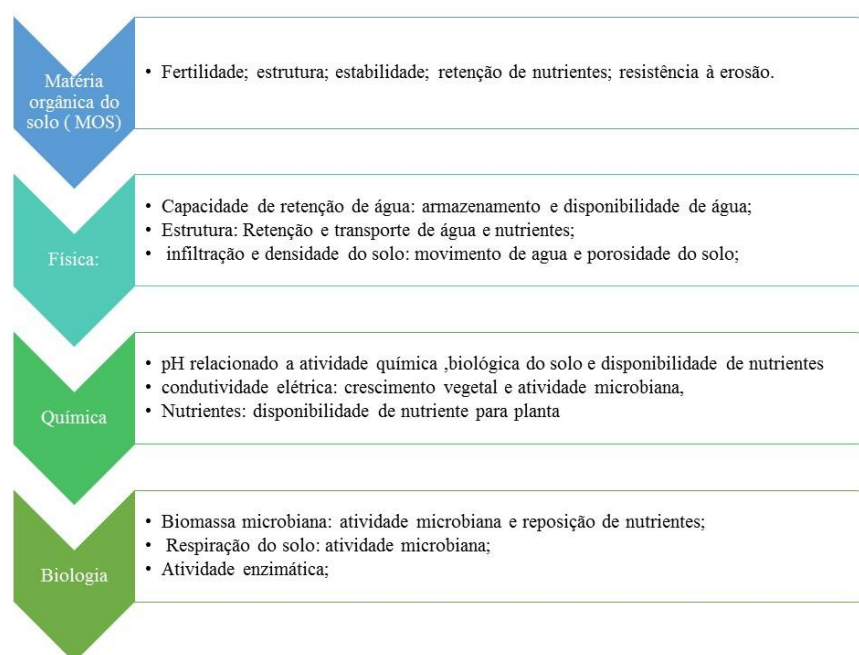


Fonte: Melloni, 2008.

A qualidade do solo pode ser medida por meio da quantificação de alguns atributos físicos, químicos e biológicos (Figura 7), que possibilitem o monitoramento de mudanças, a médio e longo prazo (no estado de qualidade desse solo (DORAN, 1994).

Portanto um conjunto básico de indicadores foi proposto por Doran & Parkin (1994) e Larson & Pierce (1994), de ordem biológica, física e química: textura, profundidade de solo e de raízes, densidade do solo, infiltração de água no solo, capacidade de armazenamento e retenção de água, conteúdo de água no solo, temperatura do solo, teores de C e N orgânico total, pH, condutividade elétrica, teores de N mineral (NH_4^+ e NO_3^-), P, K, C e N da biomassa microbiana, N potencialmente mineralizável, respiração do solo, C na biomassa em relação ao C orgânico total e respiração microbiana em relação à biomassa (ARAÚJO et al., 2012).

Figura 7: Indicadores de qualidade do solo



Fonte: adaptado de CHERUBIN et al, 2016; DORAN & PARKIN (1994); E LARSON & PIERCE (1994)

Segundo Vezzani & Mielniczuk (2009) esses indicadores devem estar relacionados com cinco funções do solo: habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de água; habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de elementos químicos; promover e sustentar o desenvolvimento de raízes; manter um habitat biológico adequado; e responder ao manejo, resistindo à degradação. Portanto, uma crescente necessidade de avaliar a

qualidade do solo abordando o solo como um sistema complexo, com inúmeras relações entre os ecossistemas e componentes do sistema solo (VEZZANI & MIELNICZUK, 2011).

2..3.1 Indicadores Químicos

Os indicadores químicos do solo estão relacionados com as variáveis: teor de matéria orgânica do solo, acidez do solo, o conteúdo de nutrientes, elementos fitotóxicos (Al^{3+}) e determinadas relações como a saturação de bases (V%) e de alumínio (m%) (ARAÚJO et al., 2012).

Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é todo material orgânico contido no solo, incluindo a liteira, as frações leves, a biomassa microbiana, substâncias orgânicas solúveis em água e a matéria orgânica estabilizada (STEVENSON, 1994; ARAÚJO et al. 2012), controla os indicadores chave do solo, aqueles associados à disponibilidade de nutrientes como um todo; à capacidade de retenção hídrica, e à fertilidade que a torna importante, além de seu papel no ciclo global de C, uma vez que os processos de decomposição nos solos são as principais fontes ou sumidouros de importantes GEE (PRIMIERY et al., 2017; PEREIRA et al., 2006).

A MOS é utilizada como indicador da qualidade do solo em virtude de sua suscetibilidade de alteração em relação às práticas de manejo e por correlacionar-se com a maioria das propriedades do solo (MIELNICKZUK, 1999), além disso, a MOS para se comportar como fonte ou sumidouro de CO₂ permitindo estimar o modo como os fluxos de C do solo são alterados pelo clima, vegetação, mudança no uso da terra e o tempo de residência de C na matéria orgânica do solo (PRIMIERY et al., 2017).

A decomposição dos resíduos orgânicos e, por conseguinte, o conteúdo da MOS são regulados pelo sistema de manejo adotado, características da comunidade microbiana decompositora, material orgânico e do ambiente onde o processo ocorre, incluindo, nesse caso, as condições edafometeorológicas (BALDOCK e NELSON, 2000)., Existem vários métodos de quantificação da MOS, assim como do C orgânico, um dos métodos mais simples e mais usado para determinar a MOS é pela via seca em mufla por incineração, descrito por Pereira et al.,(2006).

Acidez do solo (pH)

A acidez do solo é um problema significativo que afeta a produção agrícola em diversas regiões do mundo. Esta condição é caracterizada pela presença excessiva de íons hidrogênio (H^+) e íons tóxicos, como alumínio (Al^{3+}) e manganês (Mn^{2+}), que prejudicam o crescimento das plantas e comprometem a qualidade do solo. Diversos fatores contribuem para a acidificação do solo, incluindo a aplicação intensiva de fertilizantes nitrogenados, chuvas ácidas, lixiviação de nutrientes e práticas agrícolas inadequadas. A acidificação do solo reduz a disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo, cálcio e magnésio, e aumenta a toxicidade dos metais, afetando negativamente a saúde das plantas e, conseqüentemente, os rendimentos agrícolas. Além disso, a acidez do solo influencia negativamente a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica, agravando ainda mais os problemas de fertilidade (TUSAR et al., 2023).

Para mitigar os efeitos da acidez do solo, diversas estratégias têm sido adotadas. A calagem, que consiste na aplicação de materiais alcalinos como o calcário, uma prática comum que neutraliza a acidez, eleva o pH do solo e melhora a disponibilidade de nutrientes. Recentemente, o biochar, um tipo de carvão produzido pela pirólise de biomassa, tem sido investigado como uma solução promissora devido às suas propriedades alcalinas e capacidade de melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo. O biochar pode aumentar a capacidade de troca de cátions, o teor de matéria orgânica e a atividade microbiana do solo, além de reduzir a concentração de íons tóxicos. Essas abordagens não apenas ajudam a corrigir a acidez do solo, mas também promovem práticas agrícolas sustentáveis, melhorando a saúde do solo a longo prazo e contribuindo para a segurança alimentar global (TUSAR et al., 2023; HUANG et al., 2023).

Macronutriente e micronutrientes

Os nutrientes do solo, classificados como macronutrientes e micronutrientes, são vitais para o crescimento saudável das plantas, desempenhando funções distintas e essenciais. Os macronutrientes, necessários em grandes quantidades, subdividem-se em primários e secundários. Os macronutrientes primários incluem nitrogênio (N), fósforo (P) e

potássio (K), sendo os mais demandados pelas plantas. Estes nutrientes são cruciais para processos fundamentais como a fotossíntese, o crescimento radicular e a produção de frutos e sementes. Por outro lado, os macronutrientes secundários, como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), são requeridos em menores quantidades, mas continuam a ser essenciais, desempenhando papéis críticos na formação da parede celular e na ativação de enzimas (THAPA et al., 2021).

Os micronutrientes, embora necessários em quantidades menores, são igualmente vitais para o desenvolvimento das plantas. Os principais micronutrientes incluem ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), molibdênio (Mo) e cloro (Cl). Esses nutrientes são essenciais para diversas funções bioquímicas e fisiológicas, como a formação de clorofila, síntese de proteínas e ativação de enzimas (THAPA et al., 2021). A deficiência de qualquer um desses nutrientes pode limitar o crescimento das plantas e reduzir a produtividade das culturas. Por exemplo, a deficiência de F pode causar clorose nas folhas, enquanto a falta de B pode afetar o crescimento das raízes e a qualidade dos frutos. Além disso, o equilíbrio dos micronutrientes no solo pode ser afetado por fatores como o pH do solo e a matéria orgânica, o que influencia diretamente a disponibilidade desses nutrientes para as plantas (DENTON-THOMPSON & SAYER, 2022).

Portanto, para assegurar a saúde e a produtividade das plantas, é essencial gerenciar adequadamente os níveis de macro e micronutrientes no solo. Isso pode ser alcançado por meio da aplicação de fertilizantes balanceados e da implementação de técnicas como a rotação de culturas e a adição de matéria orgânica ao solo. Essas práticas ajudam a melhorar a estrutura do solo e a disponibilizar nutrientes de forma mais eficiente. Garantir que as plantas tenham acesso a todos os nutrientes necessários para um crescimento saudável contribui para uma produção agrícola sustentável e eficiente (DENTON-THOMPSON & SAYER, 2022; THAPA et al., 2021).

Saturação por bases (V%)

A saturação por bases (V%) é uma medida crucial na avaliação da fertilidade do solo, representando a porcentagem da capacidade de troca catiônica (CTC) ocupada por cátions básicos, tais como Ca, Mg, K e Na. Esse índice desempenha um papel fundamental na compreensão da disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas e na qualidade geral

do solo. Altos valores de saturação por bases indicam uma maior disponibilidade de nutrientes básicos, fundamentais para o crescimento das plantas. Valores adequados de saturação por bases promovem uma melhor absorção de nutrientes pelas plantas, contribuindo para o desenvolvimento saudável das culturas (TUSAR et al., 2023; HUANG et al., 2023).

A saturação por bases está intimamente ligada ao pH do solo. Solos com baixa saturação por bases tendem a ser mais ácidos, exigindo correção por meio da calagem para elevar o pH e melhorar a fertilidade. A saturação por bases serve como um indicador da saúde do solo. Solos com alta saturação por bases geralmente apresentam uma estrutura favorável e são menos suscetíveis a problemas como compactação e erosão (HUANG et al., 2023; ENESI et al., 2023).

Segundo Tüsar et al. (2023), vários fatores afetam a saturação por bases. O tipo de solo é um desses fatores, onde solos arenosos tendem a ter menor capacidade de troca catiônica, resultando em uma possível saturação por bases mais baixa em comparação com solos argilosos. As práticas agrícolas também desempenham um papel importante, como a aplicação de fertilizantes, matéria orgânica e corretivos de acidez, que podem aumentar a saturação por bases fornecendo cátions básicos ao solo. O clima também influencia, pois, a lixiviação em áreas de alta pluviosidade pode reduzir a saturação por bases ao remover cátions do solo. Para solos agrícolas, é geralmente recomendado que a saturação por bases esteja entre 50% e 80%, dependendo da cultura específica e das condições do solo. Valores abaixo de 50% podem indicar a necessidade de calagem para corrigir a acidez e melhorar a disponibilidade de nutrientes (TUSAR et al., 2023; HUANG et al., 2023).

Saturação por alumínio

A saturação por Al^{3+} no solo é um fenômeno que ocorre quando a quantidade desse elemento atinge níveis elevados, podendo causar efeitos tóxicos nas plantas. Sendo problemático em solos ácidos, onde sua disponibilidade é aumentada. Em excesso, o Al^{3+} pode causar injúrias as raízes das plantas, reduzindo sua capacidade de absorver água e nutrientes. Kochian et al. (2015) enfatizaram a importância da compreensão dos mecanismos moleculares subjacentes à resistência e toxicidade do Al^{3+} nas plantas, demonstrando que certas espécies desenvolveram adaptações para lidar com o estresse causado por este elemento, como a liberação de compostos orgânicos ácidos que ajudam a neutralizar o Al^{3+}

tóxico no solo. Kopittke et al. (2019), ao investigar os efeitos da saturação de Al^{3+} no solo na absorção de nutrientes pelas plantas, descobriram que o Al^{3+} tóxico pode afetar a absorção de nutrientes essenciais, como P e Ca, resultando em deficiências nutricionais e redução da produtividade.

Portanto, compreender os mecanismos de toxicidade do alumínio no solo e desenvolver estratégias de manejo adequadas, como a aplicação de corretivos de acidez, é crucial para mitigar os efeitos negativos da saturação por alumínio e promover a produtividade sustentável e qualidade do solo.

Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo é uma medida da habilidade do solo de reter e trocar íons positivos (cátions) Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e H^+ . Essa propriedade é fundamental para a fertilidade do solo e sua capacidade de fornecer nutrientes às plantas. A CTC é determinada pela quantidade de argila e matéria orgânica presentes no solo, uma vez que esses componentes possuem cargas negativas em suas superfícies, capazes de atrair e reter cátions. A capacidade do solo de reter nutrientes catiônicos está relacionada à sua textura, composição mineralógica e teor de matéria orgânica. Além disso, a CTC é influenciada por práticas agrícolas, como a adição de fertilizantes e o manejo do solo, conforme descrito por Liu et al. (2020).

2.4.2 Indicadores Físicos

A qualidade física de solos é um importante elemento de sustentabilidade, sendo uma área de estudo em contínua expansão (LAL, 2000; REYNOLDS et al., 2002), já que as propriedades físicas e os processos do solo estão envolvidos no suporte ao crescimento radicular; armazenagem de água e nutrientes, trocas gasosas, assim como as atividades biológicas (ARSHAD et al., 1996). Segundo Araújo et al. (2012), os principais indicadores físicos são: textura; espessura; densidade do solo; resistência à penetração; porosidade; capacidade de retenção d'água; condutividade hidráulica; e estabilidade de agregados.

Textura

Está relacionado as dimensões e características das partículas de solo, e segundo Santos et al. (2018), a textura tem grande influência no comportamento físico-hídrico e químico do solo, e por isso, sua avaliação é de grande importância para o uso e manejo dos solos utilizados para a agricultura. É expressa pela proporção dos componentes granulométricos da fase mineral do solo, areia, silte e argila e a classificação de tamanho de partículas utilizada segue o padrão descritos por Teixeira et al. (2017).

Densidade do solo - D_s (g/cm^3)(kg/dm^3)

A densidade do solo é a relação entre massa do solo e o volume que este ocupa, o aumento na densidade do solo resulta na diminuição da porosidade total, do arejamento e da condutividade hidráulica. A densidade é a propriedade física mais dinâmica e varia em função da textura, de acordo com as condições estruturais do solo, sendo alterada pelo cultivo, pela compressão de máquinas agrícolas, por animais e condições ambientais do meio (ARSHAD et al., 1996).

O processo de compactação do solo pode alterar a estrutura do solo, aumentar a sua densidade, diminuir a porosidade, reduzir a permeabilidade (ar e água) e alterar o padrão de crescimento radicular (BATEY e MCKENZIE, 2006). Ações sucessivas de preparo dos solos de várzeas, ao longo dos anos, podem trazer sérios problemas de drenagem, assim como promover a compactação subsuperficial, dificultando a movimentação da água e a aeração nesses solos (Pauletto et al., 1993). Ocasionalmente, também, aumento na densidade e redução na porosidade total, macroporosidade e agregação do solo (Pauletto et al., 2005; Lima et al., 2008, Bamberg et al., 2009), limitando a produtividade. Os principais métodos de análise de densidade do solo são Método da proveta e o Método do cilindro volumétrico descritos por Teixeira et al. (2017).

2.2.2 Indicadores biológicos

Entre os indicadores biológicos estão incluídos: MOS, a diversidade de espécies, a biomassa microbiana do solo, o N mineralizável, a respiração microbiana do solo que possibilita avaliar a atividade microbiológica, a atividade enzimática e o quociente

metabólico, são importantes tanto no que se refere à ciclagem dos nutrientes, como também na estimativa da capacidade do solo para o crescimento vegetal (ARAÚJO et al., 2012).

Carbono organico total-COT (g kg)

O COT do solo é, particularmente, útil à compreensão da ciclagem da matéria orgânica é também um eficiente indicador da qualidade do solo, pois representa fonte e dreno de nutrientes do ecossistema por meio da mineralização e imobilização.

Carbono da biomassa microbiana- Cmic (mg/g)

O processo de transformação da matéria orgânica com a participação da biomassa microbiana do solo são essenciais para a manutenção da produtividade dos ecossistemas florestais e agrícolas (NEVES et al., 2009), a biomassa microbiana é o compartimento da MOS diretamente influenciado por fatores bióticos e abióticos, de tal forma que mudanças nos sistemas de uso e manejo do solo podem ser detectáveis muito mais rapidamente pela biomassa microbiana e seus metabólitos do que nos teores de C do solo, principalmente devido ao tempo de ciclagem da matéria orgânica (GAMA-RODRIGUES et al., 2008).

A biomassa microbiana é considerada um reservatório de nutrientes e de energia potencialmente disponível para as plantas (JENKINSON & LADD, 1981) e serve como indicador rápido de mudanças no solo e devido a sensibilidade da microbiota a interferências no sistema (GRISI, 1995).

A biomassa microbiana do solo é o componente vivo e mais ativo da MOS (ARAÚJO Et al., 2012). Sua avaliação é útil para obter informações rápidas sobre mudanças nas propriedades orgânicas do solo; detectar variações causadas por cultivos ou por devastação de florestas; medir a regeneração dos solos após a remoção da camada superficial; e avaliar os efeitos de poluentes como metais pesados e pesticidas (FRIGHETTO, 2000).

Segundo Araújo et al., (2012) os métodos mais frequentes utilizados para determinação da biomassa microbiana são fumigação-incubação, fumigação-extração e irradiação com microondas, proposto por JENKINSON e POWLSON (1976), VANCE et al., (1987) e ISLAM & WEIL (1998) respectivamente.

Respiração basal do solo-RBS (mg CO₂/ kg Solo/acumulado)

A respiração do solo é um componente importante do ciclo global do carbono, e uma pequena variação da respiração do solo pode influenciar proeminentemente a concentração atmosférica de CO₂ e o estoque de C no solo (ZHANG et al., 2015).

Araújo et al., (2012) define a respiração microbiana do solo como um processo que reflete a atividade biológica do solo, sendo definida como a produção de CO₂ ou o consumo de O₂ como resultado de processos metabólicos de organismos vivos do solo, enquanto, CATTELAN & VIDOR (1990) definiram a respiração basal do solo (RBS) como a soma total de todas as funções metabólicas nas quais o CO₂ é produzido e com estreita relação com as condições abióticas do solo, entre elas a umidade, temperatura e aeração.

A RBS representa a oxidação da matéria orgânica por organismos aeróbios do solo (NEVES, 2009) e basicamente dois métodos são propostos para quantificar o conteúdo de CO₂ produzido: o primeiro é baseado na determinação do fluxo de CO₂ usando câmaras que são colocadas sobre o solo e o segundo é usado para avaliar a atividade microbiana, sendo baseado na produção de CO₂ a partir de uma amostra de solo em laboratório (PARKIN et al., 1996).

Quociente Microbiano (qMic)

O qMic é uma métrica que relaciona a biomassa microbiana do solo com a quantidade de carbono presente no solo. Esse índice é calculado dividindo-se a biomassa microbiana (BM) pela MOS, geralmente expressa como uma proporção ou porcentagem. Em termos práticos, o qMic reflete a eficiência com que os microrganismos do solo utilizam o C orgânico disponível para seu crescimento e metabolismo. Um valor elevado de qMic pode indicar uma maior atividade microbiana em relação ao C disponível, enquanto um valor baixo pode sugerir uma atividade microbiana reduzida. De acordo com Kaiser et al. (2020), ao investigar o uso do qMic como indicador da saúde do solo e da atividade microbiana em diversos sistemas agrícolas e ambientais, o qMic é uma importante ferramenta para avaliar a qualidade do solo, devido ao seu papel na ciclagem de nutrientes e na manutenção da fertilidade do solo.

Quociente Metabólico (qCO₂)

O quociente metabólico (qCO₂) do solo é uma métrica que avalia a atividade microbiana em relação à produção de dióxido de carbono (CO₂). Ele é calculado como a taxa de respiração microbiana dividida pela biomassa microbiana do solo. Em termos simples, o qCO₂ representa a quantidade de CO₂ liberada pelos microrganismos do solo em relação à sua biomassa. De acordo com Chen et al. (2021), o qCO₂ foi investigado como um indicador da atividade microbiana e da eficiência do metabolismo microbiano no solo, destacando sua importância para a compreensão dos processos de decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e resposta do solo a mudanças ambientais, como variações de temperatura e umidade.

Estoque de Carbono do Solo

O estoque de C do solo refere-se à quantidade total de COT, originado da decomposição de matéria orgânica, como resíduos de plantas, raízes e organismos do solo. O solo é um reservatório significativo de C, contendo mais C do que a vegetação terrestre e a atmosfera combinadas (MINASNY et al., 2017).

O C do solo desempenha um papel crucial na regulação do clima global, na fertilidade do solo e na saúde dos ecossistemas. A manutenção e o aumento do estoque de C no solo são essenciais para mitigar as mudanças climáticas, pois o C retido no solo não contribui para o aumento de CO₂ na atmosfera. Vários fatores influenciam a quantidade de C armazenado no solo, incluindo o tipo de solo, o clima, as práticas de uso da terra e o manejo agrícola. Práticas de manejo sustentável, como a adição de compostos orgânicos, a rotação de culturas e o cultivo de cobertura, podem aumentar o sequestro de C no solo (WANG et al., 2021).

O solo um sistema dinâmico com interações entre componentes físicos, químicos, biológicos e as interações edafoclimáticas que aumentam a complexidade do entendimento dos fatores que governam a qualidade do solo e desempenho das culturas (VEZZANI & MIELNICZUK, 2009), além da variação no tempo e no espaço, qualquer alteração e perturbação que ocorre no solo pode alterar diretamente sua estrutura e sua atividade biológica e, conseqüentemente, sua fertilidade, com reflexos nos agroecossistemas

(BROOKES, 1995), podendo promover prejuízos à qualidade do solo e à produtividade das culturas.

Neste contexto, a hipótese do estudo é de que o regime de inundação gera impactos na integridade dos solos dos ecossistemas de várzea, afetando os fluxos de serviços por eles prestados como estoque de C no solo, fertilidade do solo e, conseqüentemente, a qualidade dos solos agricultáveis pelas populações ribeirinhas. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar, a dinâmica dos atributos químicos e biológicos do solo em função do regime de inundação da floresta de várzea do Distrito do Arapixuna no Município de Santarém-PA.

Para atingir esses objetivos, pesquisas voltadas para a compreensão da dinâmica e multifuncionalidade do ecossistema em um contexto de paisagem são essenciais para avaliar os impactos das mudanças nos ecossistemas naturais e nos sistemas agrícolas.

HIPÓTESES

- 1- Devido aos solos de várzea terem formação sedimentar, sendo sujeitos às ações de remoção, transporte e deposição ocasionados, principalmente pelo ciclo das águas, ocorre uma grande variação nos atributos físicos e químicos do solo;
- 2- O regime de inundação gera impactos na integridade dos solos dos ecossistemas de várzea, afetando os fluxos de serviços por eles prestados como estoque de carbono no solo, fertilidade do solo e, conseqüentemente, a qualidade dos solos agricultáveis pelas populações ribeirinhas.
- 3- O manejo de agroecossistemas de várzeas associados aos frequentes regimes de inundação em áreas de várzeas alteram a qualidade do solo.

OBJETIVO GERAL

Avaliar as características, dinâmica e qualidade dos solos a partir de indicadores químicos, físicos e biológicos em função do regime de inundação no ecossistema de várzea na Amazônia Oriental.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar indicadores físicos, químicos e biológicos de solos de várzea na calha do rio Amazonas na Amazônia oriental;
2. Avaliar os teores, interação e aporte dos indicadores físicos, químicos e biológicos de solos em função do regime de inundação na floresta de várzea na mesorregião do baixo Amazonas;
3. Avaliar a relação dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo com o manejo agrícola em agroecossistemas de várzea;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. C.; GUEDES, M. C.; GUEDES, A. C. L.; BATISTA, E. M. Estrutura e distribuição espacial de andirobeiras (*Carapa spp.*) em floresta de várzea do Estuário Amazônico. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 1007-1016, 2014.

ALEF, K. AND NANNIPIERI, P. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. **Academic Press**, 1995.

AMARANTE, O.P.; SANTOS, T.C. **Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação**. *Química Nova*, v. 25, n. 4, p. 589-593, 2002.

ARAUJO, A.S.F.; MONTEIRO, R.T.R.; ABARKELI, R.B. **Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils**. *Chemosphere* 52, 799–804. 2003.

ARAÚJO, R. C. Análise sobre a monocultura de soja e o desenvolvimento sustentável na Amazônia com base na teoria do desenvolvimento endógeno. **Revista Economia e Desenvolvimento**, v. 26, n. 1, 2014.

Araújo, E., Ker, J., Lani, J. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**. 5. 2012. 10.5777/PAeT.V5.N1.12.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA FITOSANITÁRIA – ANDEF. **Dados estatísticos**, 2008. Disponível em: <www.andef.gov.br>. Acesso em: 2 set. 2009.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVIC, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v.22, n.6, p.711–728, 2013.

BATISTA, F. J.; JARDIM, M. A. G. Florística e estrutura da regeneração natural arbórea de uma floresta de várzea na Reserva Extrativista Chocoaré-Mato Grosso, Pará, Brasil. **Biota Amazônia**, v. 3, n. 3, p.139-145, 2013.

BARKMANN, J.; HELMING, K.; MÜLLER, K.; WIGGERING, H. **Multifunctional landscapes: towards an analytical framework for sustainability assessment of agriculture and forestry in Europe**. Müncheberg: Centre for Agricultural Landscape and Land Use Research, 2004. 422p

BAYLEY, P. & Petrere, M. Amazon fisheries: assessment methods, current status and management options. *Canadian special publications fisheries and aquatic science* 106: 385-98. 1989.

BLUM, W.E.H. Functions of soil for society and the environment. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v.4, p.75-79, 2005. DOI: 10.1007/s11157-005-2236-x.

BRADSHAW, R.H.W.; SYKES, M.T. **Ecosystem dynamics**: from the past to the future. Chichester: Wiley Blackwell, 2014. 336p.

BROOKES, P.C. **The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals**. Biol. Fert. Soils, 19:269-279, 1995.

CAMPANHOLA, C.; RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. Gestão territorial e desenvolvimento rural sustentável. In: GEBLER, L.; PALHARES, J. C. P. (Ed.). **Gestão ambiental na agropecuária**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007, p. 13-31.

CHAMBERS, J. Q.; TRIBUZY, E. S.; TOLEDO, L. C.; CRISPIN, B. F.; HIGUCHI, N.; SANTOS J. DOS; ARAÚJO, A. C.; KRUIJT, B; NOBRE, A. D.; TRUMBORE, S. E. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. **Ecology Application**, v.14, n.4 (supl.), p.72-s88, 2004

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, , Campinas, v. 14, n. 2, p. 133-142, maio/ago. 1990.

Chen, S.; Li, X.; Yang, F.; Wang, Y.; Zhang, J.; Xie, H.; Jiang, Y. Soil microbial quotient and quocient metabolic as indicators for assessing soil health under conservation tillage in North China Plain. **Catena**, v. 205, p. 105406, 2021. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105406.

DAILY, G.C.; ALEXANDER, S.; EHRLICH, P.R.; GOULDER, L.; LUBCHENCO, J.; MATSON, P.A.; MOONEY, H.A.; POSTEL, S.; SCHNEIDER, S.H.; TILMAN, D.; WOODWELL, G.M. Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems. **Issues in Ecology**, n.2, p.1-18, 1997.

DAILY, G.C.; POLASKY, S.; GOLDSTEIN, J.; KAREIVA, P.M.; MOONEY, H.A.; PEJCHAR, L.; RICKETTS, T.H.; SALZMAN, J.; SHALLENBERGER, R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.7, p.21-28. 2009. DOI: 10.1890/080025.

DENTON-THOMPSON, S. M.; SAYER, E. J. Micronutrients in food production: what can we learn from natural ecosystems? **Soil Systems**, v. 6, n. 1, p. 8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6010008>.

DIAS, L. S. MARQUES, M. D.; DIAS, L. S. Educação, educação ambiental, percepção ambiental e educomunicação. In: Leonice Seolin Dias, Antonio Cezar Leal e Salvador Carpi Junior (Orgs.). **Educação Ambiental: conceitos, metodologia e práticas** / – Tupã: ANAP, 187 p. 2016.

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v.69, p.1858-1868, 2010. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.05.002.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. **Defining and assessing soil quality**. In: SYMPOSIUM DEFINING SOIL QUALITY FOR A SUSTAINABLE ENVIRONMENT, 1992, Minneapolis, USA. Proceedings... Madison: SSSA, 1994. cap.1, p. 3-21. (SSSA. Special Publication, 35).

DENG, L., WANG, K., ZHU, G., LIU, Y., CHEN, L., & SHANGGUAN, Z. Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 171, 185-192, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.014>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília, 2009. 627p. Disponível em http://livraria.sct.embrapa.br/liv_resumos/pdf/00083136.pdf, acesso em 10/01/2021.

ENESI, R. O.; DYCK, M.; CHANG, S.; THILAKARATHNA, M. S.; FAN, X.; STRELKOV, S.; GORIM, L. Y. A calagem corrige a acidez do solo e melhora o rendimento e a lucratividade das culturas - uma meta-análise. **Frente. Agro**, v. 5, p. 1194896, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896>.

EUROPEAN COMMISSION. **Thematic strategy for soil protection** 2006. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=URISERV:l28181>. acesso em 12/10/ 2022.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Building a common vision for sustainable food and agriculture: principles and approaches**. Rome: FAO, 2014. 50p.

FALESI, I.C. (1967): O estado atual dos conhecimentos sobre os solos da Amazônia Brasileira. - **Geociência** 1: 151-168.

FERREIRA, L. V.; ALMEIDA, S. S.; AMARAL, D. D.; PAROLIN, P. Riqueza e composição de espécies da floresta de igapó e várzea da Estação Científica Ferreira Penna: subsídios para o plano de manejo da Floresta Nacional de Caxiuanã. **Pesquisas, Botânica**, n. 56, p. 103- 116, 2005.

FRIGHETTO, R.T.S. Análise da biomassa microbiana em carbono: método de fumigação – extração. In: FRIGHETTO, R.T.S.; VALARINI, P.J. (Coords.). Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo: manual técnico. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, 2000. 198p. (EMBRAPA Meio Ambiente – Documentos, 21).

FROUZ, J., TOYOTA, A., MUDRÁK, O., JÍLKOVÁ, V., FILIPOVÁ, A., & CAJTHAML, T. Effects of soil substrate quality, microbial diversity and community composition on the plant community during primary succession. **Soil Biology and Biochemistry**, 99, p75-84, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.024>

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; VIANA, A.P. & SANTOS, G.A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em

decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região Sudeste do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:1489-1499, 2008.

GARCIA EG. Pesticide control experiences in Brazil. *Pestic Saf* 1997;2:5.

GASPAR, A. B. S. **Diagnóstico do uso correto e seguro de Produtos Fitossanitários por produtores agrícolas no município de Santarém -PA.** - Monografia de Pós-Graduação *latu sensu* em Proteção de Plantas. Viçosa-MG, 2015.

GRANATSTAIN, D.; BEZDICEK, D.F. **The need for a soil quality index: local and regional perspective.** *Am. J. Alterna. Agric.*, v,7, p.12-16, 1992.

GEE, H.K.W.; KING, S.L.; KEIM, R.F. Tree growth and recruitment in a leveed floodplain forest in the Mississippi River Alluvial Valley, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 334, p.85-95, 2014.

HINZ, C. **Description of sorption data with isotherm equations.** *Geoderma*, v.99, p.225-243, 2001.

HAYGARTH, P.; RITZ, K. The future of soils and land use in the UK: soil systems for the provision of land-based ecosystem services. **Land Use Policy**, v.26, p.187-197, 2009. Supplement 1. DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.09.016.

HUANG, K.; LI, M.; LI, R.; RASUL, F.; SHAHZAD, S.; WU, C.; SHAO, J.; HUANG, G.; LI, R.; ALMARI, S.; HASHEM, M.; AAMER, M. Acidificação e salinidade do solo: a importância da aplicação de biochar para solos agrícolas. **Frente. Ciência das Plantas**, v. 14, p. 1206820, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206820>

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility Soils**, v. 27, n. 4, p. 408-416, 1998.

JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, v.8, n.3, p.209-213, 1976.

JENKINSON, D. D.; LADD, L. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. N. (Eds.). *Soil biochemistry* New York: M. Dekker, 1981. v. 5, p. 415-471.

JOHAL, G.S.; HUBER, D.M. **Glyphosate effects on diseases of plants.** *Europ. J. Agronomy* . v31. p.144–152. 2009.

JUNK, W. J. *The central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system.* [s.l.] Springer Science & Business Media, 2013. v. 126

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; WITTMANN, F.; SCHONGART, J. *Várzeas Amazônicas: Desafios para um Manejo Sustentavel.* -Manaus : Editora do INPA, 2020.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; SCHÖNGART, J.; COHN-HAFT, M.; ADENEY, J. M.; WITTMANN, F. A classification of major naturally-occurring amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623–640, 2011

JUNK, W. J. As água da Região Amazônica. In : SALATI, E.; JUNK, J. W.; SCHUBART, h. O. R.; OLIVEIRA, A. E. (Ed.) **Amazônia: desenvolvimento, integração e ecologia**. São Paulo: Brasiliense, 1983. p. 14 – 44

JUNK, W. J. flood tolerance and tree distribution in central Amazonian floodplains. In: HOLM-NIELSEN, L. B; NIELSEN, I. C; BALSLEV, h. (Ed.). **Tropical Forests: botanical dynamics, speciation and diversity**. London: Academic Press, 1989. 395p.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS,R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**, v.61, n.1, p.4-10, 1997.

Kaiser, M.; Sánchez-Monedero, M. A.; Ros, M. Potential of the microbial quotient (qMic) to assess compost stability and maturity. **Science of The Total Environment**, v. 716, p. 137049, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137049.

KERN DE, KAMPF N, WOODS WI, DENEVAN WM, COSTA MLD, FRAZÃO FJL, SOMBROEK W. Evolução do conhecimento em Terra Preta de Índio. In: Teixeira WG, Kern DC, Madari BE, Lima HN, Woods WI, editores. *As Terras Pretas de Índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: EDUA - Embrapa; 2010. p.72-81.

KOSKINEN, W.C.; HARPER, S.S. The retention process: mechanisms. In: Cheng, H.H. (Ed.). **Pesticides in the soil environment: processes, impacts and modelling**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p.51-57. (Book Series, 2)

Kochian, L. V.; Pineros, M. A.; Hoekenga, O. A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. **Plant and Soil**, v. 274, n. 1-2, p. 175-195, 2005. DOI: 10.1007/s11104-004-1158-7.

Kopittke, P. M.; Moore, K. L.; Lombi, E.; Gianoncelli, A.; Ferguson, B. J.; Blamey, F. P. C.; ... Menzies, N. W. Identification of the primary lesion of toxic aluminum in plant roots. **Plant Physiology**, v. 167, n. 4, p. 1402-1411, 2015. DOI: 10.1104/pp.114.252643.

LAW, S.E. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during de 20th century. **Journal of electrostatics**, v.51/52, p.25-42, 2001.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment* Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 37-51. (SSSA special publication, 35).

LIMA, Edvaldo; MELLO, Jaime Wilson Vargas; SCHAEFER, Carlos Ernesto G. R.; KER, João Carlos & LIMA, Miguel Nascimento. Mineralogia e Química de três solos de uma toposequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:59-68, 2006.

Liu, Z.; Li, Q.; Zhang, M.; Xu, J.; Chen, H.; Guo, J. Characteristics of soil cation exchange capacity and its relationship with soil properties and crop yield in a reclaimed coastal tidal flat area. *Journal of Soils and Sediments*, v. 20, n. 7, p. 3155-3166, 2020. DOI: 10.1007/s11368-020-02638-9.

MACHADO, C.T.T.; VIDAL, M.C. Avaliação participativa do manejo de agroecossistemas e capacitação em agroecologia utilizando indicadores de sustentabilidade de determinação rápida e fácil. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2006. 32 p. (**Embrapa Cerrados. Documentos**)

MAGALHÃES, R.C ; GOMES, R. C. M. Mineralogia e química de solo de várzea e suas susceptibilidades no processo de terras caídas na Comunidade do Divino Espírito Santo-AM. *Sociedade & Natureza*, v. 25, n. 3, p. 609–621, 2013.

MCGRATH, D.; CASTRO, F.; FUTEMMA, C. Fisheries and the evolution of resource management on the lower Amazon floodplain. *Human ecology*, v. 21, n. 2, p. 167–195, 1993.

Minasny, B.; Malone, B. P.; McBratney, A. B.; Angers, D. A.; Arrouays, D.; Chambers, A.; ... Winowiecki, L. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, v. 292, p. 59-86, 2017. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002.

MONTEIRO, R.T.R. **Biodegradação de pesticidas em solos brasileiros**. In: VARGAS, M.C.; MARTINS, J.T. Biodegradação. Piracicaba: EMBRAPA Meio Ambiente, 2001.

MUGGLER, C.C.; PINTO SOBRINHO, F.A.; MACHADO, V.A. Educação em Solos: princípios, teoria e métodos. *Revista Brasileira em Ciência do Solo*, 30, 733-740, 2006.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MACEDO, R. L. G.; MOREIRA, F. M. D. S.; D'ANDRÉA, A. F. Indicadores biológicos da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no nordeste do estado de minas gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 33, n. 1, p. 105-112, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000100015>

NILSSON, C., BROWN, R.L., JANSSON, R., MERRITT, D.M., The role of hydrochory in structuring riparian and wetland vegetation. *Biol. Rev.* v.85, p.837–858, 2010.

OLIVEIRA, L. A., MOREIRA, F. W., FALCÃO, N. P., PINTO, V. S. G. "Floodplain soils of Central Amazonia: chemical and physical characteristics and agricultural sustainability", in W. J. Junk, J. J. Ohly, M. T. F. Piedade, M. G. M. Soares, (Eds.). *The Central Amazon Floodplain: Actual Use and Options for a Sustainable Management*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, p. 129-140. 2000.

PRATA, F.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; TORNISELO, V. L.; **Influência da matéria orgânica na sorção e dessorção do glifosato em solos com diferentes atributos mineralógicos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 24: 947-951, 2000.

PAROLIN, P. Submerged in darkness: adaptations to prolonged submergence by woody species of the Amazonian floodplains. **Annals of Botany**, v. 103, n. 2, p. 359-376, 2009.

PARKIN, T. B.; DORAN, J. W.; FRANCO-VIZCAÍNO. Field and laboratory tests of soil respiration. In: DORAN, J.W. e JONES, A., eds. **Methods for assessing soil quality**. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.231-245

PRADO, R. B., FIDALGO, E. C. C., MONTEIRO, J. M. G., SCHULER, A. E., VEZZANI, F. M., GARCIA, J. R., OLIVEIRA, A. P. DE ., VIANA, J. H. M., PEDREIRA, B. DA C. C. G., MENDES, I. DE C., REATTO, A., PARRON, L. M., CLEMENTE, E. DE P., DONAGEMMA, G. K., TURETTA, A. P. D., & SIMÕES, M. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 51, n. **Pesq. agropec. bras.**, 2016 51(9), set. 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900002>

QUEIROZ ,G. M. P.; SILVA , M. R.; BIANCO, R. J. F. **Transporte de glifosato pelo escoamento superficial e por lixiviação em um solo agrícola**. *Quim. Nova*, Vol. 34, No. 2, 190-195, 2011.

RÄSÄNEN ME, LINNA AM, SANTOS JCR, NEGRI FR.. Late Miocene tidal deposits in the Amazonian foreland basin. *Science* 269: 386-389. 1995.

RIBEIRO, P. A.; CARNEIRO, K. K. C. A dinâmica da enchente e vazante no município de Barreirinha/AM: impactos socioambientais e a intervenção das políticas públicas. Belém, **Revista Eletrônica Mutações**, janeiro –junho, 2016.

RICHERS, B. T. T. Agricultura migratória na várzea: ameaça ou uso integrado? **UAKARI**, v.6, n.1, p.27-37, jun.2010.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 6.ed. Londrina, PR: UEL, 2011. 697 p.

RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P.M., STELLA, J.C., CAMPELO, F., FERREIRA, M.T., ALBUQUERQUE, A. Subsidy or stress: tree structure and growth in wetland forests along a hydrological gradient in Southern Europe. **Forest Ecology and Management**, v.259, p. 2015–2025, 2010.

REIGOTA, M. Meio Ambiente e Representação Social. São Paulo: Cortez, 2002.

SÁ, N. P.; CARVALHO, M. A. Miocene fern spores and pollen grains from the Solimões Basin, Amazon Region, Brazil. *Acta Botanica Brasilica* - 31(4): 720-735. October-December 2017

SANTOS, G. C.; JARDIM, M. A. G. Florística e estrutura do estrato arbóreo de uma floresta de várzea no município de Santa Bárbara do Pará, Estado do Pará, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 4, p. 437-446, 2006.

SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBREAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed., rev. e ampl. - Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356p

SCHMIDT, M. J. **Farming and patterns of agrobiodiversity on the Amazon floodplain in the vicinity of Mamirauá, Amazonas, Brazil**. florida, 210 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade da Flórida, 2003

SILVA, A. A.; FERREIRA, E. A.; PIRES, F. R.; FERREIRA, F. A.; SANTOS, J. B.; SILVA, J. Ferreira.; SILVA, J. Francisco.; VARGAS, L; FERREIRA, L. R.; VIVIAN, R.; JÚNIOR, R. S. O.; PROCÓPIO, S. **Proteção de Plantas – Manejo de Plantas Daninhas**. Viçosa, 2010.

SILVA, A. A.; VIVIAN, R.; Oliveira JÚNIOR, R. S. Comportamento de herbicida em solo. In: ZAMBOLIM, L; PICANÇO, M. C; SILVA, A. A. **O que os Engenheiros Agrônomos devem saber para orientar o uso de Produtos Fitossanitários**. 4.ed rev. ampl. Editora UFV. Viçosa, MG, 2014. 564p.

SOUZA, H. A.1; FARIAS, J. L. S.2; PAIVA, F.E.P.2; GUEDES, F. L.2; POMPEU, R. C. F. F.2; ROUWS, J. R. C. Avaliação participativa de indicadores de solo e sanidade de cultivos em sistemas de produção na Comunidade Pé de Serra Cedro, no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Agroecologia** v.11, p. 206-21, 2016.

TEIXEIRA WG, LIMA HN, PINTO WHA, SOUZA KW, SHINZATO E (2019). O manejo do solo nas várzeas da Amazônia G. in: Manejo e Conservação do Solo e da Água eds. I. Bertol , IC De Maria, LS Souza. pp.701-728. Editora : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

TEIXEIRA GW, MARTINS GC, LIMA HN. An Amazonian Dark Earth profile description from a site located in the floodplain (várzea) in the Brazilian Amazon. In: Rios GM, Camargo SM, CalvoCF, editors. Pueblos y paisajes antiguos de la Selva Amazónica. Bogotá / Washington: Universidad Nacional; 2006. p.293-300.

THAPA, S.; BHANDARI, A.; GHIMIRE, R.; XUE, Q.; KIDWARO, F.; GHATREHSAMANI, S.; MAHARJAN, B.; GOODWIN, M. Gerenciando micronutrientes para melhorar a fertilidade do solo, a saúde e o rendimento da soja. **Sustentabilidade**, v. 13, p. 11766, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132111766>.

TUSAR, H. M.; UDDIN, M. K.; MIA, S.; SUHI, A. A.; WAHID, S. B. A.; KASIM, S.; SAIRI, N. A.; ALAM, Z.; ANWAR, F. Biochar-acid soil interactions—a review.

Sustainability, v. 15, n. 18, p. 13366, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151813366>.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, n.6, p.703-707, 1987.

VAN DER PUTTEN, W. H., BARDGETT, R. D., BEVER, J. D., BEZEMER, T. M., CASPER, B. B., FUKAMI, T., ... & WARDLE, D. A. (2013). Plant–soil feedbacks: the past, the present and future challenges. **Journal of Ecology**, *101*(2), 265-276. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12054>

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. **Uma visão sobre qualidade do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, p.743-755, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400001.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema** Curitiba: Edição dos Autores, 2011. 104p.

VIDAL, M.C.; MACHADO, C. T. T. M. Indicadores de Sostenibilidad como Herramienta para Introducir Prácticas Agroecológicas en La Microcuena Barracão dos Mendes en Nova Friburgo/RJ, Brasil. **IV Congresso Latino Americano de Agroecología. Anais**. p.2013, 2013. Universidad Nacional Agraria la Molina - Lima-Peru.

WANG, B.; LIU, G.B.; XUE, S.; BINGBING ZHU, B. Changes in soil physico-chemical and microbiological properties during natural succession on abandoned farmland in the Loess Plateau. **Environ Earth Sci** **62**, 915–925 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0577-4>.

WANG, K., ZHANG, Y., TANG, Z., SHANGGUAN, Z., CHANG, F., CHEN, Y., ... & DENG, L. (2019). Effects of grassland afforestation on structure and function of soil bacterial and fungal communities. **Science of the total environment**, *676*, 396-406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.259>

Wang, Z.; Zhang, Y.; Zheng, H.; Chen, L.; Wang, J. Dynamics of soil organic carbon and nitrogen following afforestation of marginal croplands in northern China. **Forest Ecology and Management**, v. 496, p. 119456, 2021. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119456.

WARDLE, D.A.; PARKINSON, D. **Influence of the herbicide glyphosate on soil microbial community structure**. Plant and Soil, v. 122, n. 1, p.29-37, 1990.

WEBER, M. A. Educação em solos - Experiências no ensino fundamental. In: Morales, C. A.; Santana. N.A. **Educação Ambiental: Alternativas para o ensino de Educação Ambiental: Relatos de Experiências**. 1. ed. – Porto Alegre : PLUS / Simplíssimo, 2019.

WITTMANN, F.; JUNK, W. J. Sapling communities in Amazonian whitewater forests. **Journal of Biogeography**, v. 30, n. 10, p. 1533-1544, 2003.

WORLD HEALTH ORGANIZATION/United Nations Environment Programme. *Public health impact of pesticides used in agriculture*. Geneva: WHO/UNEP; 1990

ZAMBOLIM, L; PICANÇO, M. C; SILVA, A. A. **O que os Engenheiros Agrônomos devem saber para orientar o uso de Produtos Fitossanitários**. 4.ed rev. ampl. Editora UFV. Viçosa, MG, 2014. 564p.

ZAMBOLIM, L; PICANÇO, M. C; SILVA, A. A.; FERREIRA, L. R; FERREIRA, F. A. **Produtos Fitossanitários (Fungicidas, inseticidas, acaricidas e Herbicidas)**. Viçosa, MG: UFV/DFP, 2008. 652p.

ZABALOY, M. C., GARLAND, J. L., ALLEGRINI, M., & DEL VALLE GOMEZ, E. (2016). Soil microbial community-level physiological profiling as related to carbon and nitrogen availability under different land uses. *Pedosphere*, 26(2), 216-225. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60036-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60036-4)

**CAPÍTULO II: PROPRIEDADES QUÍMICAS E TEXTURAIS DE
SOLOS DE FLORESTAS DE VÁRZEA NA AMAZÔNIA ORIENTAL,
BRASIL**

PROPRIEDADES QUÍMICAS E TEXTURAIS DE SOLOS DE FLORESTAS DE VÁRZEA NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL

CHEMICAL AND TEXTURAL PROPERTIES OF FLOODPLAIN FOREST SOILS IN THE EASTERN AMAZON, BRAZIL

Avner Brasileiro dos Santos Gaspar¹

Diego Pereira Bezerra²

Iolanda Maria Soares Reis³

Rodrigo da Silva^{1,2}

¹ Pós-graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento (PPGSND), Instituto de Biodiversidade e Florestas (IBEF), Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém-PA, Brasil;

² Graduando em Ciências Atmosféricas, Instituto de Engenharia e Geociências (IEG), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil;

³ Instituto de Biodiversidade e Florestas (IBEF), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil;

⁴ Instituto de Engenharia e Geociências (IEG), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil

RESUMO

Os solos dos ecossistemas de várzea são sedimentares e sujeitos a processos de remoção, transporte e deposição causados principalmente pelo ciclo da água, contribuindo para frequentes variações nos padrões da paisagem e contínua transformação do ambiente de várzea. Dada a constante perturbação causada pela variabilidade do pulso de inundação, é difícil avaliar as propriedades do solo em ecossistemas de várzea. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi quantificar as propriedades químicas e texturais do solo em várzeas, (ii) comparar a composição do solo entre ambientes de várzea e terra firme, e (iii) avaliar a qualidade do solo em uma floresta de várzea ao longo da calha do rio Amazonas. As amostras de solo foram coletadas a uma profundidade de 0–0,10 m em áreas de várzea e floresta de terra firme entre Santarém e Gurupá, Estado do Pará, Brasil. As amostras foram analisadas quanto ao pH H₂O, alumínio, cálcio, magnésio, potássio, fósforo, carbono orgânico total, boro, zinco, cobre, ferro, manganês, areia, silte e argila. Calculou-se a capacidade potencial e efetiva de troca catiônica, soma de bases, saturação de bases, saturação de alumínio e matéria orgânica. Os dados foram submetidos à análise descritiva, análise de variância, análise de correlação e agrupamento hierárquico. Parâmetros químicos e textural diferiram significativamente entre solos de várzea e floresta de terra firme. As propriedades do solo eram altamente heterogêneas. O alumínio e a saturação por alumínio apresentaram os maiores coeficientes de variação entre as amostras de várzea, enquanto o pH em água e saturação por bases apresentaram os menores coeficientes. É possível inferir dos resultados que os solos de floresta de várzea mantêm altos níveis de fertilidade. No entanto, esse ambiente também apresenta alta acidez e níveis tóxicos de alumínio trocável.

Palavra-chave: Pulso de inundação, fertilidade do solo e ecossistema de várzea.

ABSTRACT

Soils in floodplain ecosystems are sedimentary and subject to removal, transport, and deposition processes caused mainly by the water cycle, contributing to frequent variations in landscape patterns and continuous transformation of the floodplain environment. Given the constant disturbance caused by flood pulse variability, it is difficult to assess soil properties in floodplain ecosystems. Soil samples were collected at a

depth of 0–0.10 m at floodplain and upland forest sites between Santarém and Gurupá, Pará State, Brazil. Samples were analyzed for pH H₂O, aluminum, calcium, magnesium, potassium, phosphorus, total organic carbon, boron, zinc, copper, iron, manganese, sand, silt, and clay. Potential and effective cation-exchange capacity, sum of bases, base saturation, aluminum saturation, and organic matter were calculated. Data were subjected to descriptive analysis, analysis of variance, correlation analysis, and hierarchical clustering. Chemical and textural parameters differed significantly between floodplain and upland forest soils. Soil properties were highly heterogeneous. Aluminum and aluminum saturation had the highest coefficients of variation among floodplain samples, whereas pH H₂O and base saturation had the lowest. It is possible to infer from the results that floodplain forest soils maintain high levels of fertility. However, this environment also shows high acidity and toxic levels of exchangeable aluminum.

Keyword: flood pulse, soil fertility and floodplain ecosystem.

INTRODUÇÃO

As florestas de várzea ao longo das margens dos rios de água branca representam o tipo mais extenso de florestas alagadas da América do Sul (BAYLEY & PETRERE, 1989), ocupando 1,5 a 2% da área total da bacia do rio Amazonas (cerca de 29 milhões de hectares ou 288,42 km²) (JUNK, 2000; WITTMANN et al., 2004). Inicialmente, as várzeas eram áreas pouco utilizadas e predominantemente ocupadas por vegetação nativa, cuja composição pode variar de acordo com a elevação do terreno e duração do período anual de inundação. No entanto, estudos têm mostrado uma redução de 52% nas áreas de floresta de várzea entre 1970 e 2008 na região do Baixo Amazonas (RENÓ & NOVO, 2015), acompanhada de intensificação da atividade agrícola (BARBARISI et al., 2010) e degradação da qualidade da água para uso humano (AFFONSO et al., 2011).

As florestas de várzea apresentam grande potencial para a produção de alimentos na Amazônia, dada a alta fertilidade natural dos solos ribeirinhos dessa região. Isso explica a intensa ocupação dessas áreas, bem como sua substituição por uma ampla gama de atividades agrícolas (FARJADO et al., 2009). A grande maioria dos solos de terras altas na Amazônia são pobres em nutrientes e fornecem baixa produtividade agrícola, pois sua origem geológica antiga resultou em intemperismo avançado, de acordo com Ferreira et al. (2006) e Vale Júnior et al. (2011). Por outro lado, os solos de várzea são muito mais férteis porque se originam de partículas sólidas em suspensão no rio Amazonas, ricas em montmorilonita, que possui alta capacidade de troca iônica, e illita, que libera potássio ao se decompor (JUNK et al., 2011). . Conforme descrito por Junk et al. (2020), esses minerais de origem andina e pré-andina são depositados em camadas de poucos milímetros de espessura durante as inundações anuais.

Segundo Ferreira (1997), a baixa topografia da bacia do rio Amazonas, aliada à sazonalidade das chuvas, resulta na inundação das planícies por até seis meses ao ano, e na oscilação anual do nível das águas do rio Amazonas e seus afluentes podem atingir 14 m. Esses fatores promovem a formação de solos de origem sedimentar expostos a processos de remoção, transporte e deposição associados ao ciclo da água (SILVA et al., 2017).

Desenvolvidos em áreas de várzea a partir de sedimentos depositados pelas águas dos rios, os solos de várzea possuem uma composição textural e mineralógica diversificada, variando muito de um local para outro e causando mudanças nos padrões da paisagem. As planícies de inundação são periodicamente enriquecidas pela deposição de sedimentos durante as inundações sazonais ou de maré, resultando em fertilidade relativamente maior do que a encontrada em terras altas não inundáveis ou locais de terra firme (SIOLI, 1984; MARTINELLI et al., 1993; PAROLIN et al., 2010; QUEIROZ et al., 2011). No entanto, ainda é necessário elucidar se esse comportamento é semelhante ao longo de diferentes trechos do rio Amazonas e como ele se compara ao solo de florestas de terra firme.

Partindo da premissa de que existem poucas informações sobre a composição do solo em ambientes de várzea na região amazônica, este estudo busca responder a seguinte questão: Como variam os parâmetros físicos e químicos do solo entre os ambientes de várzea e de terra firme ao longo da calha do rio Amazonas? Tendo em vista que os solos de várzea têm origem sedimentar e estão expostos a processos de remoção, transporte e deposição relacionados ao ciclo da água, supõe-se que os constituintes do solo de várzea apresentem grande variação. Este estudo teve como objetivo (i) quantificar as propriedades químicas e texturais do solo em várzeas, (ii) comparar a composição do solo entre ambientes de várzea e terra firme, e (iii) avaliar a qualidade do solo em uma floresta de várzea ao longo da calha do rio Amazonas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

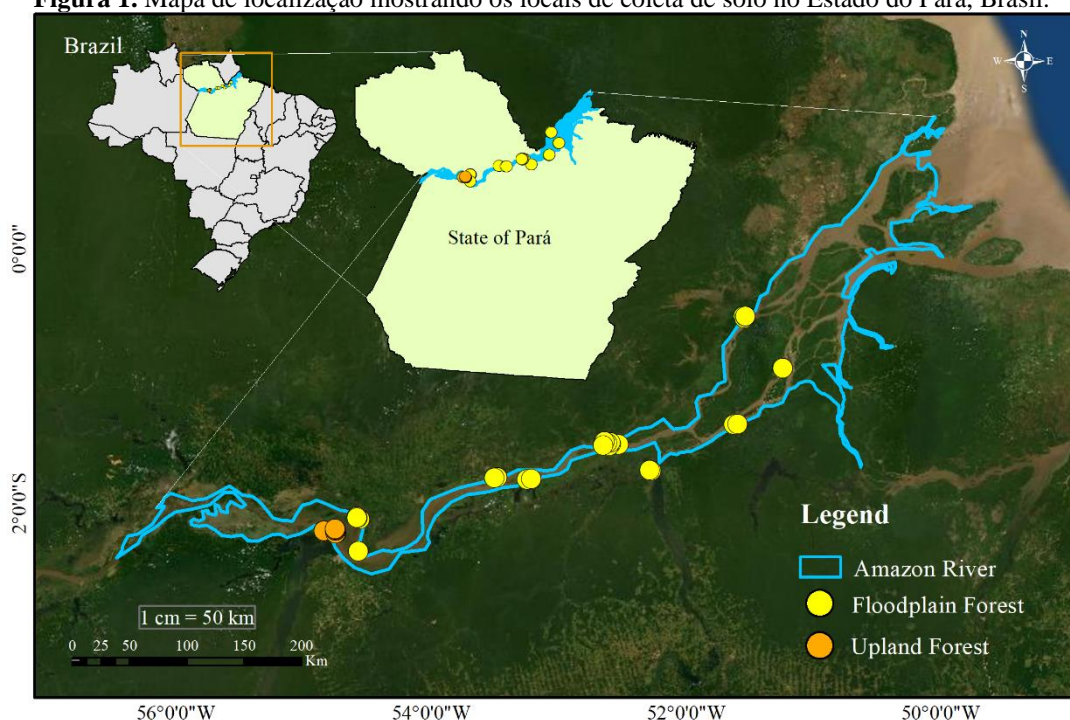
2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a floresta de várzea ao longo da calha do rio Amazonas em uma região que se estende entre os municípios de Santarém e Gurupá, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil, e um fragmento de floresta nativa de terra firme localizado no distrito de Arapixuna, Santarém, que foi usado como controle (Figura 1).

O clima da região é do tipo Am (tropical de monção) na classificação de Köppen - Geiger (KOTTEK et al., 2006). A umidade relativa média é de 85% e a temperatura média anual de 26 °C. Há duas estações, uma estação seca com precipitação mensal de 100 mm e uma estação chuvosa com valores mensais de precipitação acima de 200 mm, começando em dezembro (CHAMBERS et al., 2004; ALVARES et al., 2013).

Segundo Vitória et al. (1989), os solos das florestas de várzea são pouco desenvolvidos e são representados principalmente pelas ordens Neossolos, Gleissolos, Organossolos e Vertissolos. Esses solos podem ser eutróficos ou distróficos, dependendo da localização topográfica, efeitos da água e origem dos sedimentos. O solo de terra firme foi classificado como Latossolo Amarelo. A classificação dos solos seguiu o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018), mas quando convertido para a Base Mundial de Referência para Recursos do Solo/WRB, as ordens Neossolos, Gleissolos, Organossolos, Vertissolos e Latossolo, correspondem respectivamente as ordens: Fluvisols, Gleysols, Histosols, Vertisols e Ferralsols (IUSS, 2015).

Figura 1. Mapa de localização mostrando os locais de coleta de solo no Estado do Pará, Brasil.



Fonte: Autores.

2.2 Coleta e análise de solo

Amostras de solo foram coletadas com trado holandês em janeiro e fevereiro de 2020. Um total de 60 pontos foram amostrados em aproximadamente 10.000 m² de floresta de

várzea ao longo do rio Amazonas mais 18 pontos de controle em floresta nativa de terra firme na comunidade Arapixuna. Cada amostra consistiu em 10 subamostras coletadas a na profundidade de 0–0,10 m. As amostras foram coletadas em pontos expostos a mínima ou nenhuma ação antrópica, conforme proposto por Singh e Steinnes (1994). Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm antes da caracterização química e física.

As seguintes propriedades químicas foram avaliadas: pH H₂O, alumínio (Al³⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), potássio (K⁺), fósforo (P), carbono orgânico total (TOC), boro (B), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn). O pH do solo foi determinado em H₂O usando uma relação solo/solução de 1:2,5. Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos com 1 N KCl, e P, K⁺, Zn, Cu, Fe e Mn foram extraídos com Mehlich-1 (solução de extração de ácido duplo contendo 0,0125 M H₂SO₄ + HCl 0,05 M). Após a extração, os cátions foram determinados por espectroscopia de absorção atômica. O TOC foi determinado pela oxidação com dicromato de potássio na presença de ácido sulfúrico, seguido de titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso de amônio. Esses dados gerados foram usados para calcular os seguintes parâmetros: capacidade potencial de troca catiônica (PCEC), capacidade efetiva de troca catiônica (ECEC), soma de bases (SB), saturação de bases (BS), saturação de alumínio e matéria orgânica (OM). As propriedades físicas avaliadas foram os teores de areia, silte e argila. Todas as análises foram realizadas de acordo com os métodos descritos por Teixeira et al. (2019). Os teores de nutrientes foram classificados de acordo com Brasil et al. (2020).

2.3 Análise de dados

Os dados foram submetidos à análise descritiva, teste de normalidade, análise de variância univariada (ANOVA) com comparação de médias pelo teste *t de Student* e análise de correlação de Spearman para comparação das propriedades químicas e texturais do solo entre os locais de estudo. Além desses testes, dada a estrutura multivariada do conjunto de dados, técnicas estatísticas foram usadas para normalizar os dados para média zero e variância unitária para garantir que todas as variáveis contribuíssem igualmente para o modelo. Após esse procedimento, os dados transformados foram submetidos à análise hierárquica de agrupamentos e à análise de componentes principais (PCA).

Os dados foram submetidos à análise multivariada de variância (MANOVA) com o teste de Pillai para analisar a relação entre várias variáveis de resposta e um conjunto comum de preditores ao mesmo tempo. A análise hierárquica de agrupamento foi realizada calculando a distância euclidiana entre as coletas para um conjunto de 22 variáveis (pH H₂O, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H + Al, K⁺, P, S, OM, B, Zn, Cu, Fe, Mn, ECEC, PCEC, SB, BS, saturação de Al, silte, argila e areia) e usando o algoritmo de Ward para identificar grupos compostos por coleções semelhantes.

Os resultados são apresentados graficamente na forma de um dendrograma ilustrando agrupamentos de amostras. A análise hierárquica de clusters foi complementada pela PCA, técnica que permitiu obter um conjunto menor de combinações, avaliar qualitativamente as características dos solos das florestas de várzea e de terras altas e identificar as variáveis que mais fortemente se relacionam com cada local. As análises estatísticas foram realizadas com os softwares livres Jamovi (versão 1.8, 2021) e R (versão 4.03, R Core Team, 2020).

Foi realizada uma análise do gradiente de concentração dos indicadores químicos e físicos do solo em floresta de várzea na calha do rio Amazonas, utilizando a matriz de correlação de Spearman e geoestatística com o software livre QGIS 3.22. Os resultados foram apresentados em forma de mapa interpolado de krigagem.

3.RESULTADOS

3.1 Avaliação das análises descritivas dos atributos químicos e granulométricos dos solos de várzea e terra firme

Os resultados da análise exploratória dos atributos químicos e texturais dos solos de várzea e planalto são apresentados na Tabela 1 e na Figura 2.

Tabela 1. Estatística descritiva e análise de variância (ANOVA) dos atributos químicos e texturais do solo em florestas de várzea e terra firme no estado do Pará, Brasil.

propriedade do solo	floresta de várzea			floresta de planalto			<i>P</i>	ANOVA	
	Significar	SD	CV (%)	Significar	SD	CV (%)		Diferença média	SE diferença

pH H ₂ O	5,1	0,4	8,3	3,7	0,2	4,3	<0,001	1,4	0,1
MO (g kg ⁻¹)	15,7	5,4	34,3	25,4	6,6	26,1	<0,001	-9,7	1,5
P (mg dm ⁻³)	51,5	41,3	80,5	23,4	12,8	54,8	0,006	28,1	9,9
S (mg dm ⁻³)	19,8	13,6	68,6	6,1	0,4	5,91	<0,001	13,7	3,2
K (mg dm ⁻³)	109,1	80,4	73,7	25,1	15,8	62,8	<0,001	83,9	19,1
Ca (cmol dm ⁻³)	5,4	1,8	33,8	0,4	0,3	73,5	<0,001	4,9	0,4
Mg (cmol dm ⁻³)	2,5	1,4	56,2	0,8	0,1	82,4	<0,001	2,3	0,3
Al (cmol dm ⁻³)	1,1	1,1	97,9	1,9	0,3	17,7	0,006	-0,7	0,3
H + Al (cmol dm ⁻³)	4,3	1,8	42,9	6,3	1,2	19,6	<0,001	-2,1	0,5
SB (cmol dm ⁻³)	8,1	2,3	28,2	0,7	0,4	54,2	<0,001	7,5	0,5
PCEC (cmol dm ⁻³)	12,3	3,3	26,5	7,0	1,4	19,5	<0,001	5,5	0,8
ECEC (cmol dm ⁻³)	9,3	2,5	26,9	2,5	0,5	17,7	<0,001	6,8	0,6
BS (%)	64,9	11,4	17,6	9,4	5,2	55,6	<0,001	55,6	2,8
Saturação Al (%)	12,3	11,1	89,6	74,9	11,7	15,6	<0,001	-62,5	3,01
B (mg dm ⁻³)	0,2	0,05	24,4	0,2	0,03	20,2	0,026	0,02	0,01
Cu (mg dm ⁻³)	3,3	1,6	48,0	3,1	1,7	54,5	0,596	0,2	0,4
Fe (mg dm ⁻³)	315,8	208,8	66,1	504,1	263,9	52,4	0,002	-188,5	59,7
Mn (mg dm ⁻³)	50,2	44,3	88,3	79,3	63,2	79,7	0,031	-29,2	13,2
Zn (mg dm ⁻³)	4,2	2,1	49,4	5,1	2,4	46,6	0,118	-0,9	0,6
Argila (g kg ⁻¹)	233,5	77,6	33,2	685,6	130,5	19,1	<0,001	-452,1	24,8
Silte (g kg ⁻¹)	321,421	270,9	84,3	173,7	56,9	32,7	0,025	147,8	64,5
Areia (g kg ⁻¹)	445,1	268	60,2	140,8	121,5	86,3	<0,001	304,3	65,3

Fonte: Autores.

DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação; SE, erro padrão; MO, matéria orgânica; SB, soma das bases; PCEC, capacidade potencial de troca catiônica; ECEC, capacidade efetiva de troca catiônica; BS, saturação de base.

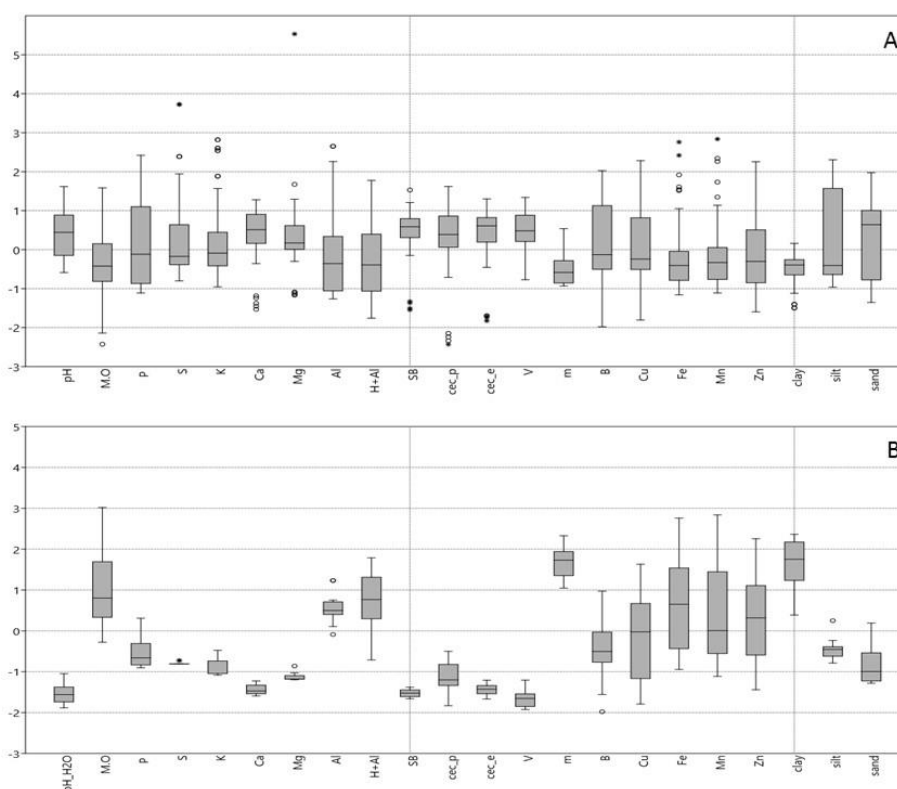


Figura 2. Boxplot mostrando a variação nas propriedades do solo normalizadas para (A) várzea e (B) florestas de terra firme no estado do Pará, Brasil. MO, matéria orgânica; SB, soma das bases; PCEC, capacidade potencial de troca catiônica; ECEC, capacidade efetiva de troca catiônica; BS, saturação de base; Al sat, saturação de alumínio. Fonte: Autores.

O coeficiente de variação (CV) retrata a dispersão dos dados em termos relativos (%). Um CV inferior a 30% indica dispersão intermediária ou baixa em torno dos valores médios (dados homogêneos). Já um CV maior que 30% indicam alta dispersão dos dados em relação à média, representando dados heterogêneos, conforme descrito por Gomes (2000).

Para o solo de várzea, 27% das variáveis foram consideradas homogêneas (CV < 30%), ou seja, $\text{pH H}_2\text{O} < \text{BS} < \text{B} < \text{PCEC} < \text{ECEC} < \text{SB}$, em ordem crescente de CV. Para o solo de terras altas, os parâmetros homogêneos foram $\text{pH H}_2\text{O} < \text{S} < \text{Saturação de Al} < \text{ECEC} < \text{Al} < \text{argila} < \text{H} + \text{AL} < \text{PCEC} < \text{B} < \text{OM}$, representando 45,5% das variáveis. Os parâmetros com alto CV (>30%) para solo de várzea foram, em ordem crescente, $\text{argila} < \text{Ca}^{2+} < \text{OM} < \text{H} + \text{Al} < \text{Cu} < \text{Zn} < \text{Mg}^{2+} < \text{areia} < \text{Fe} < \text{S} < \text{K}^+ < \text{P} < \text{silte} < \text{Mn} < \text{Al saturação} < \text{Al}^{3+}$. Para o solo de terras altas, os parâmetros heterogêneos foram $\text{silte} < \text{Zn} <$

Fe < SB < Cu < P < BS < K⁺ < Ca²⁺ < Mn < Mg²⁺ < areia. Esses parâmetros representaram 73% e 54,5% de todas as variáveis, respectivamente.

3.2 Qualidade de solos de várzea e terras firme

Os atributos de qualidade do solo de várzea foram avaliados de acordo com os valores de referência publicados por Brasil et al. (2020). O solo apresentou acidez intermediária a alta (4,4 a 4,9), com pH médio de 5,1 (Tabela 1). Valores de pH semelhantes, ou seja, pH 4,94 e 5,83, foram relatados por Silva et al. (2018) e Teixeira et al. (2019), respectivamente. A disponibilidade de K⁺ no solo variou de baixa a muito alta, devido à alta dispersão dos dados. Os valores médios de K⁺, no entanto, indicaram alta disponibilidade.

Os parâmetros físicos do solo de várzea estão descritos na Tabela 1. Os parâmetros físicos apresentaram alta dispersão, representando dados heterogêneos. Para o solo de terra firme, no entanto, os parâmetros físicos foram homogêneos. A classificação da textura do solo (Figura 3) foi baseada no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al. 2018). Observou-se predominância de franco-argilo-arenoso (61,67%) e franco-siltoso (31,67%). As demais amostras de várzea foram classificadas como franco-argilosa siltosa, franco-argilosa, franco-arenosa/areia argilosa e areia. Esses achados estão de acordo com os resultados de Guimarães et al. (2013). As amostras de solo de terra firme foram classificadas como muito argilosas (77%) e argilosas (23%).

hidromorfismo de solos de várzea promove processos de oxidação-redução, alterando os atributos químicos do solo e a dinâmica de nutrientes.

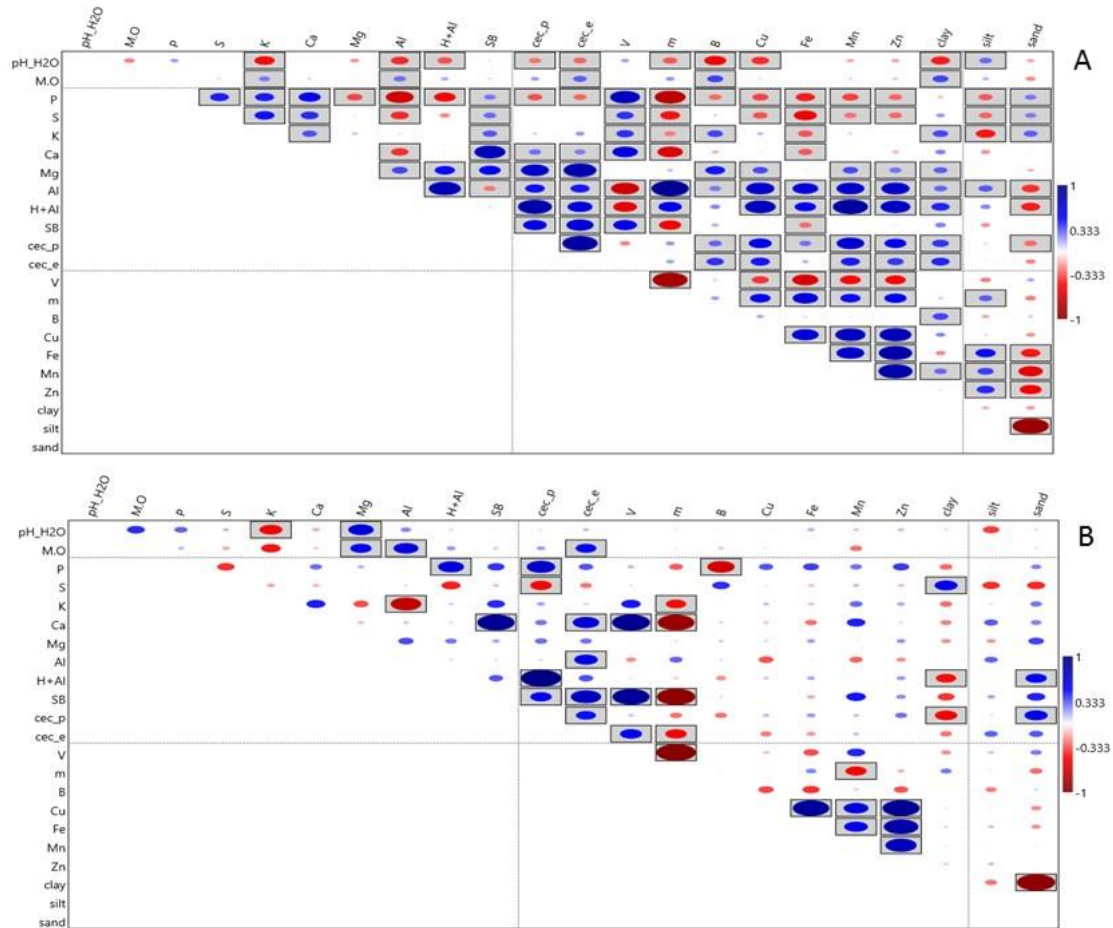


Figura 4. Matriz de correlação de Spearman para propriedades do solo em (A) várzea e (B) florestas de terra firme no estado do Pará, Brasil. MO, matéria orgânica; SB, soma das bases; PCEC, capacidade potencial de troca catiônica; ECEC, capacidade efetiva de troca catiônica; BS, saturação de base; Al sat, saturação de alumínio. Fonte: Autores.

3.4 Análise exploratória multivariada de propriedades químicas e texturais de solos de várzea e terras altas

Uma distância euclidiana de 28 foi usada para agrupamento hierárquico (Figura 5), o que permitiu ordenar as amostras em dois grupos. O primeiro grupo (G1) representou amostras de solo de planalto com valores semelhantes de argila, saturação de Al, H + Al, Al

$^{3+}$, Cu, Fe, Mn e Zn. O segundo grupo (G2) abrangeu amostras de várzea mostrando similaridade em silte, pH, BS, P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

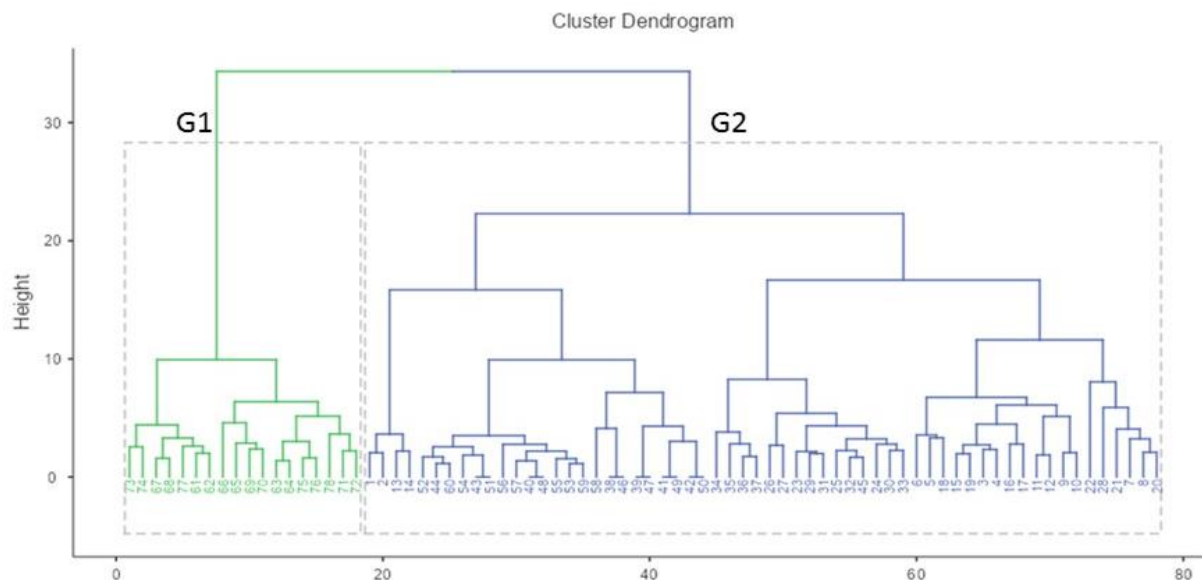


Figura 5. Dendrograma de análise de agrupamento hierárquico das propriedades do solo em (G1) florestas de terra firme e (G2) florestas de várzea no estado do Pará, Brasil. Fonte: Autores.

O PCA foi realizado usando uma matriz de dados composta por 22 variáveis e 78 amostras de solo (Figura 6). Os dados foram normalizados para média 0 e variância 1, dada a alta variação na ordem de grandeza das amostras. Os dois componentes principais (CPs) descreveram juntos 61% da variância total no conjunto de dados. PC1 explicou 41,4% da variância. As variáveis com maiores pesos positivos em PC1 foram BS, Ca^{2+} e pH H_2O . O maior peso negativo foi a saturação de Al. O PC1 representa, portanto, as propriedades químicas que caracterizam a fertilidade do solo, estando associado à maioria das amostras de várzea.

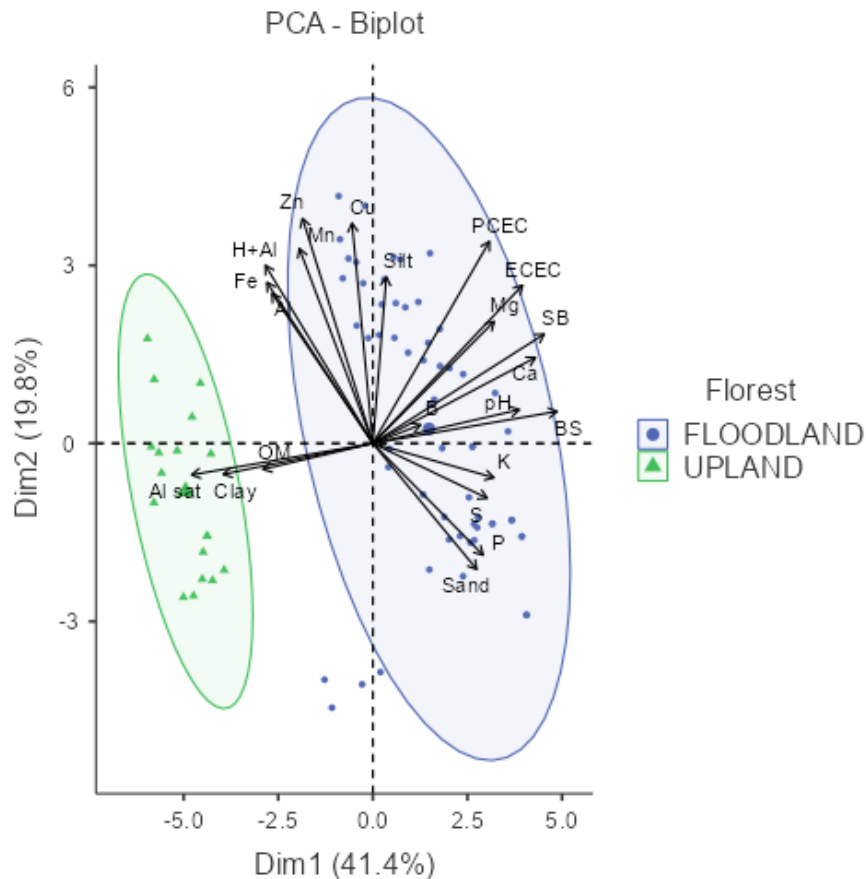


Figura 6 . Biplot de ordenação da análise de componentes principais (PCA) para propriedades químicas do solo na profundidade de 0–0,10 m em florestas de várzea e terra firme no estado do Pará, Brasil. MO, matéria orgânica; SB, soma das bases; PCEC, capacidade potencial de troca catiônica; ECEC, capacidade efetiva de troca catiônica; BS, saturação de base; Al sat, saturação de alumínio. Fonte: os autores.

PC2 explicou 19,8% da variância total no conjunto de dados. As variáveis com maiores pesos foram os teores de micronutrientes (Cu, Fe e Zn) e o maior peso negativo foi o teor de P. PC2 representa o teor de micronutrientes do solo e foi associado principalmente a amostras de terras altas. A análise multivariada mostrou que as propriedades químicas e texturais diferem significativamente entre os ambientes de planície de inundação e terras altas.

3.5 Análise espacial de atributos químicos e físicos de solo em floresta de várzea na calha do rio Amazonas

Do ponto de vista científico, essa abordagem combina métodos estatísticos robustos e ferramentas de geoprocessamento avançadas para avaliar a variabilidade espacial dos

atributos do solo. A matriz de correlação de Spearman é adequada para identificar relações monotônicas entre variáveis, enquanto a geostatística e a krigagem permitem criar mapas interpolados que oferecem uma representação visual e quantitativa das variações espaciais. A matriz de correlação de Spearman (Figura 7) entre os indicadores químicos e físicos do solo e a geolocalização indicou que sete indicadores apresentaram correlação significativa. As correlações positivas foram: pH (0,61), Fe (0,28) e silte (0,52). As correlações negativas foram: K (-0,63), B (-0,44), areia (-0,43) e argila (-0,38).

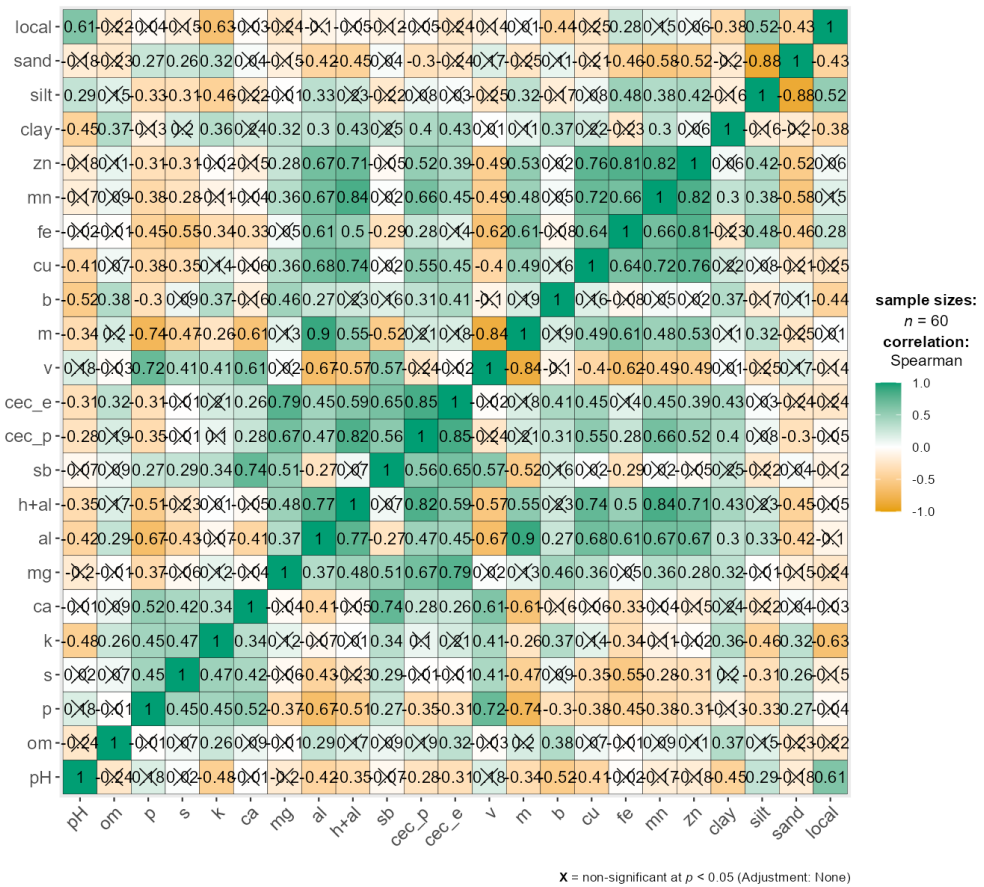


Figura 7. Matriz de correlação de Spearman dos indicadores física e químicas do solo nas florestas de várzea da calha do rio Amazonas

O Índice de Moran, apresentado no anexo II, avalia a relação de interdependência espacial entre todos os polígonos da área de estudo e a expressa por meio de um valor único para toda a região (Moran, 1950, citado por O'Sullivan; Unwin, 2010). Krigagem é um método de regressão, usado em geostatística, para aproximar ou interpolar dados. A técnica permite alavancar a correlação espacial entre amostras, para interpolar valores, em locais não amostrados.

Os resultados apresentados nos mapas de krigagem na Figura 8 indicam correlações variáveis entre os indicadores do solo e a localização geográfica. Especificamente, observou-se uma correlação positiva moderada para o pH ($r = 0,61$) e para o teor de silte ($r = 0,52$), sugerindo que esses parâmetros tendem a aumentar em determinadas áreas. Por outro lado, o teor de ferro ($r = 0,28$) apresentou uma correlação positiva fraca com a localização, indicando uma leve tendência de aumento do ferro em algumas regiões da calha do rio, sendo mais preciso em direção a foz do rio Amazonas. Esses achados podem ser úteis para a compreensão da variabilidade espacial dos atributos do solo e para o planejamento de práticas de manejo específicas.

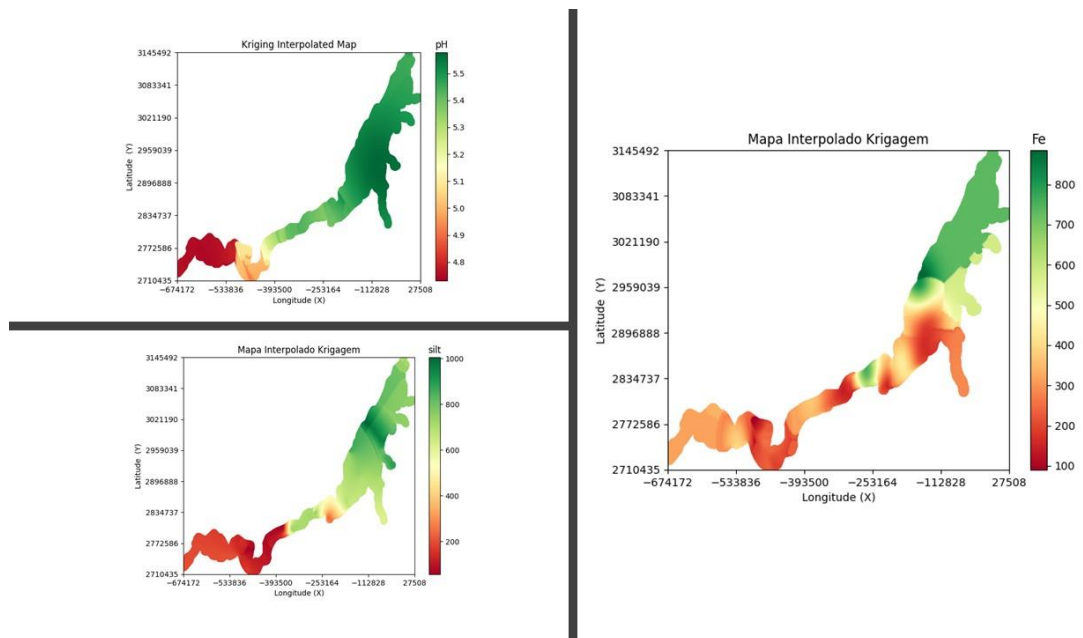


Figura 8. Mapas interpolado krigagem indicando a distribuição dos indicadores pH, silte e ferro do solo nas florestas de várzea da calha do rio Amazonas

Os indicadores com correlação negativo são apresentados na figura 9, K (-0,63): Há uma correlação negativa forte entre o potássio e a localização, indicando que a concentração de potássio tende a diminuir em certas áreas, enquanto B (-0,44) e Areia (-0,43): apresentaram A correlação negativa moderada sugere que a concentração de boro diminui em determinadas regiões da calha do rio Amazonas e Argila (-0,38): A correlação negativa fraca sugere que a concentração de argila também diminui em certas áreas.

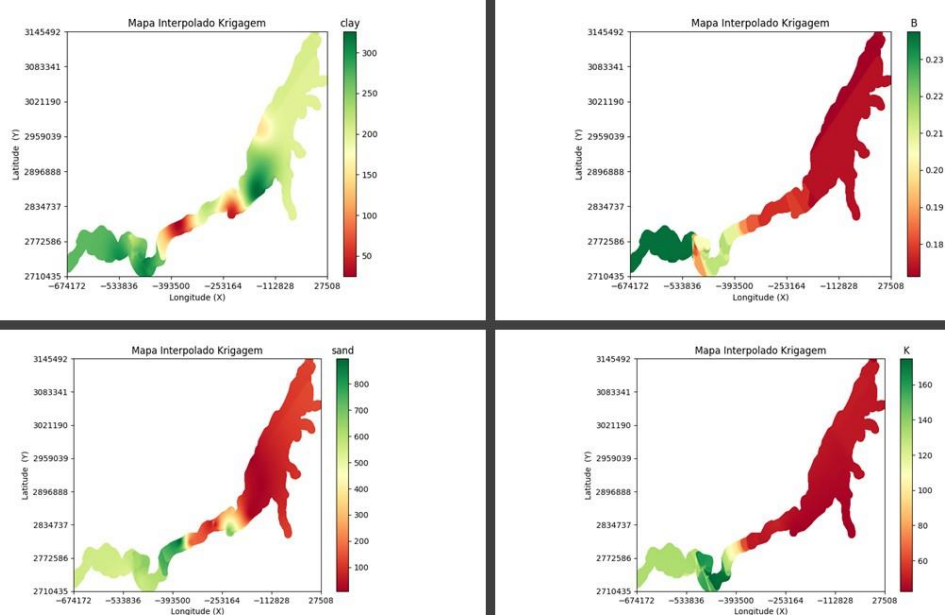


Figura 9. Mapas interpolado krigagem indicando a distribuição dos indicadores argila, boro, areia e potássio do solo nas florestas de várzea da calha do rio Amazonas

Essas correlações ajudam a entender como os diferentes componentes do solo variam espacialmente na floresta de várzea ao longo da calha do rio Amazonas. A análise geoestatística e a criação de mapas interpolados de krigagem com esses dados permitem visualizar essas variações de forma detalhada, proporcionando informações essenciais para o manejo sustentável e a conservação dos solos nessa região.

4- DISCUSSÃO

A dispersão dos dados normalizados e os pesos das variáveis foram semelhantes entre as amostras de solo de planície de inundação e de terra firme (Figura 2). Entretanto, houve maior discrepância entre as amostras de várzea, pois, embora as inundações sazonais ocorram regularmente nas áreas de várzea, as florestas alagadas apresentam características hidroquímicas e vegetativas diferentes (SIOLI, 1968), em decorrência de deposições originárias de diferentes regiões (PRANCE, 1976).

Melo et al., (2013), Farjado et al. (2009), Magalhães e Gomes (2013) e Lima et al. (2005) analisaram as propriedades químicas de solos com diferentes coberturas vegetais. Os valores de pH H₂O foram 5,38; 5,0; 6,3; e 4,84, respectivamente, mostrando a baixa acidez

natural dos solos nessas áreas. Vale ressaltar que as variações de pH causadas por inundações têm uma influência marcante na disponibilidade de nutrientes. O pH neutro do solo de várzea aumenta a disponibilidade de nutrientes em comparação com o solo de terra firme (MORAES, 1973).

Devido à heterogeneidade e hidromorfismo dos solos de várzea, as amostras diferiram muito em características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, sendo agrupadas em diferentes classes com diferentes limitações e usos (GOMES, et al. 2006; LIMA et al., 2007). Níveis elevados de Al^{3+} ($1,12 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) no solo limitam o desenvolvimento das plantas, conforme afirmado por Silva et al. (2018). O valor observado no presente estudo foi bem superior ao relatado por Farjado et al. (2009) e Magalhães e Gomes (2013), ou seja, 0,08 e 0,00 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, mas dentro da faixa de 0,19 a 2,50 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ descrita por Teixeira et al. (2019) e Lima et al. (2005) para vários tipos de solos de várzea. Abreu et al., (2007), ao avaliarem as propriedades químicas e físicas de um húmico Gleysol sob espécies forrageiras, argumentou que o Al é diretamente afetado pela condição hídrica do local, pois grandes quantidades de água levam a uma diminuição do Al.

Solos de várzea tinham altos níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} , conforme classificação de Brasil et al. (2020), com médias de 5,38 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 2,49 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ respectivamente. No entanto, os teores de nutrientes foram inferiores aos relatados por Teixeira et al. (2019), ou seja, 9,04–10,62 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3} \text{ Ca}^{2+}$ e 2,54–3,21 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3} \text{ Mg}^{2+}$; os mesmos valores foram relatados por Lima et al. (2005) e Junk (2020) em estudos sobre solos amazônicos submetidos a inundações. Segundo Lima et al. (2000), o acúmulo de Ca^{2+} e Mg^{2+} em solos de várzea pode estar relacionado à qualidade dos sedimentos depositados.

Considerando que 90% das amostras de várzea apresentaram textura intermediária, verificou-se que o teor de P do solo era muito alto (média de 51,5 mg dm^{-3}) de acordo com Brasil et al. (2020). Os valores estavam dentro da faixa (25 a 92 mg dm^{-3}) relatada por Teixeira et al. (2019) e Lima et al. (2005) para solos de várzea. Ounissi et al. (2014), ao avaliar os teores de P de dois estuários, constataram que os valores eram maiores em um local submetido a diferentes influências externas do que em um local sem influências externas. Magalhães e Gomes (2013) identificaram altos teores de P em solos de várzea da região do Baixo Solimões, Estado do Amazonas.

Para K^+ , os valores observados no presente estudo estiveram de acordo com os relatados por Teixeira et al. (2019) e Lima et al. (2005) (46–300 mg dm^{-3}). Farjado et al.

(2009) observaram um teor de K^+ de $320,62 \text{ mg dm}^{-3}$ em solos de várzea de florestas secundárias no Baixo Amazonas, confirmando a alta dispersão dos dados de K^+ para solos de várzea.

valores médios de BS e saturação de Al observados foram 64,94% e 12,37%, respectivamente. Esses valores indicam fertilidade do solo adequada, segundo Malavolta (1992), sendo semelhantes aos relatados por Teixeira et al. (2019) e Lima et al. (2005): BS = 68% e saturação de Al = 16%. Junk et al. (2020), em solos recentes de várzea de Marchantaria Island, observou alta BS (81–99%) e, conseqüentemente, baixa saturação de Al (1–15%), representando boas condições para solos de várzea. A fertilidade do solo é afetada pelo ambiente e pela contribuição dos sais dissolvidos na água para o complexo solo (SANTOS et al., 2018). Este fato foi corroborado pelas diferenças observadas entre amostras de planície de inundação e de terras altas.

A alta dispersão nas propriedades físicas do solo é explicada pelo fato de os solos de várzea serem sedimentares e sujeitos à remoção, transporte e deposição promovidos pelo ciclo da água (SILVA et al. 2018).

A utilização do QGIS 3.22 facilitou a manipulação e análise dos dados espaciais, promovendo um entendimento mais detalhado da distribuição dos indicadores químicos e físicos do solo. Este tipo de análise é essencial para a compreensão dos processos ecológicos e das influências ambientais na calha do rio Amazonas, proporcionando insights valiosos para a gestão sustentável dos recursos naturais na região.

CONCLUSÃO

Solos de várzea apresentaram alta variabilidade em propriedades químicas e físicas como resultado de diferenças nas descargas de sedimentos de tributários da bacia do rio Amazonas. As amostras de solo apresentaram teores intermediários de K, P, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn e Fe, demonstrando alta disponibilidade desses nutrientes em ecossistemas de várzea. No entanto, embora a maioria das amostras apresentasse altos teores de nutrientes, algumas apresentaram teores intermediários a baixos, mostrando que alguns nutrientes podem ser fatores limitantes para o crescimento das plantas. No geral, esses achados demonstram a heterogeneidade dos solos de várzea.

A análise multivariada permitiu comparar propriedades químicas e texturais entre solos de várzea e terras altas, e a matriz de correlação indicou maior sinergia entre propriedades de solo de várzea. Embora os solos de várzea tenham alta fertilidade, eles apresentam alta acidez e altos valores tóxicos de Al trocável, o que pode afetar o crescimento das raízes, o desenvolvimento das plantas, a disponibilidade de fosfato e a absorção de ferro.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento (PPGSND) da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) e ao Serviço Geológico do Brasil.

REFERÊNCIAS

- Abreu EMA, Fernandes AR, Ruivo MLP (2007). Variação temporal e vertical de atributos química de um gleissolo do rio Guamá cultivado com canaranas , Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa , v. 31, p. 277-285, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200010>.
- Afonso A, Barbosa C, Novo E (2011). Mudanças na qualidade da água em lagos de várzea em função do pulso de cheia do rio Amazonas: Lago Grande de Curuaí (Pará). Revista Brasileira de Biologia, v. 71, n. 3, pág. 1–10. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842011000400004>
- Alvares CA, Stape JL , Sentelhas PC, Gonçalves JL, De M, Sparovic G (2013). Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. Meteorologische Zeitschrift , Stuttgart, v.22, n.6, p.711–728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Barbarisi BF, Renó VF, Barbosa CC, Novo EMLM (2010). Integração de dados censitários e de sensoriamento remoto para estimar o rebanho bovino e bubalino da várzea do Baixo Amazonas. Em: Enner Herenio Alcântara , Evlyn márcia Leão de Moraes Novo e José Luiz Stech . (Org.). Novas Tecnologias para o Monitoramento e Estudo de Reservatórios Hidrelétricos e Grandes Lagos. 1ed.São José dos Campos: Parêntese Editora , v. 1, p. 257-273. Disponível em : < <https://docplayer.com.br/50776998-Novas-tecnologias-para-o-monitoramento-e-estudo-de-reservatorios-hidreletricos-e-grandes-lagos.html> > Acesso : Novembro 04, 2021.
- Bayley P, Petrere M (1989). Pescarias amazônicas: métodos de avaliação, situação atual e opções de manejo. Publicações especiais canadenses pescarias e ciências aquáticas 106: 385-98.

- Brasil EC, Cravo MS, Viégas IJM (2020). Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará e. – 2. ed. – Brasília, DF: Embrapa . Disponível em : <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1125022> Acesso : 15 de novembro de 2021.
- Chambers JQ, Tribuzy ES, Toledo LC, Crispin BF , Higuchi N, Santos JDos , Araújo AC, Kruijt B, Nobre AD, Trumbore SE (2004). Respiração de um ecossistema de floresta tropical: partição de fontes e eficiência de uso de baixo carbono. *Ecology Application*, v.14, n.4 (supl .), p.72-s88, 2004. <https://doi.org/10.1890/01-6012>
- Fageria NK (1989). Química de solos de várzea . Em: DECHEN, AR; CARMELLO, QA de C.; FLOSS, EL (Coord.). SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 2. Piracicaba. Anais. Campinas, Fundação Cargil, pág. 93-114.
- Fajardo JDV, Souza LAG, Alfaia SS, (2009). Características químicas de solos de várzeas sob diferentes sistemas de uso da terra, na calha dos rios baixo Solimões e médio Amazonas. *Acta amazônica* vol. 39(4), pág. 731 – 740. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000400001>
- Ferreira LV (1997). Efeitos da duração da inundação n / D riqueza de espécies e composição florística em três hectares no Parque Nacional do Jaú em florestas de várzea na Amazônia central. *Biodiversidade e Conservação* , 6(10):1353-1363.
- Ferreira SJF, Luizão FJ, Miranda SAF, Silva MSR, Vital ART (2006). Nutrientes n / D solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central foram atendidos seletiva de madeira. *Acta Amazônica* VOL. 36(1) pág. 59 – 68. 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000100008>
- Filizola N, Guyot JL (2011). fluxo de sedimentos em suspenso não rios da Amazônia. revista Brasileira de Geociências . Volume 41(4): 566-576. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414566576>
- Gomes PF (2000). Curso de estatística experimental. 14. ed. Piracicaba: Degaspari , 477p
- Gomes AS, Silva CAS, Parfitt JMB, Pauletto EA, Pinto LFS (2006). Caracterização de Indicadores da Qualidade do Solo, com Ênfase Como Áreas de Várzea do Rio Grande do Sul Pelotas: Embrapa Clima Temperado , 40 p. — (Embrapa Clima Temperado . Documentos , 169). Disponível em < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/746124/caracterizacao-de-indicadores-da-qualidade-do-solo-com-enfase-as-areas-de-varzea-do-rio-grande-do-sul>> Acesso : Dezembro 21,2021.
- Guimarães ST, Lima HN, Teixeira WG, Neves Junior AF, Silva FWR, Macedo RS, Souza KW (2013). Caracterização e classificação de Gleissolos da várzea do rio Solimões (Manacapuru

- e Iranduba), Amazonas, Brasil ., Revista Brasileira de Ciências do Solo 37 (2) • Abr. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200003>
- IUSS Grupo de Trabalho WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources (WRB), sistema universal reconhecido pela International Union of Soil Science (IUSS) e FAO. Disponível em : <<http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>>.
- Jamovi (2021). O projeto jamovi jamovi . (Versão 2.2) [Software de computador]. Recuperado de <https://www.jamovi.org>.
- Junk Wj , Krambeck Hj (2000). Clima e hidrologia. In: JUNK, WJ et al. A planície de inundação da Amazônia central: uso atual e opções para um manejo sustentável. Holanda: Backhuys Publishers, Leiden, p. 95-108.
- Junk WJ, Piedade MTF, Schöngart J, Cohn-Haft M, Adeney JM, Wittmann FA (2011). classificação das principais áreas úmidas de ocorrência natural na Amazônia. Zonas húmidas, v. 31, n. 4, pág. 623–640. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0190-7>
- Junk WJ, Piedade MTF, Wittmann F, Schongart J (2020) Várzeas Amazônicas : Desafios para um Manejo Sustentável . - Manaus: Editora do INPA. Disponível em <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/36480>>. acesso em Dezembro 22, 2021. See More
- Kottek M , Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006). Mapa- mundi da classificação climática de Köppen -Geiger atualizado. Meteorol . Zeitschr ., 15(3), 259–263.
- Lima HN, Teixeira WG, Souza KW (2007). Os solos da paisagem da várzea com ênfase no trecho entre Coari e Manaus. In: FRAXE, TJP; PEREIRA, HS & WITKOSKI, AC, organizadores. comunidades ribeirinhas amazônicas : Modos de vida e uso dos recursos naturais . Manaus, Universidade Federal do Amazonas, p.35-52. Disponível em < https://transforma.fbb.org.br/storage/socialtecnologias/24/files/comunidades_ribeirinhas_modos_de_vida_web.pdf> Acesso : Dezembro 21,2021.
- Lima HN, Mello JWV, Schaefer CEGR, Ker JC (2005). Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia à inundação . Acta amazônica . Vol. 35(3) 317 – 330. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000300003>
- Magalhães RC, Gomes RCM (2013). Mineralogia e química de solo de várzea e suas susceptibilidades no processo de terras caídas n / D comunidade do divino Espírito Santo-AM. Sociedade . & Natureza ., Uberlândia , 25 (3): 609-621. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300013>
- Malavolta E (1992). ABC da análise de solos e folhas : sugestão , interpretação e sugestões de adubação . São Paulo: Ceres, 124 p.
- Martinelli LA, Vitória RL, Damatte JLI , Richey JE, Devol AH (1993). Composição Química e Mineralógica de Sedimentos de Várzea do Rio Amazonas, Brasil. Geoquímica Aplicada, v. 8, n. 4, pág. 391–402. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(93\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(93)90007-4)

- Meade RH, Nordin Jr CF, Curtis WF, Costa Rodrigues FM, Do Vale CM, Edmond JM (1979). Transporte de sedimentos no rio Amazonas. *Acta Amazônica* . Vol. 9 (3). <https://doi.org/10.1590/1809-43921979093543>
- Melo NC, Souza LC, Costa CAS, Coelho R, Covre WP, Costa DLP (2013). Caracterização química de diferentes sistemas de uso do solo. *revista Agroecossistemas* , Belém , v. 5, n. 2, pág. 8-13. <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v5i2.1793>
- Montanher OC, Souza Filho E, Novo E, Barbosa CA (2014). produção de sedimentos em suspensão do rio Amazonas está mudando ? *REVISTA GEONORTE*, [S. 1.], v. 5, n. 20, pág. 17–23. Disponível em : www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1511. acesso em : 3 jan. 2022.
- Moraes JFV (1973). Efeitos da inundação do solo. II. Influência sobre uma absorção de nutrientes e crescimento de arroz (*Oryza sativa* L.). *pesquisa Agropecuária Brasileira* , Rio de Janeiro, v.8, n.7, p.103-108.
- Ounissi M, Ziouch OR, Aounallah O (2014). Variabilidade das concentrações de nutrientes dissolvidos (N, P, Si) na Baía de Annaba em relação às entradas dos estuários de Seybouse e Mafragh . *Marine Pollution Bulletin* , Amsterdam, v. 80, n. 1-2, pág. 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.030>
- Parolin P, Lucas C, Piedade MTD, Wittmann F (2010). Respostas à seca de árvores tolerantes a inundações em várzeas amazônicas. *Annals of Botany* 105: 129–139. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp258>.
- Prance GT, Rodrigues WA, da Silva MF (1976). inventário florestal de um hectare de mata de terra firme km 30 da Estrada Manaus - Itacoatiara . *Acta Amazônica* , 6(1):9-35.
- Queiroz MMA, Horbe AMC, Moura CAV (2011). Mineralogia e química dos sedimentos de fundo do médio e baixo Madeira e de seus principais tributários : Amazonas – Brasil . *Acta Amazônica* . 41 (4). <https://doi.org/10.1590/S0044-59672011000400003>
- Equipe Núcleo R (2021). R: Linguagem e ambiente para computação estatística. (Versão 4.0) [Software de computador]. Recuperado de <https://cran.r-project.org>. (Pacotes R recuperados do instantâneo MRAN 2021-04-01).
- Renó V, Novo E (2015). alterações da cobertura florestal de várzea e seus efeitos no bem-estar das pessoas ribeirinhas do Estado do Pará: uma análise exploratória com dados sociodemográficos . *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, Brasil , 25 a 29 de abril de 2015, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em : < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0562.pdf>> Acesso em Dezembro 22, 2021. See More

- Santos HG et al (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa . Disponível em < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>> acesso : 15 de novembro de 2021.
- Silva SB, Galvão JR, Pastana JC, Silva DR, Almeida KC, Souza FJL, Nascimento ISB (2018). Influência das águas do estuário do Rio Pará na fertilidade do solo das ilhas de várzea em Belém , Pará, Biotemas , 31 (4): 15-21. <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7925.2018v31n4p15>
- Silva GJ, Neves SMAS, De Paula WCS, Da Silva VN (2017). Relação da cobertura vegetal e uso do solo com o ndvi e a temperatura superficial da área não inundável do pantanal de Cáceres / MT . Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada.vIi. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2244>
- Silva LS, Ranno SK (2005). calagem em solos de várzea e disponibilidade de nutrientes n / D solução do solo após o alagamento . Ciência Rural, Santa Maria, v35, n.5, p.1054-1061, set-out, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000500011>
- Sioli H (1968). Hidroquímica e geologia no Brasil região amazônica . Amazonas, 1: 267-277.
- Sioli H (1984). A Amazônia e seus principais afluentes : hidrografia, morfologia dos cursos dos rios e tipos de rios. In: Sioli , H. (ed) A Amazônia - Limnologia e ecologia da paisagem de um poderoso rio tropical e sua bacia. Porcaria. Dordrecht. Holanda, pp. 127-166.
- Singh BR, Steinnes E (1994). Contaminação do solo e da água por metais pesados. In: LAI, R. & STEWART, BA, eds. Avanços na ciência do solo: processo do solo e qualidade da água. Lewis. p.233-237.
- Teixeira WG, Lima HN, Pinto WHA, Souza KW, Shinzato E (2019). O manejo do solo nas várzeas da Amazônia G. in: Manejo e Conservação do Solo e da Água eds. I. Bertol , IC De Maria, LS Souza. pp.701-728. Editora : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Vale Júnior JF, Souza MIL, Nascimento PPRR, Cruz DLS (2011). Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável . revista Agro@mbiente On-line, v. 5, n. 2, p.158-165. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v5i2.562>
- Victoria RL, Martinelli LA, Richey JE, Forsberg BR (1989). Variações espaciais e temporais na química do solo na planície de inundação amazônica. Geojournal , 19(1): 45-52.
- Wittmanna F, Junk JW , Piedade MTF (2004). As florestas de várzea na Amazônia: inundações e a geomorfologia altamente dinâmica interagem com a sucessão florestal natural. Forest Ecology and Management 196, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.060>

**CAPÍTULO III- ANÁLISE DA QUALIDADE DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS
DE VÁRZEA COM DIFERENTES USO E MANEJO NO MUNICÍPIO DE
SANTARÉM-PA, BRASIL.**

ANÁLISE DA QUALIDADE DO SOLO EM AGROECOSSISTEMA DE VÁRZEA COM DIFERENTES USO E MANEJO NO MUNICÍPIO DE SANTARÉM-PA, BRASIL.

Avner Brasileiro dos Santos GASPAR¹, Diego Pereira BEZERRA², Matheus Alves de SOUZA³, Jose Mauro de Sousa⁴, Iolanda Maria Soares REIS³, Rodrigo da SILVA^{1,2},

¹ Pós-graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento (PPGSND), Instituto de Biodiversidade e Florestas (IBEF), Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém-PA, Brasil;

² Instituto de Engenharia e Geociências (IEG), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil;

³ Instituto de Biodiversidade e Florestas (IBEF), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil;

⁴ Instituto de Formação Interdisciplinar e Intercultural (CFI), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil

RESUMO: Várzeas amazônicas, em sua maioria, são áreas consideradas aptas para a prática agrícola, uma vez que o regime de inundação favorece esse tipo de agroecossistema, pois são áreas com uma boa fertilização natural. Contudo, avaliar e monitorar as mudanças na qualidade e saúde do solo induzidas por essas práticas de uso e manejo da terra é essencial para ajudar a identificar estratégias de mitigação dos impactos ambientais para alcançar sistemas agrícolas mais sustentáveis, portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a através de análise multivariada a qualidade do solo com diferentes usos e manejo agrícola em agroecossistemas de várzeas. Foram coletadas amostras de solo em três tipos de uso do solo, floresta de várzea, agricultura tradicional de corte e queima e agricultura convencional, um total de 42 amostras em quatro comunidades de várzea de Santarém-PA, Brasil. Os resultados dos indicadores de qualidade do solo foram submetidos a análise multivariada e identificou-se diferenças significativas entre os manejos analisados e as variáveis associadas a biologia do solo. O manejo influenciou diretamente as qualidades física, químicas, biológicas. O manejo tradicional foi o manejo que mais se aproxima das altas fertilidade do manejo convencional mantendo característica da biologia do solo encontrada da floresta.

PALAVRAS-CHAVE: Fertilidade do solo, sustentabilidade, agricultura de várzea, planícies inundação.

ABSTRACT: Most of the Amazon floodplains are areas considered suitable for agricultural practice, since the flood regime favors this type of agroecosystem, as they are areas with good natural fertilization. However, assessing and monitoring changes in soil quality and health induced by these land use and management practices is essential to help identify strategies to mitigate environmental impacts to achieve more sustainable agricultural systems, therefore, the objective of this work was to evaluate a through multivariate analysis the soil quality with different uses and agricultural management in floodplain agroecosystems. Soil samples were collected in three types of land use, floodplain forest, traditional slash and burn agriculture and conventional agriculture, a total of 42 samples in four floodplain communities in Santarém-PA, Brazil. The results of the soil quality indicators were submitted to multivariate analysis and significant differences were identified between the analyzed managements and the variables associated with soil biology. The handling directly influenced the physical, chemical, biological qualities. Traditional management was the management that came closest to the high fertility of conventional management, maintaining the characteristics of the soil biology found in the forest.

KEYWORDS: Soil fertility, sustainability, lowland agriculture, flood plains.

INTRODUÇÃO:

Atividades agrícolas devem ser consideradas ecossistemas ou agroecossistemas e otimizados como um todo, ou seja, considerando a estabilidade, sustentabilidade ecológica e produção econômica, portanto, agricultura sustentável é caracterizada por Altieri & Nicholls (2002), como o modo de fazer agricultura que busca assegurar produtividade sustentada em longo prazo com o uso de práticas de manejo ecologicamente seguros.

Os impactos ambientais da agricultura incluem aqueles causados pela expansão onde as terras agrícolas e pastagens se estendem para novas áreas, substituindo os ecossistemas naturais, além de impactos causados pela intensificação quando as terras existentes são manejadas para serem mais produtivas, muitas vezes usando irrigação, fertilizantes, biocidas e mecanização pesada (FOLEY et al., 2011).

Ao considerar a agricultura em áreas de várzea, a qual representa 2% da extensão da floresta amazônica (JUNK, 2020) e sofre dinâmica sazonal de inundação e uma drástica variação do tipo de solo no ambiente de várzea (ZARIN; DUCHESNE; HIRAOKA, 1998), temos uma agricultura como atividade complementar, voltada principalmente para subsistência, com menores áreas de cultivo, maior período de utilização consecutiva de uma mesma área e menor tempo de pousio, pois à vocação produtiva das famílias é em sua maioria pesca (RICHERS, 2010).

A inundação das florestas, áreas habitadas e cultivadas devido águas brancas, ricas em sedimentos e nutrientes oriundos das montanhas andinas, permite a deposição de cerca de 20cm de solo anualmente (PIÑEDO-VASQUEZ, 1999) garantindo uma fertilização natural das áreas de várzea, condicionando a sustentabilidade de práticas agrícolas. Segundo Richers (2010), agricultores que habitam a região de várzea costumam utilizar consecutivamente uma mesma área de plantio de mandioca por 6,5 anos em média (“replantar”) (ARAÚJO et al., 2012).

Indicadores de qualidade do solo são utilizados para a caracterização e monitoramento de agroecossistemas (NICHOLLS et al. 2004), de forma que do ponto de vista ambiental, a promoção da sustentabilidade de um agroecossistema depende basicamente de que seu manejo leve à otimização de processos como a disponibilidade e equilíbrio no fluxo de nutrientes, proteção e conservação da superfície do solo, preservação e integração da biodiversidade e exploração da adaptabilidade e complementaridade no uso

dos recursos genéticos vegetais e animais (VEZZANI & MIELNICZUK; FERNANDES, et. Al.,2009).

Análises química, físicas e biológicas do solo são as principais ferramentas para tomada de decisão na avaliação da qualidade do solo Carvalho (2016) e o monitoramento das áreas de várzea é indispensável para o manejo adequado e conseqüentemente a minimização dos impactos causados pela agricultura. Neste contexto, a análise química, física e biológica do solo, são importantes indicadores de qualidade do solo, e quando avaliados de forma simultânea permite identificar quais as práticas de uso são mais sustentáveis (CHERUBIN et al., 2015).

A técnica de análise multivariada de dados possibilita explicar o máximo de intercorrelação entre as variáveis e descobrir quais delas contribuem mais para a caracterização e, ou, alteração do solo (OLIVEIRA et al., 2015). Para análise simultânea de muitas informações, esta técnica torna-se a melhor ferramenta, possibilitando obter dados e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da análise estatística univariada (CRUZ & REGAZZI, 2001).

A partir da hipótese de que o manejo aplicado ao agroecossistema de várzea associado ao frequentes regime de inundação alteram a qualidade do solo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade dos indicadores químicos, físicos, biológicos do solo com diferentes usos e manejo agrícola no agroecossistema de várzea, Santarém-PA, Brasil.

2-MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende as comunidades Piracãoera de baixo, Pixuna do tapará, Costa do Aritapera e Arapixuna, localizadas em áreas de várzea no Município de Santarém/Pará-Brasil (Figura-1), sendo as atividades agrícolas desenvolvidas no período de “baixa das águas” entre os meses de agosto a novembro Junk (2020).

O período de cheia e seca foram definido pelo valor médio (considerando um desvio padrão), dos níveis máximos e mínimos (2018-2021), respectivamente, e os períodos de enchente e vazante são os períodos entre estas fases conforme, proposta de Piedade et al.

(2019), sendo que a ocorrência temporal das fases pode variar em outras regiões da Bacia Amazônica (JUNK et al., 2011, 2014).

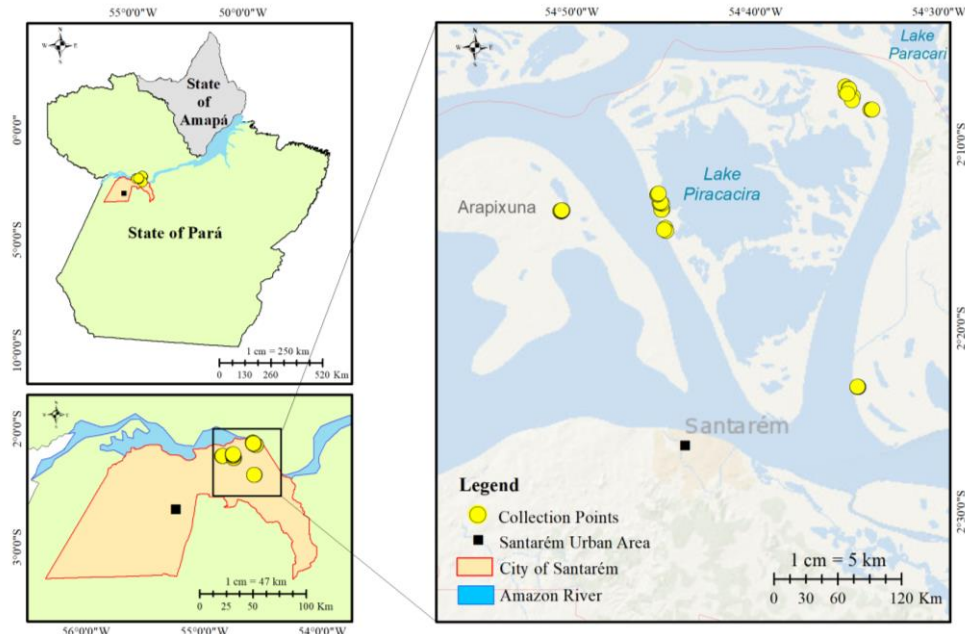


Figura 1: Mapa de localização das área de estudo em Santarém-PA, Brasil.

Fonte: Autores.

De acordo com Kottek et al. (2006), com base na classificação de Köppen - Geiger, o tipo climático da região é o Am (Tropical de monção). A umidade relativa média é de 85%, temperatura média anual de 26°C, compreendendo duas estações no ano, a seca com precipitação de aproximadamente 100 mm ao mês, e a chuvosa com precipitação acima de 200 mm por mês, iniciando no mês de dezembro (Figura 2) (CHAMBERS et al., 2004; ALVARES et al., 2013).

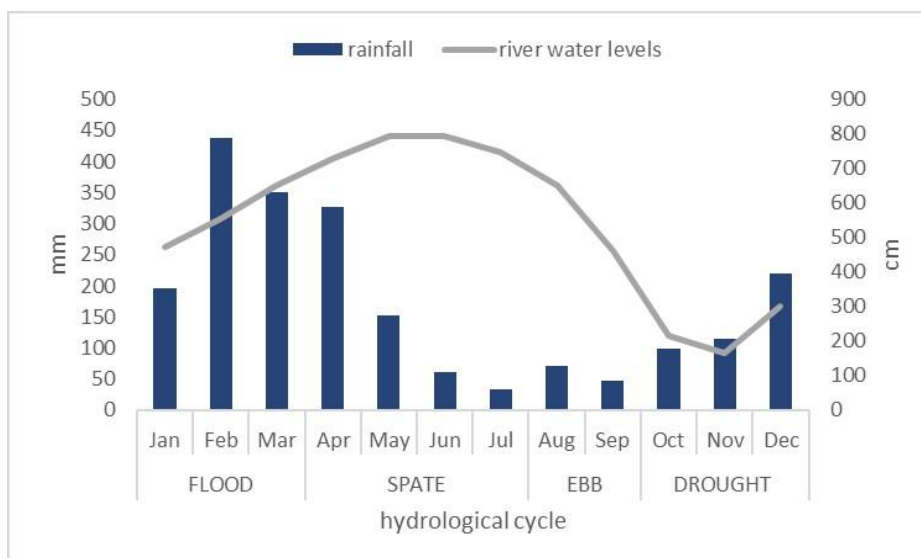


Figura 2: Variações do nível da água do Rio Amazonas monitorado no Porto Óbidos-PA mostrando um pulso monomodal de inundação e indicando quatro períodos (enchente, cheia, vazante e seca); Precipitação média da estação meteorológica monitorada no Porto de Óbidos-PA para o período 2018-2021 (dados: Agência Nacional de Águas-ANA).

Fonte: Autores.

2.2 Diagnostico das áreas

Foi realizado um diagnostico participativo das áreas de estudo, afim de definir o tipo de manejo principal empregado e quais as principais culturas trabalhadas nas áreas de estudo, conforme as descrições de agricultura propostas por Córdova e León (2013), Pérez Botho et. al (2015) e Altieri (1999).

Ao final, os resultados do diagnóstico participativos apresentaram dois tipos de manejos predominante nas áreas estudadas: 1º - Agricultura convencional (CA) com uso de adubo químico, roçagem mecânica e defensivos agrícolas características de um proposta tecnológica da chamada Revolução Verde conforme os descritos por Córdova e León (2013) e 2º Agricultura tradicional (LBF), itinerante de corte e queima conforme descrito por Pérez Botho et. al (2015) e Altieri (1999). As areas estudadas são ocupadas principalmente com plantios de ciclo curto feijão caupi, arroz, milho, melancia, em espaços de até 1 hectare.

2.3 Coleta e análise da qualidade do solo

Foi realizada uma avaliação da qualidade do solo e através da quantificação de 30 indicadores físicos, químicos do solo, realizados em laboratório. Um total de 42 Amostras compostas de solo foram coletadas, entre os meses de setembro e outubro de 2021, na profundidade 0-10 cm, distribuídas nos agroecossistemas de várzea e em um fragmento de floresta de várzea, utilizado como controle.

Os indicadores químicos avaliados são o pH, Al, Ca, Mg, K, P, C, N total, Zn, Cu, Fe e Mn. O pH do solo foi determinado em H₂O na proporção solo: solução de 1:2,5. Os cátions Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, foram extraídos com KCl 1N e o P, K⁺, Zn, Cu, Fe e Mn foram extraídos com extrator duplo ácido (H₂SO₄ 0,0125 M + HCl 0,05 M) e determinados por um espectrofotômetro de absorção atômica. Além disso foram calculados: Capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). Os indicadores físicos avaliados são granulometria e densidade do solo. Todas as análises procederam-se de acordo com os métodos descritos em Teixeira et al. (2017).

Os seguintes indicadores biológicos foram avaliados: atividade microbiana (respiração basal do solo) determinada pela liberação de CO₂ por 21 dias de incubação, seguindo a metodologia descrita por ALEF e NANNIPIERI (1995), cujo princípio do método consiste na captura de CO₂ liberado da respiração microbiana pela solução de NaOH e formação de Na₂CO₃. O carbono da biomassa microbiana (C_{mic}) foi determinado após fumigação e incubação com clorofórmio, método descrito em JENKINSON e LADD, (1981). COT- carbono orgânico total foi determinado pelo pela oxidação com o dicromato de potássio da amostra de solo úmida, métodos descritos Teixeira et. al. (2017), além do mais, foram calculados o quociente metabólico (qCO₂), que representa a quantidade de C-CO₂ evoluído por unidade de C microbiano, calculado quociente microbiano(qMIC) e o estoque de carbono no solo (CSS).

2.4 Análise de Dados

Os resultados analíticos das análises foram submetidos a análise descritiva, teste de normalidade e considerando a estrutura multivariada contida nos dados foram empregadas técnicas estatísticas para verificar semelhanças entre os grupos (tipo de uso e manejo) na tentativa de agrupá-los usando-se os atributos físicos, químicos e biológicos. Os dados

foram padronizados (média zero e variância um) para assegurar que todas as variáveis contribuam igualmente para o modelo.

Adotou-se um delineamento experimental em blocos ao acaso, com 3 tratamentos (FF-Floresta de Varzea; LBF- Agricultura de corte e queima; CA- Agricultura convencional) com 14 repetições cada. Afim de evitar multicolinearidade, apenas 24 variáveis foram submetidos a análise de variância Manova, que é um teste que analisa a relação entre diversas variáveis de resposta e um conjunto comum de preditores ao mesmo tempo. A análise de agrupamento foi complementada com a de componentes principais-PCA, para obter um conjunto menor de combinações, além disso, esta análise possibilita avaliar as características de cada área e verificar as variáveis que mais estão relacionadas com cada uma das áreas.

3-Resultados

3.1 Análises descritivas e análises de variância dos atributos de solo de várzea.

A análise de variância (ANOVA) dos 30 indicadores, físico químicos e biológicos dos solos analisados apresentaram diferenças significativas a 0,1 e 5 % entre as áreas avaliadas, com exceção apenas dos indicadores do matéria orgânica (om), potássio, soma de bases, areia total, carbono orgânico total e o quociente metabólico que não apresentaram diferenças significativas entre os ambientes, um indicativo que o tipo de manejo empregado não altera esses atributos do solo em áreas que sofrem com pulso de inundação como as várzeas (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de variância de atributos físico, químicos e biológicos de qualidade solo em agroecossistemas de várzea com diferentes manejos

Atributos	Área			Anova
	FF	LBF	CA	p
pH H ₂ O	4,71b	5,06b	5,75a	< 0,001***
pH CaCl ₂	4,31c	4,63b	5,28a	<0,001***
OM (g.kg)	16,79	16,79	13,71	0,101 n.s
P (mg.dm ³)	12,49c	97,73b	132,39a	<0,001***
S (mg.dm ³)	13,76b	26,88a	11,76b	<0,001***
K (mg.dm ³)	112,93	153,21	172,36	0,111 n.s
Ca (cmol.dm ³)	5,22b	6,43a	5,95ab	0,012*

Mg (cmol.dm ³)	3,15a	2,02b	1,91b	< 0,001***
Al (cmol.dm ³)	2,12a	0,44b	0,06b	< 0,001***
H+Al (cmol.dm ³)	5,84a	3,22b	1,67c	< 0,001***
SB (cmol.dm ³)	8,67	8,84	8,3	0,464 ns
CTC_p (cmol.dm ³)	14,51a	12,06b	9,97c	< 0,001***
CTC_e (cmol.dm ³)	10,79a	9,27b	8,35b	< 0,001***
BS %	59,93c	73,43b	83,21a	< 0,001***
Al sat. %	18,93a	4,71b	0,57b	< 0,001***
B (mg.dm ³)	0,25a	0,19b	0,18b	< 0,001***
Cu (mg.dm ³)	4,82a	2,7b	1,92b	< 0,001***
Fe (mg.dm ³)	284a	179,5b	103,93c	< 0,001***
Mn (mg.dm ³)	58,33a	26,19b	10,62b	< 0,001***
Zn (mg.dm ³)	5,07a	2,91b	1,81b	< 0,001***
Argila (g kg ⁻¹)	273,8a	261,4a	204,2b	0,006**
Silte (g kg ⁻¹)	172,93ab	137,8b	194,2a	0,02*
Areia (g kg ⁻¹)	553,21	600,71	601,43	0,311n.s
COT (g.kg)	9,74	9,74	7,95	0,101n.s
Cmic (ug/g)	321,57a	156,6b	123,7b	< 0,001***
RSB (mg CO ² / kg Solo/acumulado)	499,16a	238,5b	260,2b	< 0,001***
qMic %	3,54a	1,66b	1,62b	< 0,001***
qCO ² %	8,60	7,58	10,02	0,139 n.s
Ds (g/cm ³)	1,02b	1,06a	1,02b	0,002**
CSS (mg.C/há ¹)	9,85ab	10,29a	8,1b	0,049*

Fonte: Os autores, 2023.

FF- Floodland forest (floresta de várzea) , LBF- lash-and-burn farming (agricultura de corte e queima), CA- Conventional Agriculture (agricultura convencional), SB-Soma de Base; BS- Saturação de base; COT- Total organic carbono; Cmic- Microbial biomass carbono;- RSB - basal soil respiration; qMic-microbial quotient; qCO² - metabolic quotient; Ds- densidade do solo; Carbon stock in the soil -CSS; . * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001, n.s – Não significativo Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Indicadores químicos ligados a fertilidade do solo como saturação de bases foram mais expressivos em ambientes de agricultura com algum tipo de manejo, que no ambiente de floresta de várzea, com destaque para V%, P e pH do solo variáveis ligadas diretamente ao manejo do solo uso de calcário e adubação química. Os tipos de sistema de manejo também influenciaram significativamente as concentrações de alumínio, acidez potencial e saturação de alumínio.

Os valores médios de todos os micronutrientes avaliados, foram maiores em áreas de floresta de várzea que nas áreas com algum tipo de sistema de manejo, indicando que o sistema de manejo afetou negativamente os micronutrientes, além disso, as concentrações médias de micronutriente no sistema convencional apresentaram teores menores que nos outros ambientes estudados.

Os indicadores biológicos avaliados tiveram expressiva diminuição quanto comparado ao ambiente de floresta de várzea, com exceção do qCO_2 que mesmo não apresentando diferenças significativas entre as áreas, apresentou seu valor médio maior no sistema de manejo convencional do solo.

Os teores de OM e COT no solo de várzea não sofreram influência do tipo de manejo empregados no solo, ou seja, são similares entre as áreas e os valores de C_{mic} e o q_{mic} , que são significativamente maiores em áreas de floresta de várzea comparados a áreas com algum tipo manejo, o que confere aos ambientes manejados menor eficiência no uso de compostos orgânicos, além disso o sistema convencional teve influência direta nos teores de estoque de carbono no solo.

Entre os indicadores físicos avaliados apenas a areia não apresentou diferenças significativas e apesar de os teores de densidade do solo apresentarem diferenças significativas entre as áreas, apenas o manejo tradicional de corte e queima afetou os valores de densidade do solo, indicando influência direta neste indicador.

3.2 Análise de multivariada dos indicadores de qualidade do solo

Em uma avaliação da análise multivariada de variância (MANOVA) dos ambientes estudados, através do teste de trace de pillai, obteve-se diferença significativa dos ambientes quando avaliado simultaneamente as variáveis, indicando que os manejos empregados na agricultura de várzea influenciam na qualidade dos indicadores quando comparados com um ambiente controle.

Para a análise de agrupamento hierárquico (Figura 3), foi admitido uma distância euclidiana de 19 que permitiu ordenar as amostras em dois grupos, o G1-Florestas de várzea, que englobam amostra de solos com similaridade nos valores de teor de argila, m%, $H+Al$, Al^{3+} , concentrações dos micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn e atributos biológicos, enquanto o G2- Sistemas manejados tem seu agrupamento conduzido principalmente pelos atributos, silte, DS, areia, pH, V% , qCO_2 .

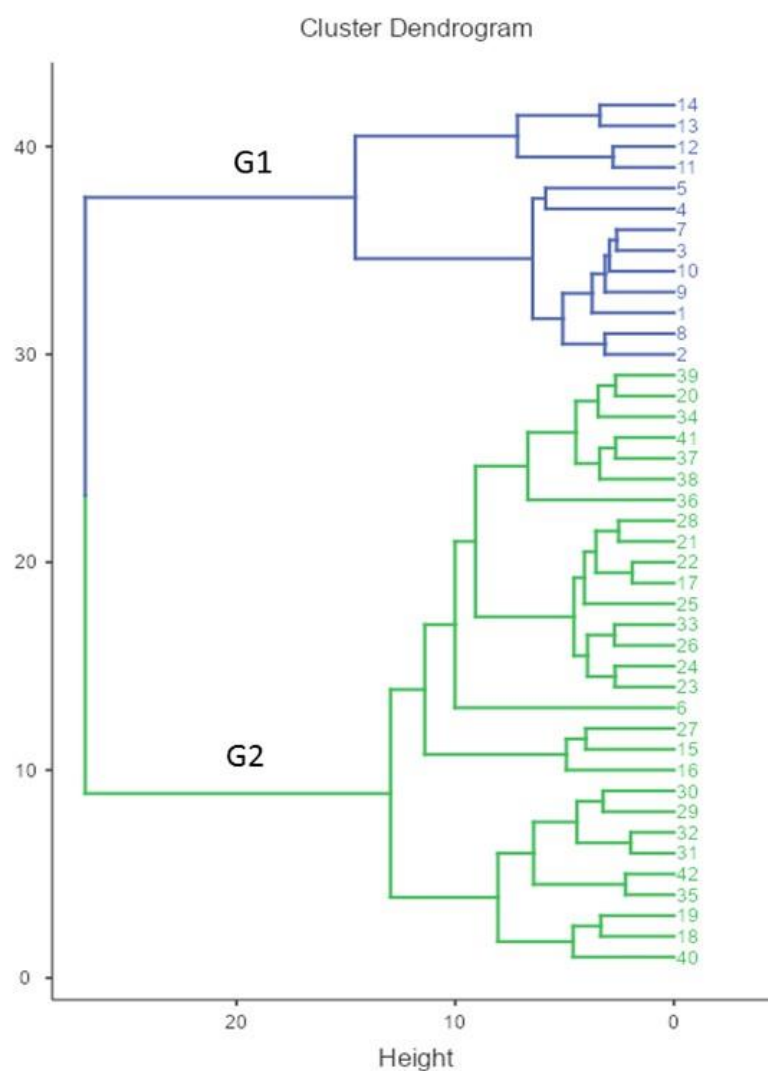


Figura 3: Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis analisadas. G1- Floodland florest (Floresta de varzea) G2-. LBF- lash-and-burn farming (agricultura de corte e queima), CA- Conventional Agriculture (agricultura convencional)

Fonte: Autores.

As amostras de floresta de várzea tiveram seu agrupamento influenciado principalmente pelos indicadores biológicos matéria orgânica, estoque de carbono no solo, carbono da biomassa ligados a cadeia do carbono e parte viva do solo, enquanto as áreas com manejo foram agrupados por similaridades em variáveis ligadas diretamente com a fertilidade do solo, V%, pH, P e pelo efeito do manejo Densidade do solo (DS).

Dos 23 indicadores de qualidade de solo avaliados apenas 2 não contribuíram na análise de componente principal K e S, que numa visão multivariada dos ambientes esses dois indicadores tiveram o mesmo peso em todos os ambientes (Figura 4). Os dois

componentes principais (CPs) descreveram juntos 58,6% da variância total no conjunto de dados. PC1 explicou 47% e as variáveis de maior peso foram V%, Fe, e H+Al, enquanto a PC2 explicou 11,6% da variância total no conjunto de dados e as variáveis com maiores pesos foram os teores de OM, silte e areia.

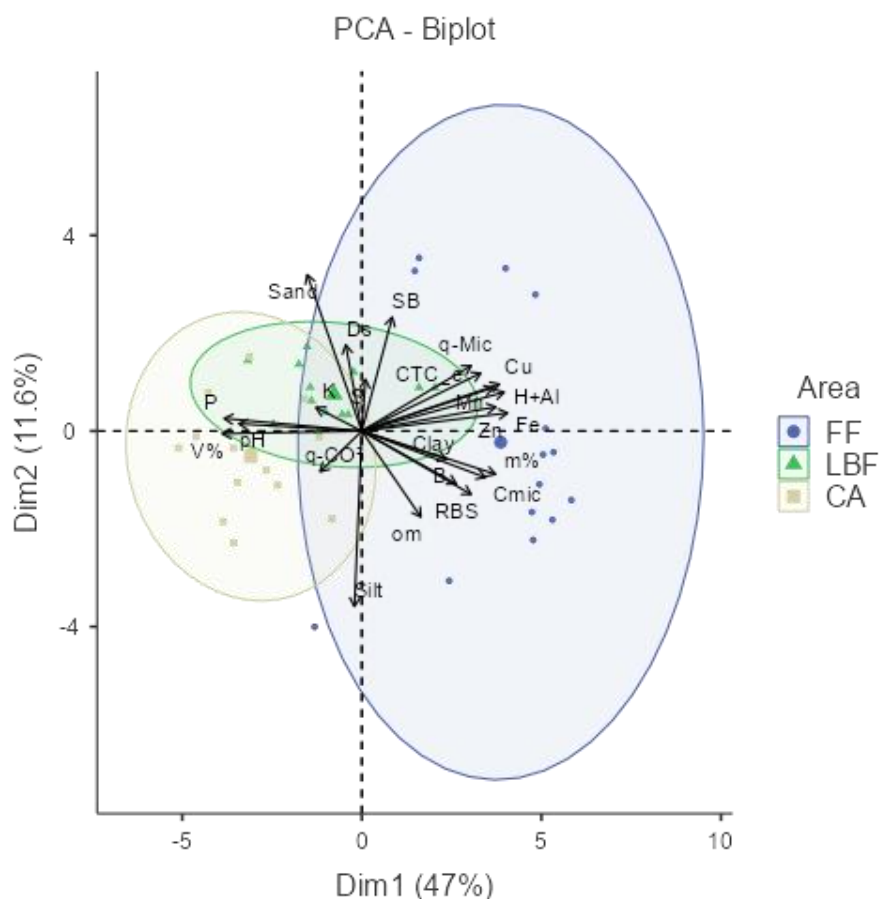


Figura 4: Análise de componentes principais da qualidade do solo em agroecossistema de várzea FF- Floodland forest (floresta de várzea), LBF- lash-and-burn farming (agricultura de corte e queima), CA- Conventional Agriculture (agricultura convencional)
Fonte: Autores.

Áreas de agricultura com o sistema de manejo tradicional de corte e queima se colocaram na interseção entre os outros dois ambientes, indicando que apesar do manejo de queima há contribuição tanto das variáveis químicas, predominante na área com agricultura convencional e ligadas a fertilidade do solo, quanto as variáveis biológicas predominantes em áreas de floresta de várzea e ligadas ao ciclo do carbono e a vida solo.

A matrix de correlação (Figura 5) indica como é a sinergia dos indicadores físico, químico s e biológico em cada ambiente analisado. A floresta de várzea tratar de um ambiente sem manejo, logo, os teores de matéria orgânica demonstraram correlações positivas

significativas com K, Cmic, RBS e CSS, indicando que aumentam ou diminuem conforma a alteração da matéria orgânica o solo nesse ambiente.

Os solos dos agroecossistemas de várzea manejados sofrem a perturbação antrópicas, com o revolvimento do solo por maquinários, o corte e queima de vegetação, a aplicação de adubos e defensivos químicos, portanto, apresentaram mais correlações significativas quando comparado aos solos de floresta de várzea.

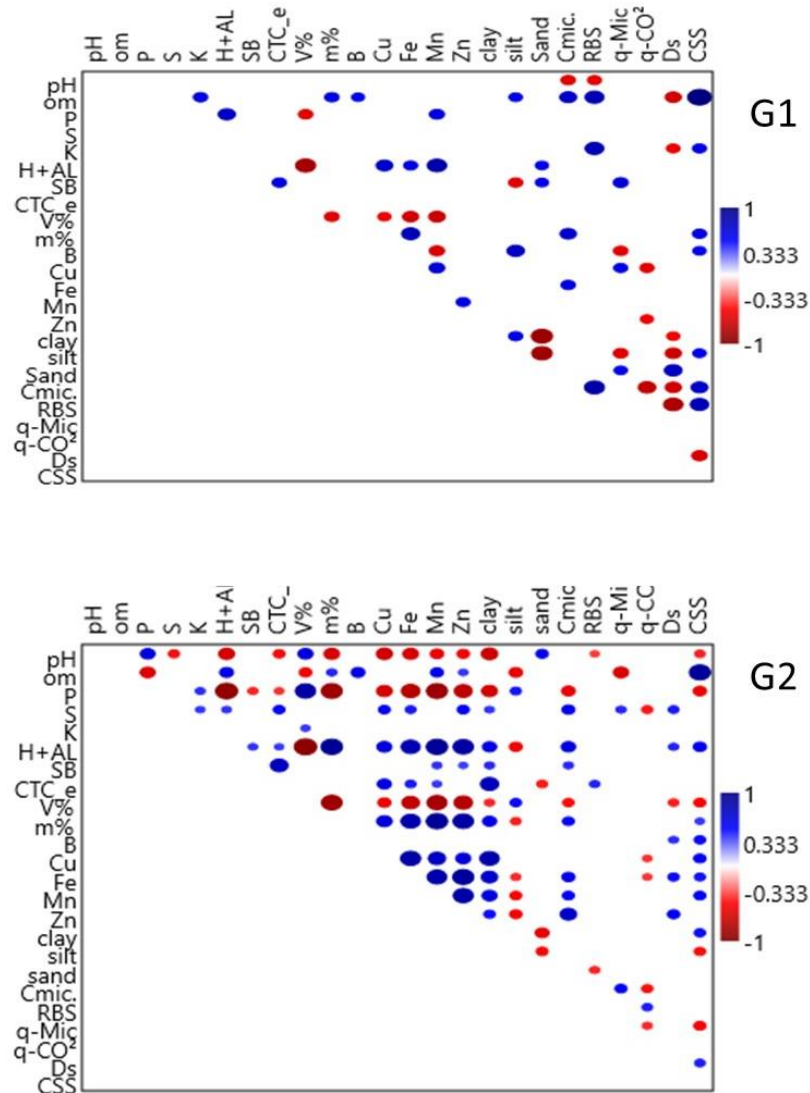


Figura 4: Matrix de correlação de Spearman dos indicadores de qualidade do solo em agroecossistemas de várzea G1- Floodland forest (Floresta de várzea)ç G2-. LBF- lash-and-burn farming (agricultura de corte e queima), CA- Conventional Agriculture (agricultura convencional)
Fonte: Autores.

Em áreas com sistema manejo da agricultura a sinergia dos indicadores é maior entre as variáveis ligados a fertilidade do solo e aos micronutrientes. A saturação de bases teve

correções positivas com os teores do macronutriente P e K, contudo apresentou correlação negativa com todos os micronutrientes avaliados nos sistemas manejados.

Os teores de Enxofre tiveram influência positiva e negativa no q_{Mic} e q_{CO_2} , respectivamente, enquanto que os valores q_{Mic} e q_{CO_2} apresentaram correlação negativa significativa, indicando que quanto mais eficiente for a incorporação de C no tecido microbiano, menor é a perda de carbono como CO_2 , pela respiração do solo.

DISCUSSÃO

A análise multivariada através da manova, possibilitou verificar a existência de diferenças significativas entre as áreas estudadas e a análise de componentes principal, de forma clara, evidenciou a ligação ou as alterações no solo, quando se aplica um manejo específico, além disso, possibilitou o agrupamento das áreas, evidenciando, que estas possuem diferenças em relação aos atributos analisados, além de apontar as variáveis mais representativas em cada área.

Os atributos químicos e biológicos sofrem alteração no momento em que a supressão vegetação nativa é convertida em pastagem ou cultivo de grãos (CARNEIRO et al. 2009), além disso, segundo Costa et al. (2006), ocorrem efeitos diferenciados nos atributos físicos em função do tipo de manejo adotado, o que pode acarretar interferência na estrutura do solo, promovendo redução do volume total de poros e compactações subsuperficiais reduzindo a produtividade das culturas (LOURENTE et al., 2011).

A saturação por bases (V%) natural do solo de floresta de várzea é semelhante aos descritos por Gaspar et al. (2023) e o manejo tradicional de corte e queima e o manejo convencional com uso de adubação química proporcionou valores elevados de V% nesses dois ambientes, agrupando esses dois ambiente por similaridade, resultado semelhantes aos de Oliveira et al (2015), ao caracterizar solos sob diferentes usos na região sul do estado do Amazonas, Brasil, sendo um indicativo, de que o manejo pode influenciar neste comportamento causando grandes alterações no solo.

Apesar de sistemas de manejo que preconizam a mobilização do solo diminuem a matéria orgânica do solo (CHERUBIN et al., 2015; BODDEY et al., 2010), o tipo de uso e manejo não alterou significativamente teores de matéria orgânica, carbono orgânico total, potássio no solo entre as áreas estudadas, fato importantes para a qualidade do solo. Richers (2010) ao estudar agricultura migratória em ambiente de várzea afirmou que devido a

fertilização natural, causada pelo pulso de inundação, a agricultura em várzea tem menor impacto ambiental e menor tempo de pousio e maior tempo de uso de uma mesma área.

O quociente microbiano representa a relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total, ou seja, a eficiência dos microrganismos na utilização dos compostos orgânicos (SILVA et al., 2010) e o quociente metabólico (qCO^2) quanto de CO^2 é liberado pela biomassa microbiana em função do tempo, representando a taxa de respiração específica da biomassa microbiana (ALVES et al., 2011).

O manejo do solo pode afetar o teor de matéria orgânica do solo, que por sua vez influencia diretamente suas propriedades físicas (AZIZSOLTANI et al. 2019 ; DLAPA et al. 2020), além de levar a um rápido declínio deste carbono, colaborando para o aumento das emissões de CO^2 à atmosfera (LAL, 1999,) onde os maiores valores de qCO^2 indicam que a população microbiana está consumindo mais carbono oxidável para sua manutenção (ANDERSON & DOMSCH, 1993; DIAS-JÚNIOR et al., 1998).

Ao avaliar efeito do tipo de manejo nos atributos biológico do solo, Dadalto et al. (2015) e Alves et al. (2011), observaram que os valores de respiração basal e carbono da biomassa microbiana não apresentaram diferenças significativas entre as áreas manejadas, indicando que o manejo não influenciou esses atributos (LOURENTE et al., 2011), NEVES et al. (2009) apresentaram valores de CBM para o cerrado nativo da ordem de $1.498 \mu g g^{-1}$, nas camadas superficiais, valor superior as medias de $321.57 \mu g g^{-1}$ descritos por Gaspar et. al. (2023), para floresta de várzea.

CONCLUSÕES

As altas fertilidades do agroecossistemas de várzea está associado ao pulso de inundação natural e ao tipo de manejos solo, além disso, a substituição da vegetação nativa por sistemas cultivo causam importantes alterações nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo.

A qualidade biológica do solo em ambiente de floresta várzea, sem perturbação, são melhores que quaisquer outras áreas de várzea com manejo empregado.

O manejo tradicional de corte e queima foi o manejo que mais se aproxima das altas fertilidade do manejo convencional e ainda manteve característica da biologia do solo encontrada da floresta.

Referências

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, 1995.

ALTIERI, M.A. **Agroecologia**: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável. Porto alegre: Ed universidade UFRGS, 1988. 110p

ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I. Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. **Manejo Integrado de Plagas y Agroecología**, v. 64, p. 17-24, 2002.

ALTIERI, M. A. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable”, editorial Nordan-Comunidad, edición electrónica, 1999.

ALVES, T. D. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. *Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá*, v. 33, n. 2, 2011. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.4841>

ARAÚJO, E.A.; KER, J.C.; NEVES, J,C,L.; Lani, J,L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v.5, n.1, p.187-206, 2012. DOI: [10.5777/PAeT.V5.N1.12](https://doi.org/10.5777/PAeT.V5.N1.12)

AZIZSOLTANI E.; HONARJOO N.; AYOUBI S. How Soil Pore Distribution Could Help in Soil Quality Studies as an Appropriate Indicator. **Eurasian Soil Sc** 52:654-660 2019. <https://doi.org/10.1134/S1064229319060036>

BODDEY RM, JANTALIA CP, CONCEIÇÃO PC, ZANATTA JA, BAYER C, MIELNICZUK J, DIECKOW J, DOS SANTOS HP, DENARDIN JE, AI TA C, GIACOMINI SJ, ALVES BJR, URQUIAGA S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biol**. 16:784-95, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02020.x>

CARNEIRO, M. A. C., SOUZA, E. D. DE., REIS, E. F. DOS., PEREIRA, H. S., & AZEVEDO, W. R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100016>

CARVALHO, E. S. **Avaliação participativa da qualidade do solo e sanidade dos cultivos para o manejo integrado da hérnia das crucíferas em ambiente de montanha**. 2016. 119 f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação Agropecuária) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CHERUBIN MR, EITELWEIN MT, FABBRIS C, WEIRICH SW, SILVA RF, SILVA VR, BASSO CJ. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Rev Bras Cienc Solo**. 2015; 39:615-25. doi:10.1590/01000683rbs20140462.

CHAMBERS, J. Q.; TRIBUZY, E. S.; TOLEDO, L. C.; CRISPIN, B. F.; HIGUCHI, N.; SANTOS J. DOS; ARAÚJO, A. C.; KRUIJT, B; NOBRE, A. D.; TRUMBORE, S. E. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. **Ecology Application**, v.14, n.4 (supl.), p.72-s88, 2004. <https://doi.org/10.1890/01-6012>

CÓRDOVA VARGAS, C. Y LEÓN SICARD, T. “Resilencia de sistemas agrícolas ecológicos y convencionales frente a la variabilidad climática”, en: **Agroecología** 8 (1), pp. 21-32. 2013.

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; SOUZA, D. M. G. de. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 7, p. 1185- 1191, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000700016>

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. 2001. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 2.ed. rev. Viçosa: UFV, 2001,390p.

DADALTO, J. P., FERNANDES, H. C., TEIXEIRA, M. M., CECON, P. R., MATOS, A. T. DE. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Eng. Agríc.** 35 (3) May-Jun 2015 <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n3p506-513/2015>

DLAPA P, HRINIK D, HRABOVSKÝ A, SIMKOVIC I, ZARNOVICAN H, SEKUCIA F, KOLLAR J. O impacto do uso da terra na distribuição hierárquica do tamanho dos poros e nas propriedades de retenção de água em solos argilosos. **Água** 12:1–13, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12020339>

DIAS-JÚNIOR, H. E.; MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O.; SILVA, R. Metais pesados, densidade e atividade microbiana em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 631-640, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400008>

FERNANDES, S. G.; MACHADO, C. T. de T.; CORREIA, J. R.; VILELA, M. de F.; FERNANDES, L. A. Agricultores Definindo a Sustentabilidade de Agroecossistemas Empregando Indicadores de Solos e Sanidade de Culturas Rápidos e Fáceis. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [S. l.], v. 4, n. 2, 2009. Disponível em: <https://revistas.aba-agroecologia.org.br/rbagroecologia/article/view/8121>. Acesso em: 10 jan. 2023.

FOLEY, JA., RAMANKUTTY, N., BRAUMAN, K. A.; CASSIDY ES, GERBER JS, JOHNSTON M, MUELLER ND, O'CONNELL C, RAY DK, WEST PC, BALZER C, BENNETT EM, CARPENTER SR, HILL J, MONFREDA C, POLASKY S, ROCKSTRO J, SHEEHAN J, SIEBERT S, TILMAN D, ZAKS DPM. Soluções para um planeta cultivado. **Natureza** 478, 337–342, 2011. <https://doi.org/10.1038/nature10452>.

GASPAR, A. B. DOS S., BEZERRA, D. P., REIS, I. M. S., & DA SILVA, R. Chemical and textural properties of floodplain forest soils in the Eastern Amazon, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, 19(1), 91-100. 2023. <https://doi.org/10.5897/AJAR2022.16242>

JENKINSON, DS, & LADD, JN. Biomassa Microbiana no Solo: Medição e Volume de Negócios. Em EA Paul, & JN Ladd (Ed.), **Soil Biochemistry** (Vol. 5, pp. 415-471), 1981.

JUNK, W.J., PIEDADE, M.T.F., SCHÖNGART, J., COHN -HAFT, M., ADENEY, J.M. & WITTMANN, F. A classification of major naturally occurring amazonian lowland wetlands. **Wetlands** 31: 623-640, 2011.

JUNK, W.J., PIEDADE, M.T.F., LOURIVAL, R., WITTMANN, F., KANDUS, P., LACERDA, L.D., BOZELLI, R.L., ESTEVES, F.A., NUNES DA CUNHA, C., MALTCHICK, L., SCHÖNGART, J., SCHAEFFER-NOVELLI, Y. & AGOSTINHO, A.A. brazilian wetlands: definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **AQUATIC CONSERVATION: Marine and Freshwater environments** 24: 5-22. 2014. <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>

JUNK ,W. J.; PIEDADE, M.T.F.; WITTMANN, F.; SCHONGART, J. **Várzeas Amazônicas: Desafios para um Manejo Sustentável**. -Manaus : Editora do INPA, 2020. Disponível em <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/36480>> . Acesso em Dezembro 22, 2022.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Zeitschr.*, 15(3), 259–263, 2006.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; CEZESMUNDO FERREIRA GOMES; ADRIANO SOARES GASPARINI; NUNES, C. M. Atributos Microbiológicos, Químicos E Físicos De Solo Sob Diferentes Sistemas De Manejo E Condições De Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 20 – 28, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.8459>

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MACEDO, R. L. G.; MOREIRA, F. M. D. S.; D'ANDRÉA, A. F. Indicadores biológicos da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no nordeste do estado de minas gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 105-112, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000100015>

NICHOLLS, C. I.; ALTIERI, M. A.; DEZANET, A.; FEISTAUER, D.; OURIQUES, M. A rapid, farmed-friendly agroecological method to estimate soil quality and crop health in vineyard systems. **Biodynamics**, n. 250, p. 33-40, 2004.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; SOARES, M. D. R. Characterization of soils under different land uses in the southern region of the Amazonas. **Acta Amazonica**. v. 45, n. 1, pp. 1-12. 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201400555>.

PIÑEDO-VASQUEZ, M.; PADOCH, C.; INUMA, J. C. **Identifying and understanding agricultural, agroforestry and forest management systems and techniques practiced in Mamirauá**. Tefé, Sociedade Civil Mamirauá, 1996.

PÉREZ BOTHO B.; JIMÉNEZ VELÁZQUEZ M. A.; SÁNCHEZ ESCUDERO J.; MURATALLA LÚA A. Agricultura tradicional en El Botho, Alto Mezquital, estado de Hidalgo. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, México, ME, v. 6, n. 6, p. 1215–1227, 2017. DOI: 10.29312/remexca.v6i6.568. Disponível em: <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/568>. Acesso em: 22 mar. 2022.

PIEIDADE, M.T.F., LOPES, A., DEMARCHI, L.O., JUNK, W.J., WITTMANN, F., SCHÖNGART, J. & CRUZ, J. (2019): Guia de campo de herbáceas aquáticas: várzea amazônica. 1. ed. editora INPA, Manaus: 300pp

RICHERS, B. T. T. Agricultura migratória na várzea: ameaça ou uso integrado? **UAKARI**, v.6, n.1, p.27-37, jun.2010.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 743–755, 2009.

ZARIN, D. J.; DUCHESNE, A .L.; HIRAOKA, M. Shifting cultivation on the tidal floodplains of Amazonia: impacts on soil nutrients status. **Agroforestry systems**. v. 41, p. 307-311, 1998.

**CAPITULO III- DINÂMICA SAZONAL DE INDICADORES FÍSICO, QUÍMICOS E
BIOLÓGICOS DO SOLO EM FRAGMENTO DE FLORESTA DE VÁRZEA,
AMAZONIA, BRASIL.**

DINÂMICA SAZONAL DE INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM FRAGMENTO DE FLORESTA DE VÁRZEA, AMAZONIA, BRASIL.

Avner Brasileiro dos Santos GASPAR¹, Diego Pereira BEZERRA², Matheus Alves de SOUZA³, Jose Mauro de Sousa⁴, Iolanda Maria Soares REIS³, Rodrigo da SILVA^{1,2},

¹ Pós-graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento (PPGSND), Instituto de Biodiversidade e Florestas (IBEF), Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém-PA, Brasil;

² Instituto de Engenharia e Geociências (IEG), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil;

³ Instituto de Biodiversidade e Florestas (IBEF), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil;

⁴ Instituto de Formação Interdisciplinar e Intercultural (CFI), Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém-PA, Brasil

RESUMO: As florestas de várzea, enquanto ecossistemas singulares com adaptações específicas às inundações periódicas, demandam uma análise aprofundada da dinâmica sazonal dos indicadores de solo. O manejo apropriado desses ecossistemas desempenha um papel significativo na conservação da biodiversidade associada a essas áreas. Dessa forma, o objetivo central deste estudo foi avaliar os atributos físicos, químicos e biológicos do solo em resposta ao regime de inundação em um fragmento de floresta de várzea. A pesquisa foi conduzida em um fragmento de floresta de várzea localizado no Distrito do Arapixuna, Município de Santarém-PA, Amazonia Central. Ao longo de 24 meses, foram coletadas amostras de solo durante todo o ciclo sazonal de inundação da floresta. Os resultados dos indicadores de qualidade do solo foram submetidos a uma análise variância, revelando diferenças significativas entre as diferentes fases do processo de inundação. A dinâmica dos períodos de inundação sugere uma influência significativa dos ciclos hidrológicos na distribuição e disponibilidade de nutrientes e elementos no solo de várzea.

PALAVRAS-CHAVE: Fertilidade do solo, sustentabilidade, agricultura de várzea, planícies inundação.

ABSTRACT: The floodplain forests, as unique ecosystems with specific adaptations to periodic flooding, demand an in-depth analysis of the seasonal dynamics of soil indicators. Proper management of these ecosystems plays a significant role in conserving the biodiversity associated with these areas. Thus, the main objective of this study was to evaluate the physical, chemical, and biological attributes of the soil in response to the flooding regime in a floodplain forest fragment. The research was conducted in a floodplain forest fragment located in the Arapixuna District, Municipality of Santarém-PA, Central Amazon. Over 24 months, soil samples were collected throughout the entire seasonal flooding cycle of the forest. The results of soil quality indicators were subjected to a variance analysis, revealing significant differences between the different phases of the flooding process. The dynamics of the flooding periods suggest a significant influence of hydrological cycles on the distribution and availability of nutrients and elements in floodplain soil.

KEYWORDS: Soil fertility, sustainability, lowland agriculture, flood plains.

1-INTRODUÇÃO

Os solos presentes nas áreas de floresta de várzea na região Amazônica são caracterizados pela sua formação nas planícies aluviais dos rios, durante os períodos de inundação anual que se estendem por aproximadamente seis meses, esses solos exibem elevada fertilidade e são propícios ao crescimento de uma diversidade considerável de vegetação, abrangendo desde árvores de grande porte até plantas rasteiras (SILVA et al. 2014; CRAVO et al, 2002).

A matéria orgânica desempenha um papel crucial nos solos de planície inundadas na Amazonia, uma vez que a deposição de material vegetal nas áreas inundadas pelos rios proporciona nutrientes essenciais para os microrganismos presentes no solo e a acidez natural desses solos pode afetar o desenvolvimento das plantas, enquanto a baixa disponibilidade de fósforo pode limitar a produção agrícola. Por isso, o uso de práticas de manejo sustentável é fundamental para garantir a produtividade e a conservação desses solos (GAMA-RODRIGUES et al., 1996).

Os sedimentos presentes no leito do Rio Amazonas são caracterizados pela significativa deposição de materiais orgânicos e inorgânicos. Os principais componentes sedimentares identificados nesse contexto incluem areia, silte e argila, juntamente com matéria orgânica em diversos estágios de decomposição. Estes sedimentos são transportados pela corrente do rio e depositam-se nas proximidades de suas margens, originando a formação de bancos de areia e ilhas fluviais. A carga sedimentar do Rio Amazonas é portadora de uma considerável quantidade de nutrientes, fundamentais para sustentar as comunidades biológicas na região Amazônica (BARROS et al., 2011).

A presença desses nutrientes exerce influência não apenas sobre a qualidade da água do Rio Amazonas, a qual manifesta elevada turbidez em determinadas seções, mas também gera potenciais impactos adversos para o ecossistema amazônico. Durante períodos de cheias, ocorre um aumento significativo na quantidade de sedimentos transportados pelo rio, podendo resultar em desbarrancamentos e erosão das margens. Adicionalmente, os sedimentos podem comprometer a qualidade da água ao reduzir a penetração da luz solar nas camadas inferiores, afetando adversamente o crescimento de determinadas espécies aquáticas (BARBOSA et al., 2011).

Os solos de várzea na região amazônica se distinguem pela notável fertilidade e pela capacidade de promover o crescimento diversificado e uma ampla variedade de plantas (SOUZA et al 2018). Originados nas planícies aluviais dos rios, durante as cheias anuais que se estendem por cerca de seis meses, esses solos recebem a deposição de sedimentos ricos em nutrientes pela água do rio, gerando condições ideais para o cultivo de diversas espécies vegetais (SOBRINHO et al, 2016). Esses solos, de maneira geral, apresentam elevado teor de matéria orgânica, boa fertilidade, níveis satisfatórios de cálcio e magnésio, baixa acidez e ausência de alumínio (GASPAR et al., 2023).

Conforme evidenciado por Lopes et al. (2013), os solos de várzea na Amazônia têm sido utilizados ao longo de muitos anos para o cultivo de diversas plantas, tais como arroz, feijão-caupi, milho, mandioca, entre outras, além de serem empregados na criação de gado de corte e leiteiro. Tal utilização é respaldada pela alta concentração de matéria orgânica nesses solos, conferindo-lhes propriedades altamente propícias para atividades agrícolas e pecuárias.

Apesar da sua notável fertilidade, os solos de várzea também apresentam desafios para o cultivo, destacando-se a necessidade de uma drenagem adequada e o controle de pragas e doenças que prosperam em ambientes excessivamente úmidos. Dada a natureza úmida e mal drenada desses solos, é imprescindível implementar cuidados especiais durante as práticas agrícolas. A aplicação de técnicas de manejo específicas é essencial para assegurar uma drenagem adequada do solo e para controlar o desenvolvimento de doenças e pragas nesse ambiente. (JUNK et al, 2020 & T EIXEIRA et al, 2019).

Os solos encontrados nas florestas de várzea manifestam condições químicas, físicas e biológicas propícias, destacando-se por sua notável diversidade microbiana (GUIMARÃES et al. 2013). Adicionalmente, esses solos exibem uma elevada capacidade de retenção hídrica, conferindo-lhes a habilidade de enfrentar períodos prolongados de estiagem. Entretanto, como é inerente a qualquer tipo de solo, os solos de floresta de várzea também apresentam desafios para atividades agrícolas, particularmente relacionados à sua acidez natural e à limitada disponibilidade de fósforo (ALFAIA et al., 2022).

A dinâmica sazonal dos indicadores de solo em florestas é um fenômeno resultante das variações climáticas ao longo do ano. É crucial destacar que as florestas apresentam uma dinâmica intrínseca, sendo influenciadas pelas flutuações sazonais de precipitação e temperatura, as quais exercem impacto direto sobre a atividade biológica do solo. A variação

sazonal dos indicadores biológicos do solo em florestas desempenha um papel significativo na resistência à compactação do solo, na capacidade de suporte de carga, na densidade e porosidade do solo, além de influenciar a eficiência na absorção de nutrientes pelas plantas (ALCÂNTARA et al., 2019).

Os indicadores de solo em florestas de várzea podem ser avaliados através de análises físicas, químicas e biológicas do solo, como por exemplo a densidade do solo, pH, teor de matéria orgânica, atividade microbiana, entre outros de acordo com os resultados encontrados, pode-se inferir sobre a qualidade do solo e sua produtividade. Portanto, a compreensão da dinâmica sazonal dos indicadores de solo em florestas de várzea é fundamental para o manejo adequado desses ecossistemas e para a conservação da biodiversidade Santos et al. (2020).

As florestas de várzea representam ecossistemas singulares que desenvolveram diversas adaptações fisiológicas e fenológicas para lidar com as inundações periódicas. Dentro desse contexto, a hipótese subjacente a este estudo é que o regime de inundação exerce impactos na integridade dos solos desses ecossistemas, influenciando os serviços ecossistêmicos oferecidos, como o estoque de carbono no solo, a fertilidade do solo e, por conseguinte, a qualidade geral do solo. Assim sendo, o objetivo primordial desta pesquisa é avaliar a dinâmica dos atributos químicos e biológicos do solo em relação ao regime de inundação em um fragmento de floresta de várzea localizado no Distrito do Arapixuna, no Município de Santarém, no estado do Pará, Brasil.

2-MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Para a análise da dinâmica dos indicadores químicos, físicos e biológicos do solo, procedeu-se à coleta de amostras no período compreendido entre agosto de 2020 e julho de 2022. A coleta foi realizada em um fragmento de floresta de várzea com área aproximada de 50.000 m², conforme representado na Figura 1, situado na comunidade de Arapixuna, Santarém, Pará (Latitude 02°13'49"S; Longitude 054°50'55"O).

Essa comunidade está localizada a aproximadamente 30 km do porto da cidade de Santarém, com acesso pelo "Igarapé Arapixuna", um pequeno canal que estabelece a conexão entre o rio Amazonas e o Rio Tapajós. Cabe ressaltar que esse canal transporta água

branca para o Rio Tapajós, caracterizando-se por uma significativa carga de material em suspensão (MACHADO, 2019).

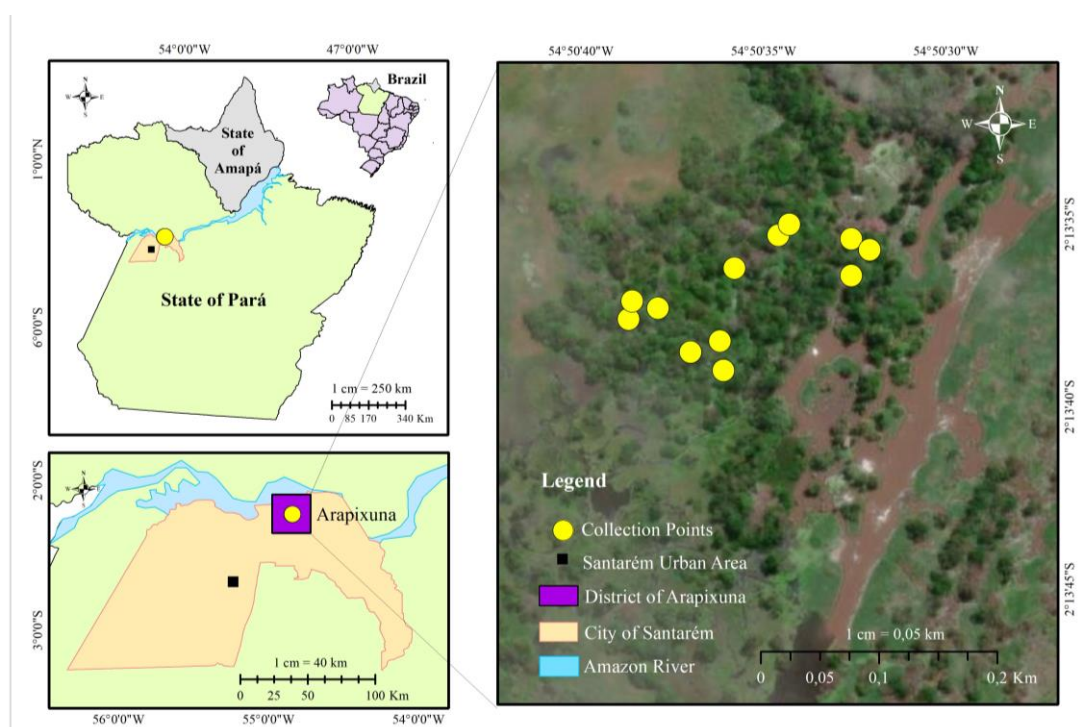


Figura 1: Mapa de localização da área na comunidade do Arapixuna, Santarém-PA.

O local de pesquisa constitui uma floresta de várzea (VZ), enquadrada, de acordo com a classificação proposta por Junk et al. (2011), como uma região de pulso monomodal previsível de alta amplitude e longa duração. Este sítio está situado a uma altitude de 9 metros acima do nível do mar, caracterizando-se por um período de inundação que se estende até 9 meses ao longo do ano, especialmente nas áreas de topografia mais baixa. Contudo, devido às variações topográficas existentes na área, uma das parcelas apresenta uma elevação superior, resultando em um período de inundação menos extenso, podendo alcançar até 6 meses ao longo do ano.

O solo da região é classificado como Neossolo Flúvico Eutrófico, uma categoria específica de solo encontrado em áreas adjacentes a rios ou corpos d'água, caracterizada por sua fertilidade eutrófica. Estes solos exibem características de solos jovens, frequentemente observados em locais de sedimentação recente, como margens de rios, várzeas e planícies aluviais. A designação "flúvico" denota que esses solos se originaram de sedimentos transportados por rios e depositados em suas margens ou leitos durante eventos de inundação (SANTOS et al., 2018; IUSS, 2015). Neossolos Flúvicos Eutróficos geralmente apresentam

alta fertilidade, com teores elevados de nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Essas características os tornam adequados para práticas agrícolas e desempenham um papel fundamental na manutenção da biodiversidade em ecossistemas ribeirinhos (SANTOS et al., 2018).

2.2 Clima e períodos hidrológicos

Os períodos de cheia e seca do rio foram determinados com base nos valores médios (considerando um desvio padrão) dos níveis máximos e mínimos, respectivamente, observados no intervalo de 2018 a 2021 (Fig.2). Por sua vez, os períodos de enchente e vazante são definidos como os intervalos temporais situados entre essas fases, conforme preconizado pela proposta de Piedade et al. (2019). É relevante salientar que a ocorrência temporal dessas fases pode apresentar variações em diferentes regiões da Bacia Amazônica, como indicado por Junk et al. (2011, 2014).

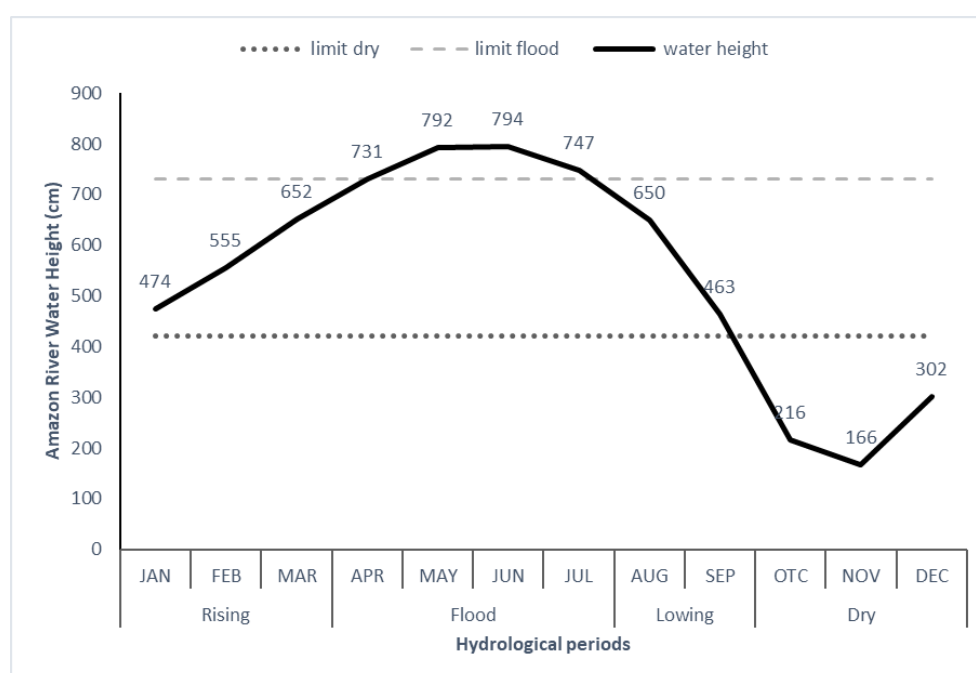


Figura 2: Variações do nível da água do Rio Amazonas monitorado no Porto Óbidos-PA mostrando um pulso monomodal de inundação e indicando quatro períodos (enchente, cheia, vazante e seca); Precipitação média da estação meteorológica monitorado no Porto de Óbidos-PA para o período 2018-2021 (Dados: Agência Nacional de Águas-ANA). Hydrological periods= períodos hidrológicos, Amazon river height=altura do rio Amazonas.

Conforme Kottek et al. (2006) e a classificação de Köppen-Geiger, a região em análise apresenta um tipo climático Am (Tropical de monção). A média da umidade

relativa é de 85%, com uma temperatura média anual de 26°C. O clima na localidade é caracterizado por duas estações distintas ao longo do ano: a estação seca, com uma precipitação média de aproximadamente 100 mm por mês, e a estação chuvosa, que registra uma precipitação superior a 200 mm por mês, iniciando em dezembro (CHAMBERS et al., 2004; ALVARES et al., 2013).

2.3 Coleta e análise de solo

As coletas de amostras foram conduzidas utilizando um trado do tipo sonda e um trado holandês, resultando em um conjunto de 10 amostras simples. Essas amostras foram distribuídas em duas profundidades distintas: 0-10 cm e 10-20 cm. As coletas foram executadas mensalmente ao longo do intervalo compreendido entre agosto de 2020 e julho de 2022, abrangendo os quatro períodos hidrológicos distintos da região: enchente, cheia, vazante e seca (Fig. 3).



Figura 3: Coleta de solo floresta de várzea durante todo o ciclo hidrológico

O conjunto de indicadores químicos submetidos à avaliação compreende o pH, Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Potássio (K), Fósforo (P), Carbono (C), Nitrogênio total (N total), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Ferro (Fe) e Manganês (Mn). O pH do solo foi determinado em água na proporção solo: solução de 1:2,5. Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos mediante o uso de KCl 1N, enquanto P, K⁺, Zn, Cu, Fe e Mn foram extraídos com extrator duplo ácido (H_2SO_4 0,0125 M + HCl 0,05 M) e quantificados por meio de um espectrofotômetro de absorção atômica. Adicionalmente, foram calculados parâmetros adicionais, tais como Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Soma de Bases (SB), Saturação por Bases (V%) e Saturação por Alumínio (m%). No que diz respeito aos indicadores físicos, foram realizadas análises de granulometria e densidade do solo. Todas as análises foram conduzidas conforme os métodos descritos por Teixeira et al. (2017).

Os seguintes indicadores biológicos foram submetidos à avaliação: a atividade microbiana, medida pela respiração basal do solo, foi determinada pela liberação de CO_2 ao longo de 21 dias de incubação, seguindo a metodologia descrita por ALEF e NANNIPIERI (1995). O método baseia-se na captura do CO_2 liberado pela respiração microbiana através de uma solução de NaOH, resultando na formação de Na_2CO_3 . O carbono da biomassa microbiana foi quantificado após fumigação e incubação com clorofórmio, conforme o método delineado por JENKINSON e LADD (1981). Além disso, o Carbono Orgânico Total (COT) foi determinado pela oxidação da amostra de solo úmido com dicromato de potássio, conforme descrito por Teixeira et al. (2017). Adicionalmente, foram calculados o Quociente Metabólico (qCO₂), representando a quantidade de C-CO₂ evoluída por unidade de C microbiano, e o Quociente Microbiano (qMIC).

2.4 Análise de dados

Os resultados das análises foram submetidos à análise descritiva, teste de normalidade, e, considerando a estrutura multivariada contida nos dados, foram empregadas técnicas estatísticas para verificar semelhanças entre os grupos (estações sazonais). O objetivo foi agrupá-los usando os atributos físicos, químicos e biológicos como variáveis. Os dados foram padronizados (média zero e variância um) para assegurar que todas as variáveis contribuam igualmente para o modelo.

Para investigar a dinâmica dos indicadores de solo, adotou-se um delineamento experimental em blocos ao acaso, composto por 4 tratamentos (estações sazonais/ períodos hidrológicos de inundação). Os dados foram submetidos à análise de variância multivariada (Manova), um teste que examina a relação entre diversas variáveis de resposta e um conjunto comum de preditores simultaneamente. A análise de agrupamento foi complementada pela análise de componentes principais (PCA), visando obter um conjunto reduzido de combinações. Essa abordagem permite avaliar qualitativamente as características de cada estação sazonal e identificar as variáveis mais associadas a cada uma delas. As análises estatísticas foram realizadas com os softwares livres Jamovi (versão 2.318, 2024) e R (versão 4.03, R Core Team, 2020).

3-RESULTADOS E DISCUSSAO

3.1 Estatística Descritiva e Análise de Variância dos Indicadores Químicos, Físicos e Biológicos do Solo em Floresta de Várzea em Diferentes Períodos Hidrológicos

Nesta seção, realizamos uma análise detalhada dos indicadores químicos, físicos e biológicos do solo em uma floresta de várzea, considerando diferentes períodos hidrológicos. A estatística descritiva fornece uma visão geral dos dados, enquanto a análise de variância (ANOVA) é empregada para investigar as diferenças significativas entre os períodos hidrológicos.

A análise descritiva e a análise de variância (ANOVA) dos 20 indicadores químicos de solo, conforme apresentados na Tabela 1, revelaram diferenças significativas nos períodos hidrológicos avaliados. Essas diferenças foram observadas em ambas as profundidades investigadas, com níveis de significância de 0,1% e 5%. Esses resultados destacam a influência dos ciclos hidrológicos na variabilidade das características químicas do solo na área de estudo.

Tabela 1. Estatística descritiva e Análise de variância de indicadores químicos de qualidade solo em uma Floresta de várzea

Variáveis	Profundidad e (cm)	Períodos hidrológicos*				p-valor
		Vazante	Seca	Enchente	Cheia	
pH	0-10	4,63 ± 0,252	4,67 ± 0,275	4,84 ± 0,303	4,61 ± 0,303	0,003
	11-20	4,52 ± 0,159	4,74 ± 0,638	4,78 ± 0,278	4,54 ± 0,133	0,006
P (mg kg ⁻¹)	0-10	12,5 ± 5,07	12,7 ± 5,07	10,4 ± 2,58	5,29 ± 3,98	<0,001
	11-20	6,24 ± 3,27	5,69 ± 2,79	6,05 ± 2,59	6,55 ± 10,36	0,936*

S (mg kg ⁻¹)	0-10	18,7 ± 13,9	24,7 ± 12,6	34,1 ± 12,2	34,1 ± 10,1	<0,001
	11-20	14,7 ± 10,6	19,0 ± 8,38	39,2 ± 19,17	38,6 ± 15,09	<0,001
K (mg kg ⁻¹)	0-10	118 ± 41,9	91,2 ± 14,9	109,9 ± 15,0	106,6 ± 16,9	<0,001
	11-20	83,6 ± 25,4	72,0 ± 12,6	99,5 ± 14,4	95,0 ± 16,0	<0,001
Na (mg kg ⁻¹)	0-10			ns*		
	11-20					
Ca (cmolc kg ⁻¹)	0-10	5,45 ± 1,72	7,24 ± 1,48	8,56 ± 1,63	9,47 ± 1,63	<0,001
	11-20	4,66 ± 1,75	7,84 ± 2,51	9,17 ± 2,23	9,24 ± 1,35	<0,001
Mg (cmolc kg ⁻¹)	0-10	2,91 ± 0,596	3,34 ± 0,763	3,98 ± 0,556	4,39 ± 0,878	<0,001
	11-20	2,25 ± 0,537	3,93 ± 1,155	5,03 ± 0,695	4,33 ± 0,616	<0,001
Al (cmolc kg ⁻¹)	0-10	2,42 ± 1,145	2,13 ± 1,050	2,15 ± 0,683	2,05 ± 0,634	0,558*
	11-20	2,91 ± 1,380	2,10 ± 1,374	2,14 ± 1,146	1,62 ± 0,600	0,003
H + Al (cmolc kg ⁻¹)	0-10	6,81 ± 3,36	8,85 ± 4,14	8,77 ± 3,39	6,73 ± 2,38	0,016
	11-20	7,30 ± 2,65	8,29 ± 3,14	9,73 ± 3,53	5,90 ± 2,01	<0,001
Sum of bases (cmolc kg ⁻¹)	0-10	8,66 ± 1,77	10,81 ± 2,15	12,82 ± 2,10	14,14 ± 2,31	<0,001
	11-20	7,09 ± 2,11	12,03 ± 3,45	14,41 ± 2,85	13,78 ± 1,72	<0,001
PCEC (cmolc kg ⁻¹)	0-10	15,5 ± 4,86	19,7 ± 5,31	21,6 ± 2,91	20,9 ± 2,42	<0,001
	11-20	14,5 ± 4,37	20,3 ± 6,07	24,2 ± 3,51	19,8 ± 2,38	<0,001
ECEC (cmolc kg ⁻¹)	0-10	11,1 ± 1,98	12,9 ± 2,62	15,0 ± 1,97	16,2 ± 1,97	<0,001
	11-20	10,0 ± 2,20	14,1 ± 3,55	16,5 ± 2,0	15,5 ± 1,65	<0,001
Base saturation (%)	0-10	57,6 ± 7,29	56,7 ± 10,07	60,3 ± 12,16	67,9 ± 9,91	<0,001
	11-20	50,3 ± 6,78	59,9 ± 7,34	60,4 ± 11,49	70,3 ± 7,24	<0,001
Al saturation (%)	0-10	21,1 ± 9,80	16,2 ± 7,00	14,6 ± 5,36	13,0 ± 4,80	<0,001
	11-20	28,1 ± 12,29	14,9 ± 10,97	13,7 ± 8,56	10,6 ± 4,15	<0,001
B (mg kg ⁻¹)	0-10	0,267 ± 0,04	0,245 ± 0,08	0,257 ± 0,05	0,244 ± 0,02	0,417
	11-20	0,223 ± 0,04	0,186 ± 0,04	0,258 ± 0,06	0,259 ± 0,04	<0,001
Cu (mg kg ⁻¹)	0-10	5,43 ± 2,60	7,17 ± 2,06	10,44 ± 2,80	10,10 ± 1,54	<0,001
	11-20	5,93 ± 3,11	5,88 ± 2,58	9,99 ± 2,97	9,98 ± 1,43	<0,001
Fe (mg kg ⁻¹)	0-10	268 ± 90,6	259 ± 63,6	450 ± 298,8	243 ± 60,6	<0,001
	11-20	217 ± 96,7	170 ± 80,8	303 ± 203,8	211 ± 47,7	0,001
Mn (mg kg ⁻¹)	0-10	52,4 ± 23,55	67,3 ± 20,57	82,8 ± 9,30	115,9 ± 28,6	<0,001
	11-20	51,5 ± 20,5	52,4 ± 30,1	75,6 ± 18,3	103,8 ± 32,4	<0,001
Zn (mg kg ⁻¹)	0-10	5,45 ± 1,94	6,58 ± 2,74	7,00 ± 1,61	7,31 ± 1,15	0,010
	11-20	5,37 ± 2,44	5,85 ± 4,29	7,58 ± 2,49	6,38 ± 1,11	0,025

Nota: EnchentePCEC, CTC potencial potencial; ECEC- CTC efetiva; , n.s – Não significativo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. enchente

Os valores de pH apresentaram uma variação de 4,20 a 5,30 na profundidade de 0-10 cm e de 4,0 a 6,60 na profundidade de 11-20 cm. Durante o período hidrológico de enchente, foram registrados os maiores valores médios nessas profundidades, alcançando 4,84 e 4,78, respectivamente. Esses resultados revelaram diferenças significativas entre os períodos hidrológicos em ambas as profundidades. Quanto às concentrações de fósforo (P), observaram-se variações significativas apenas na profundidade de 0-10 cm, com uma faixa de variação de 1,20 a 25,3 mg kg⁻¹. A média mais elevada, de 12,70 mg kg⁻¹, foi registrada durante o período hidrológico de seca (Figura 4).

Os valores de pH registrados estão dentro da faixa observada por Junk et al. (2013) e Melo et al. (2010) em planícies inundadas da Amazônia, assim como pelos estudos sobre o

impacto da frequência de inundações nas propriedades do solo superficial em planície de inundação australiana realizados por Rayburg et al. (2023).

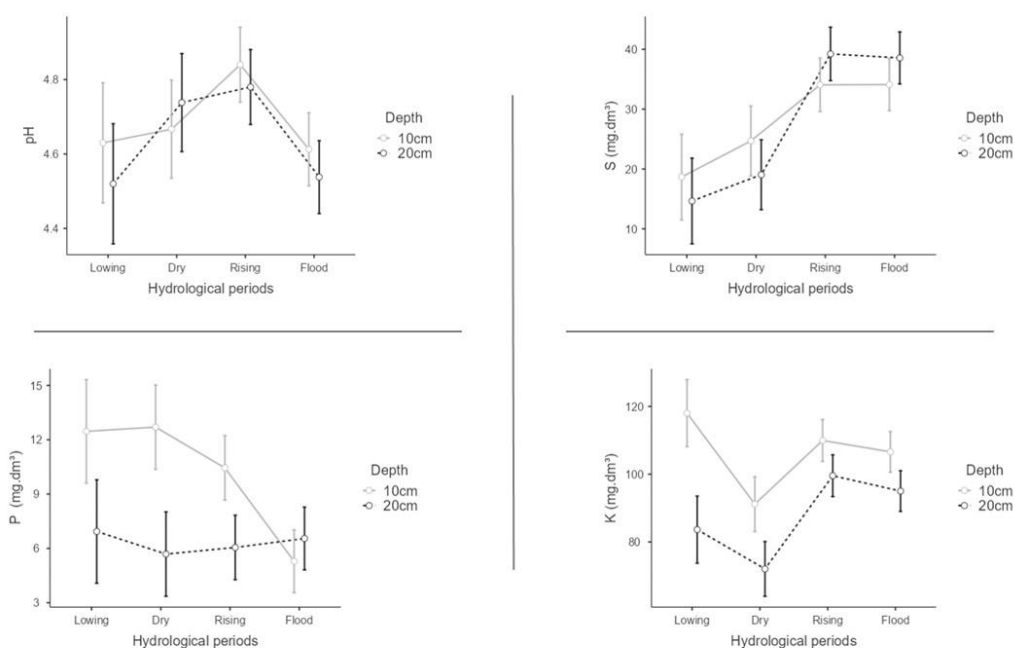


Figura 4: Gráfico de média marginais do valor de pH e concentração de Potássio (K), Fosforo (P), Enxofre (S) do solo de floresta de várzea em diferente períodos hidrológicos de inundação (Lowling-Vazante; Dry- seca; Rising-enchente; Flood- cheia).

As concentrações de enxofre (S) mostraram-se mais elevadas durante os períodos de inundação, tanto na fase de enchente quanto na de cheia. Os valores médios foram de 34,1 mg kg⁻¹ na profundidade de 0-10 cm e 39,2 mg kg⁻¹ na profundidade de 11-20 cm (Quadro 1). Por outro lado, o potássio (K) apresentou variações significativas em ambas as profundidades. Na profundidade de 0-10 cm, o maior valor médio foi observado durante o período de seca, atingindo 118 mg kg⁻¹. Já na profundidade de 11-20 cm, o valor mais elevado foi registrado durante o período de enchente, alcançando 99,52 mg kg⁻¹ (Figura 4). Esses resultados destacam a influência dos diferentes períodos hidrológicos nas concentrações de enxofre e potássio no solo da área de estudo.

A inundação do solo pode ter efeitos significativos na disponibilidade e no ciclo de nutrientes, influenciando diretamente a fertilidade do solo e a saúde das plantas. Durante períodos de inundação, ocorrem alterações na dinâmica dos nutrientes devido à redução da oxigenação do solo, mudanças na atividade microbológica e ao processo de lavagem de nutrientes solúveis resultando em uma diminuição da disponibilidade de nutrientes para as plantas e afeta negativamente seu crescimento e desenvolvimento. Em trabalhos realizados

por Singh et al. (2020) e Wang et al. (2019), foram examinados os efeitos da inunda o do solo na disponibilidade de f3sforo e pot3ssio para as plantas. Suas descobertas indicaram que a inunda o pode resultar na redu o da disponibilidade de f3sforo no solo, devido   forma o de complexos insol3veis de f3sforo com ferro e alum3nio. Al3m disso, observou-se que o pot3ssio pode ser lixiviado do solo durante o processo de inunda o, o que acarreta uma diminu o da disponibilidade desse nutriente para as plantas.

As concentra es dos micronutrientes boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), mangan3s (Mn) e zinco (Zn), conforme destacado na Tabela 1, revelaram diferen as significativas entre os per3odos hidrol3gicos analisados.   importante salientar que todas esses indicadores apresentaram m3dias de concentra o mais elevadas durante os per3odos de enchente e cheia na floresta de v3rzea. Essa tend3ncia sugere uma maior disponibilidade desses micronutrientes durante as fases de inunda o, o que pode influenciar positivamente a nutri o das plantas e a produtividade dos ecossistemas de v3rzea.

Uma pesquisa realizada por Liu et al. (2018) investigou os efeitos da inunda o do solo na mobiliza o de micronutrientes como ferro, zinco e mangan3s. Eles descobriram que a inunda o do solo aumentou a disponibilidade desses micronutrientes, especialmente o ferro, devido   redu o do potencial redox no solo, o que favoreceu a solubiliza o desses nutrientes e sua absor o pelas plantas.

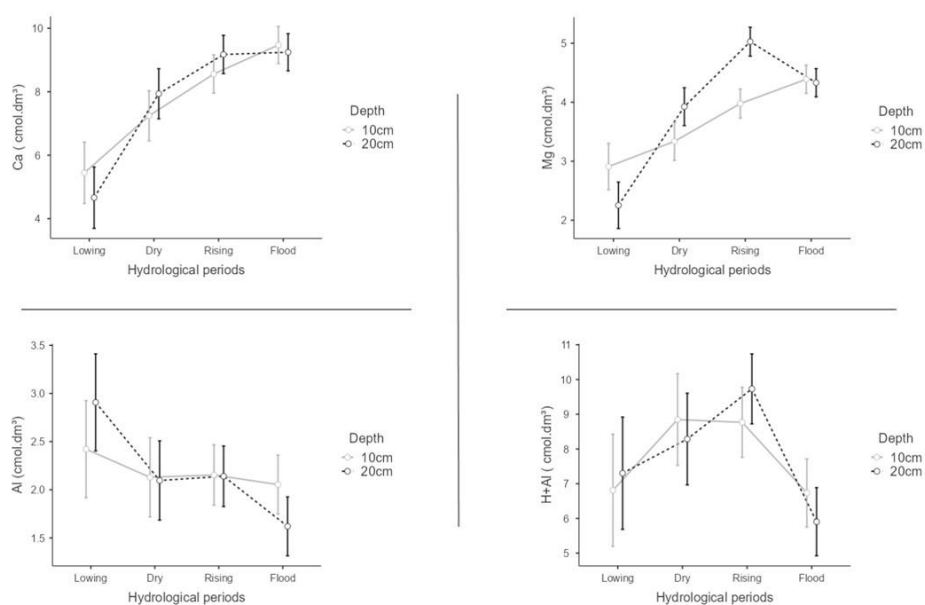


Figura 5: Din mica de m3dias marginais das concentra es de Calcio (Ca), Magn3sio (Mg) Alum3nio (Al) e acidez potencial do solo de floresta de v3rzea em diferentes per3odos hidrol3gicos de inunda o (Low- Vazante; Dry- seca; Rising-enchente; Flood- cheia).

Os valores de sódio (Na) não demonstraram significância estatística em nenhuma das profundidades analisadas. Em contraste, as concentrações de cálcio (Ca) exibiram uma ampla variação, variando de 3,49 a 12,42 (cmol_c kg⁻¹) na profundidade de 0-10 cm e de 2,80 a 12,44 (cmol_c kg⁻¹) na profundidade de 11-20 cm. As médias mais elevadas para magnésio e cálcio foram observadas durante o período de cheia em ambas as profundidades, indicando possíveis influências dos ciclos hidrológicos nessas concentrações. Por outro lado, tanto as concentrações de alumínio quanto a acidez potencial apresentaram as menores médias durante o período de inundação, como evidenciado no gráfico representativo (Figura 5).

Em solos ácidos, a disponibilidade de alumínio é aumentada, tornando-o problemático. O excesso desse elemento pode causar danos às raízes das plantas, reduzindo sua capacidade de absorver água e nutrientes. Estudos como os de Kopittke et al. (2019) e Kochian et al. (2015) mostraram que a saturação por alumínio no solo afeta a absorção de nutrientes essenciais, como fósforo e cálcio, pelas plantas. Isso resulta em deficiências nutricionais e na diminuição da produtividade.

Durante o período de cheia, as concentrações de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) mostraram-se mais elevadas, o que coincidiu com maiores concentrações de saturação por bases. Paralelamente, os valores de saturação por alumínio foram menores nesse mesmo período (Fig. 6). É relevante destacar que as concentrações de saturação por base permaneceram consistentemente acima de 50% em todas as profundidades amostradas e em todos os períodos hidrológicos, evidenciando a fertilidade do solo de várzea. Esse padrão sugere uma maior disponibilidade de nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, contribuindo para a produtividade e a biodiversidade desses ecossistemas.

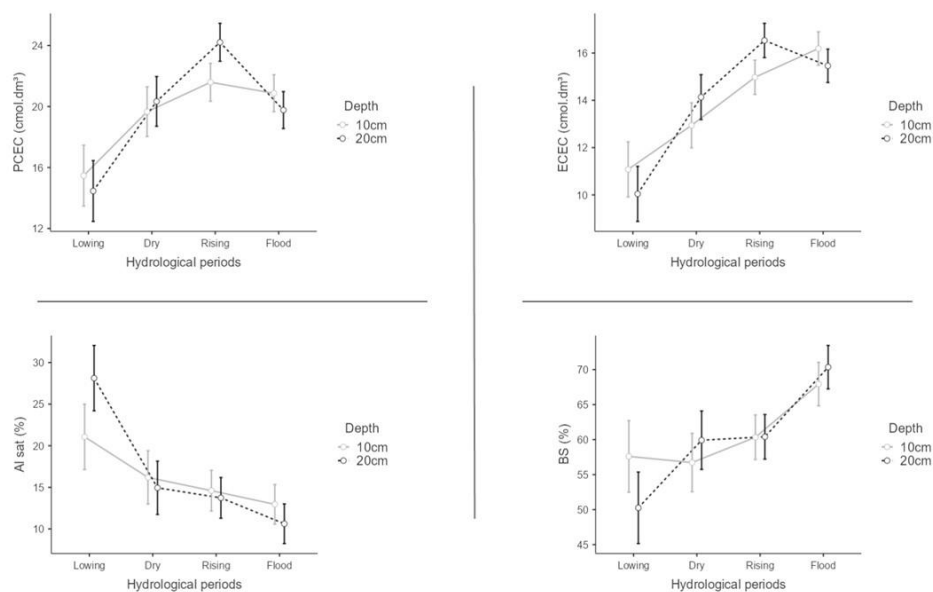


Figura 6: Dinâmica de média marginais das concentração de PCEC (CTC Potencial), ECEC (CTC efetiva); Al sat (Saturação por alumínio), BS (Saturação por bases) do solo de floresta de várzea em diferentes períodos hidrológicos de inundação (Lowling-Vazante; Dry- seca; Rising-enchente; Flood- cheia).

A matriz de correlação (Figura 7) revela a sinergia entre os indicadores e o nível de água em cada período hidrológico analisado. Embora durante os períodos de enchente e cheia a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) potencial, o ferro e o zinco apresentem concentrações mais elevadas, esses indicadores não demonstraram correlação significativa com o nível da água, o que também se aplica aos valores de pH. Esses resultados indicam que outros fatores podem estar influenciando as variações observadas nessas concentrações durante os diferentes períodos hidrológicos, ressaltando a complexidade das interações no solo de várzea.

Os indicadores de fósforo e alumínio, assim como a saturação por alumínio e a acidez potencial, mostraram uma correlação significativa negativa com o nível da água. Por outro lado, os demais indicadores químicos apresentaram uma correlação positiva com o nível da água. Esses resultados sugerem uma relação complexa entre os níveis de água e as propriedades químicas do solo na área de estudo, indicando a influência das variações hidrológicas na dinâmica do solo em ambiente de várzea.

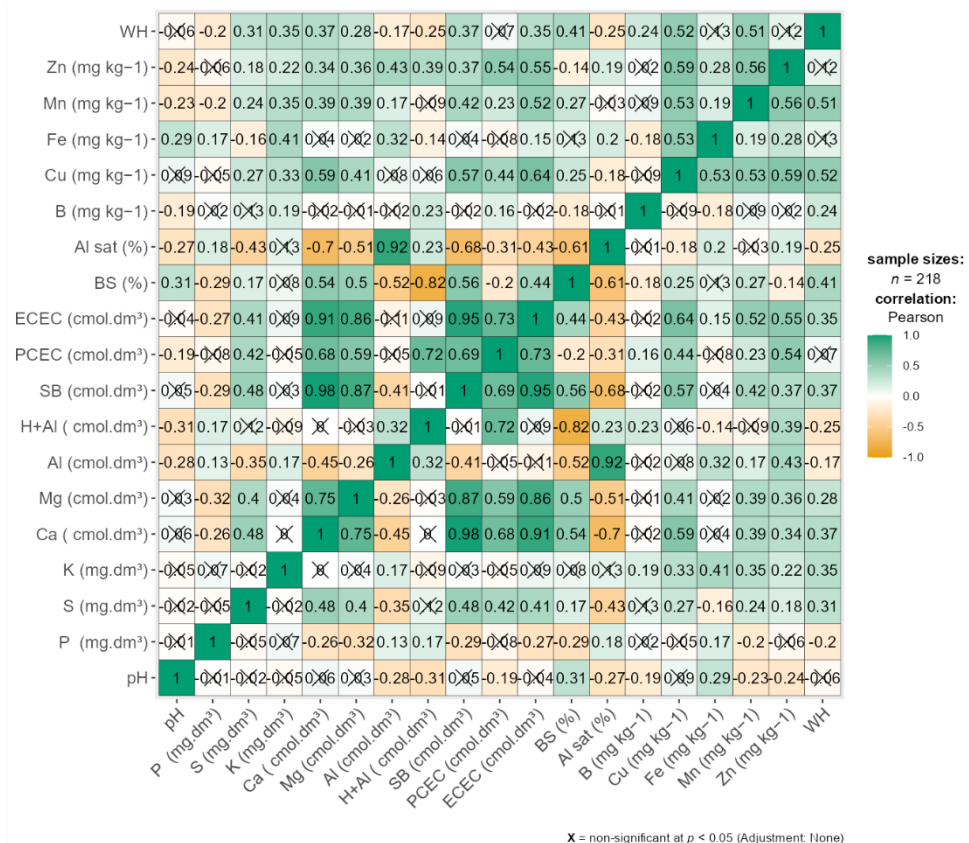


Figura 7: Matrix de correlação dos indicadores químicos de solo com o Nível de água (WH)

Os resultados da estatística descritiva e da análise de variância dos indicadores físicos do solo estão resumidos na Tabela 2. Todos os indicadores avaliados apresentaram diferenças significativas entre os diferentes períodos hidrológicos, evidenciando a influência dessas variações na composição e nas características físicas do solo ao longo do tempo.

Tabela 2. Estatística descritiva e Análise de variância de indicadores físicos de qualidade solo de uma Floresta de várzea em diferentes períodos hidrológicos.

Variáveis	Profundidade		Períodos Hidrológicos			p-valor*
	e (cm)	Vazante	Seca	Enchente	Cheia	
Argila (%)	0-10	33,5 ± 13,1	50,4 ± 20,6	73,1 ± 4,46	71,5 ± 8,57	<0,001
	nov/20	29,0 ± 9,76	49,0 ± 18,2	75,1 ± 3,96	71,8 ± 5,03	<0,001
Silte (%)	0-10	20,5 ± 3,99	16,6 ± 9,55	14,7 ± 2,23	15,0 ± 2,4	0,001
	nov/20	8,9 ± 3,4	15,9 ± 7,25	16,5 ± 1,92	15,9 ± 2,49	<0,001
Areia (%)	0-10	46,0 ± 10,8	33,0 ± 26,4	12,2 ± 6,11	13,5 ± 7,23	<0,001
	nov/20	62,1 ± 11,5	35,1 ± 23,7	8,4 ± 5,36	12,3 ± 6,65	<0,001
Ds (g cm ⁻³)	0-10	1,18 ± 0,446	1,06 ± 0,241	1,42 ± 0,133	1,84 ± 0,284	<0,001
	nov/20	1,24 ± 0,38	1,12 ± 0,18	1,44 ± 0,05	1,79 ± 0,34	<0,001

Nota: Ds- densidade do solo; * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$, n.s – Não significativo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.enchente

Observou-se que os valores de argila e densidade do solo foram mais elevados durante os períodos de inundação, especialmente durante as fases de enchente e cheia do rio. Por outro lado, os teores de silte e areia foram mais altos durante os períodos de vazante e seca do rio. Essas variações refletem as mudanças na composição do solo em resposta às flutuações do nível da água ao longo do ano (Figura.8).

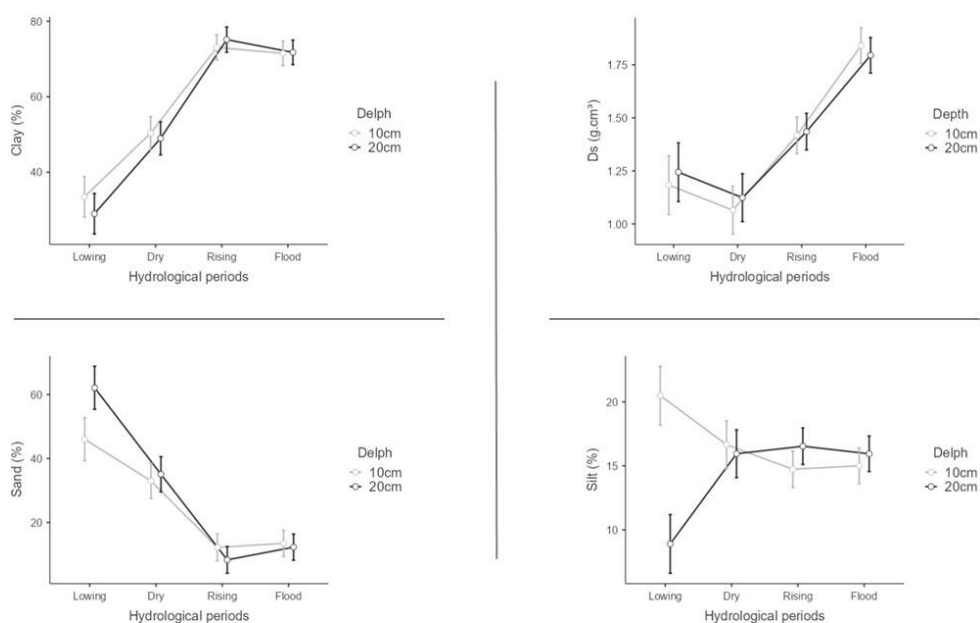


Figura 8: Dinâmica de media marginais das concentração do percentual de Argila (Clay), Areia (Sand), Silte (silt) valor de Densidade (Ds) do solo de floresta de várzea em diferentes períodos hidrológicos de inundação(Lowing-Vazante; Dry- seca; Rising-enchente; Flood- cheia).

Durante o período de vazante, a textura do solo tende a ser Franco-argilo-arenosa, enquanto no período seco ela se torna predominantemente argilosa. Por outro lado, durante o período de enchente e cheia, observa-se uma composição muito argilosa do solo, caracterizando-se por uma maior retenção de água e menor capacidade de drenagem.

Essas variações refletem as mudanças na composição do solo em resposta às flutuações do nível da água ao longo do ano, configuraram textura de Franco argilo arenosa no período vazante, argiloso no período seco e muito argiloso período de enchente e cheia. Além disso, a matriz de correlação (figura 9) indicou quais indicadores físicos apresentaram correlações significativas com as variações no nível do rio, fornecendo insights adicionais sobre como as características do solo respondem às mudanças hidrológicas.

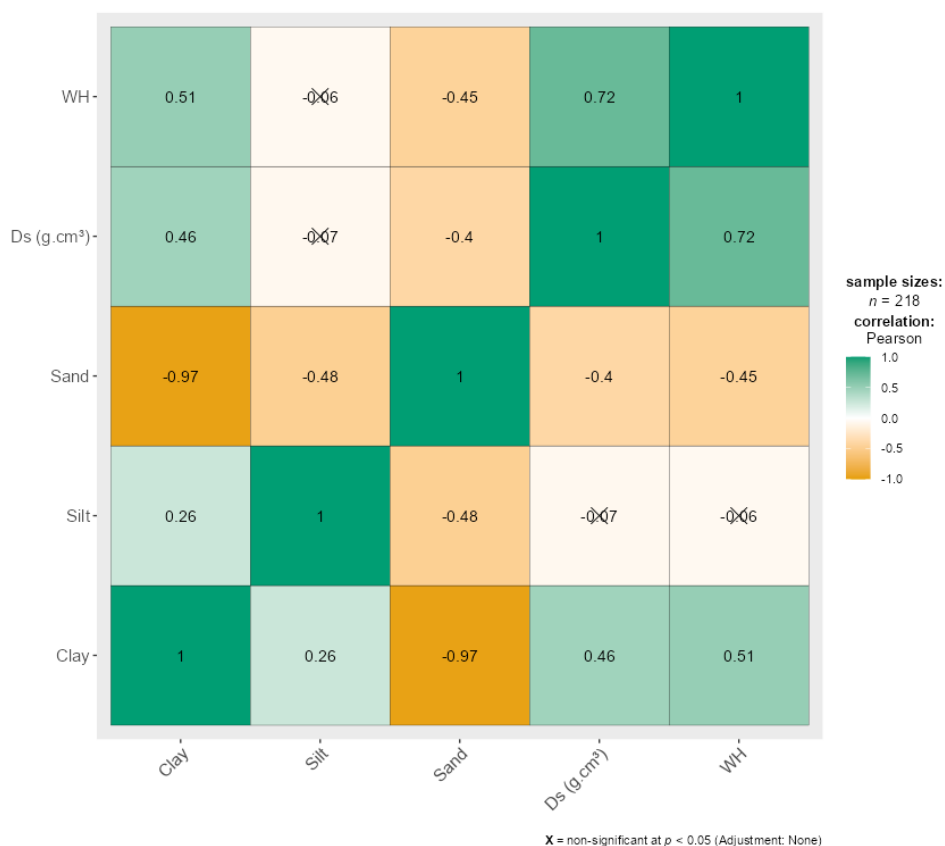


Figura 9: Matriz de correlação dos indicadores Físicos Argila (Clay), Areia (Sand), Silte (silt) valor de Densidade (Ds) de solo com o Nível de água (WH).

Os resultados da estatística descritiva e da análise de variância dos indicadores biológicos do solo estão resumidos na Tabela 3. Todos os indicadores avaliados apresentaram diferenças significativas entre os diferentes períodos hidrológicos, evidenciando a influência dessas variações na composição e nas características biológicas ao longo da mudança dos períodos hidrológicos avaliados.

Esses resultados corroboram com a compreensão da dinâmica do solo sob diferentes condições hidrológicas, destacando a importância de considerar tais flutuações na gestão e conservação dos recursos naturais. Além disso, a análise estatística revelou padrões consistentes de resposta dos indicadores biológicos às variações hidrológicas, o que pode fornecer insights valiosos para a previsão de mudanças futuras no ecossistema.

Tabela 3. Análise de variância de indicadores biológico de qualidade solo em Floresta de várzea

Variáveis	Profundidad e (cm)	Período hidrológico				p-valor*
		Vazante	Seca	Enchente	Cheia	
Om (g kg ⁻¹)	0-10	22,5 ± 8,47	21,6 ± 15,4	16,2 ± 7,33	13,8 ± 3,70	0,002

	nov/20	7,54 ± 6,34	14,7 ± 7,53	16,0 ± 8,41	12,2 ± 1,17	<0,001
TOC (g kg ⁻¹)	0-10	13,03 ± 4,91	12,50 ± 8,92	9,40 ± 4,25	8,02 ± 2,15	0,002
	nov/20	4,38 ± 3,68	8,45 ± 4,37	9,28 ± 4,88	7,06 ± 0,68	<0,001
MBC (μg g ⁻¹)	0-10	385 ± 138,9	331 ± 138,0	254 ± 98,9	186 ± 57,4	<0,001
	nov/20	253 ± 135,2	173 ± 85,6	178 ± 52,4	125 ± 46,1	<0,001
BR (mg CO ₂ kg ⁻¹ soil)	0-10	621 ± 269,2	464 ± 246,5	429 ± 169,2	444 ± 184,7	0,026
	nov/20	253 ± 135,2	173 ± 85,6	178 ± 52,4	125 ± 46,1	0,003
qMic (%)	0-10	22,5 ± 8,47	21,6 ± 15,4	16,2 ± 7,33	13,8 ± 3,70	0,002
	nov/20	7,54 ± 6,34	14,7 ± 7,53	16,0 ± 8,41	12,2 ± 1,17	<0,001
qCO ₂ (%)	0-10	13,03 ± 4,91	12,50 ± 8,92	9,40 ± 4,25	8,02 ± 2,15	0,002
	nov/20	4,38 ± 3,68	8,45 ± 4,37	9,28 ± 4,88	7,06 ± 0,68	<0,001
CSS (mg C ha ⁻¹)	0-10	385 ± 138,9	331 ± 138,0	254 ± 98,9	186 ± 57,4	<0,001
	nov/20	253 ± 135,2	173 ± 85,6	178 ± 52,4	125 ± 46,1	<0,001

Nota: Om- matéria orgânica; TOC- carbono orgânico total; MBC- Carbono da biomassa; BR – Respiração basal do solo; qMic- quociente microbiano; qCO₂ - quociente metabólico ; CSS- estoque de carbono no solo; * p < .05, ** p < .01, *** p < .001, n.s – Não significativo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (chance).

Conforme os resultados apresentados na Figura 10, a atividade microbiana, representada pela respiração basal do solo, mostrou-se mais relevante durante o período inundado de vazante. Resultados semelhantes foram descritos por Santos et al. (2020), evidenciando que, durante o período de cheia, a atividade microbiana permanece elevada, mesmo com o solo saturado, principalmente devido ao aumento da temperatura ambiente. Essa variação sazonal dos indicadores biológicos do solo pode exercer um impacto direto na qualidade dos solos em florestas de várzea, influenciando tanto a produção primária quanto a reciclagem de nutrientes nesses ecossistemas.

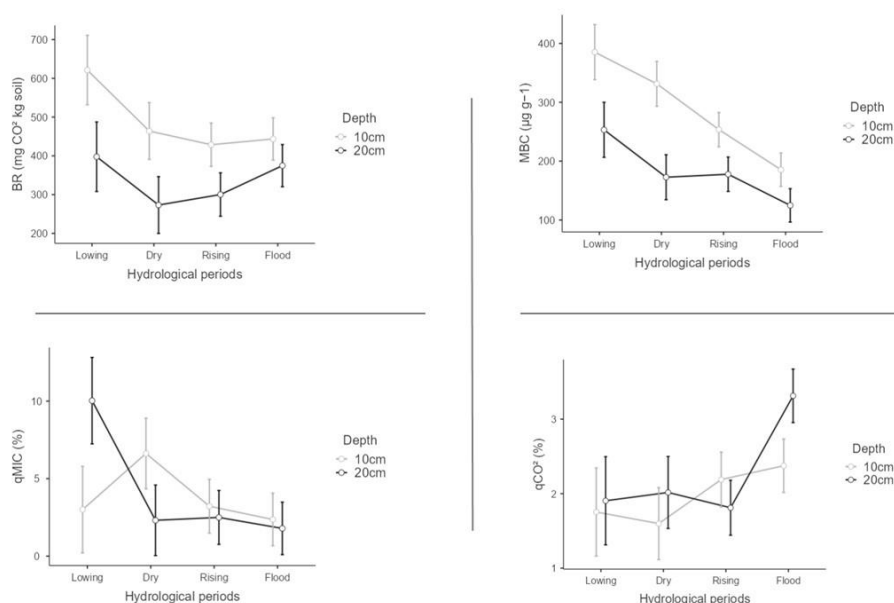


Figura 10: Gráfico de média marginais das concentração do carbono da biomassa microbiana (MBC), Respiacao basal (BR), quociente microbiano (qMic) e quociente metabólico (qCO₂) - do solo de floresta de várzea em diferentes períodos hidrológicos de inundação (Lowing-Vazante; Dry- seca; Rising-enchente; Flood- cheia).

Segundo Szili-Kovács & Takács (2024), a respiração basal do solo é definida como a taxa constante de respiração no solo, originada da mineralização da matéria orgânica do solo. Esta pode ser detectada a partir do consumo de oxigênio ou das taxas de produção de CO₂. A respiração basal do solo é provavelmente a propriedade mais frequentemente utilizada para quantificar mudanças na atividade da microbiota do solo (WINDING et al., 2005). A medição da respiração basal é amplamente aceita como um indicador-chave para avaliar mudanças na qualidade do solo, pois reflete diretamente a atividade metabólica dos microrganismos presentes, que são cruciais para os processos biogeoquímicos e a ciclagem de nutrientes (CREME et al., 2014), portanto, a importância desse indicador reside na sua capacidade de fornecer informações sobre a saúde do solo, a eficiência do ciclo do carbono e a sustentabilidade das práticas de manejo do solo e surpreendentemente, durante o período de cheia, mesmo com o solo saturado, a atividade microbiana mantém-se elevada.

O carbono da biomassa teve diminuição significativas de valores em período de enchente cheias, estudos conduzidos por Chen et al. (2020), os efeitos da inundação do solo na microbiota do solo e sua influência na saúde das plantas foram investigados, onde foi observado que a inundação do solo causou alterações significativas na comunidade microbiana, resultando em mudanças na disponibilidade de nutrientes e na dinâmica do carbono no solo, afetando conseqüentemente o crescimento das plantas.

Em outro estudo, realizado por Xu et al. (2019), os efeitos da inundação do solo na absorção de oxigênio pelas raízes das plantas e seu impacto no metabolismo das plantas foram examinados, e como resultados eles descobriram que a falta de oxigênio no solo durante a inundação pode levar à morte das raízes das plantas devido à hipoxia, resultando em danos significativos ao sistema radicular e na redução da absorção de água e nutrientes pelas plantas.

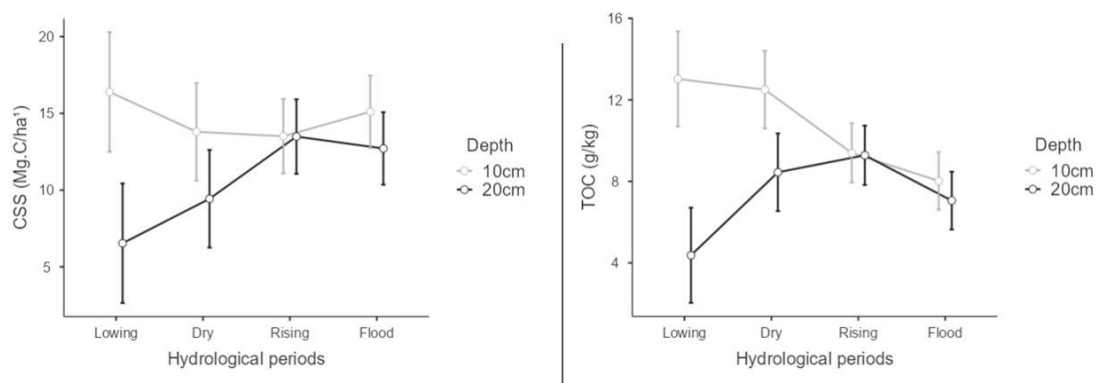


Figura 11: Gráfico de media marginais das concentração do Carbono da biomassa microbiana percentual de Argila (Clay), Areia (Sand), Silte (silt) valor de Densidade (Ds) do solo de floresta de várzea em diferentes períodos hidrológicos de inundação(Lowling-Vazante; Dry- seca; Rising-enchente; Flood- cheia).

O estoque de carbono no solo variou entre 13.5 e 16.8 (mg C há⁻¹), conforme mostrado na Tabela 3. Não foram observadas diferenças significativas nos valores entre os períodos hidrológicos, apesar das mudanças significativas nos teores de carbono orgânico total do solo na camada de 10 cm de profundidade, como ilustrado na Figura 11. Kong et al. (2021), ao investigarem os efeitos da inundação do solo nos estoques de carbono em diferentes tipos de solos, descobriram que a inundação do solo pode resultar em uma redução nos estoques de carbono do solo. Isso ocorre devido à diminuição da decomposição da matéria orgânica causada pela falta de oxigênio. Além disso, a inundação pode aumentar a erosão do solo, levando à perda de carbono para os corpos d'água. Essas descobertas destacam a importância de entender os impactos da inundação do solo nos estoques de carbono e na saúde geral do ecossistema.

Embora o estoque de carbono não tenha apresentado diferenças significativas, foi identificada uma correlação positiva fraca, assim como o quociente metabólico, com o nível de água na matriz de correlação. Por outro lado, o carbono da biomassa e o quociente microbiano demonstraram uma correlação negativa, como evidenciado na Figura 12. Esses resultados indicam que as condições de umidade do solo podem influenciar a atividade microbiana e os processos metabólicos no solo, afetando, indiretamente, a dinâmica do carbono.

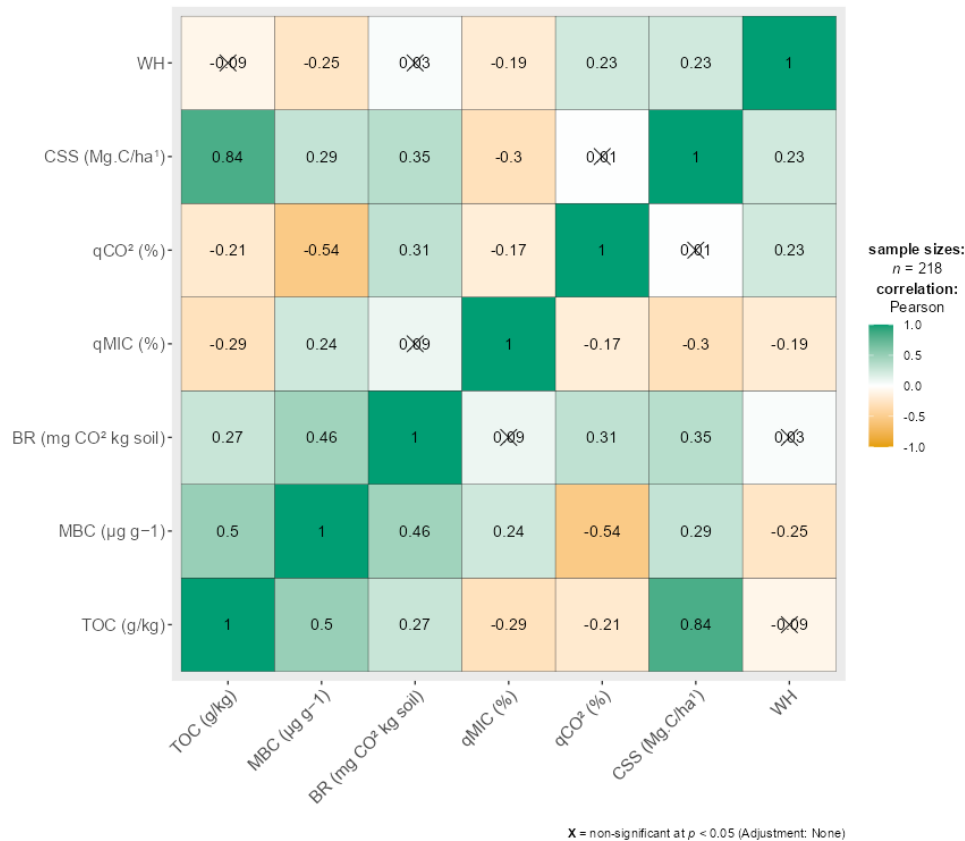


Figura 12: Matrix de correlação dos indicadores biológicos dos solos Argila (Clay), Areia (Sand), Silte (silt) valor de Densidade (Ds) de solo com o Nível de água (WH).

3.2 Estatística multivariada dos indicadores químicos, físicos e biológicos do solo em Floresta de varzea em diferentes períodos hidrológicos

Em uma avaliação da análise multivariada de variância (MANOVA) dos ambientes estudados, o teste de Pillai revelou uma diferença significativa entre os ambientes quando as variáveis foram avaliadas simultaneamente, indicando o efeito de agrupamento dos períodos hidrológicos (Figura 13). Foram utilizados dois gráficos biplots de Análise de Componentes Principais (PCA) para exibir a variação das propriedades do solo durante diferentes períodos hidrológicos. Os gráficos incluem setas que representam diferentes propriedades do solo e pontos que representam observações para os diferentes períodos hidrológicos. O biplot permite visualizar como as variáveis contribuem para a separação entre as condições "inundado" e "seco". A distância entre os pontos e os vetores indica a relação entre as variáveis e as categorias, ou seja, o gráfico ajuda a entender como as variáveis se relacionam e como elas contribuem para a separação dos dados em diferentes condições.

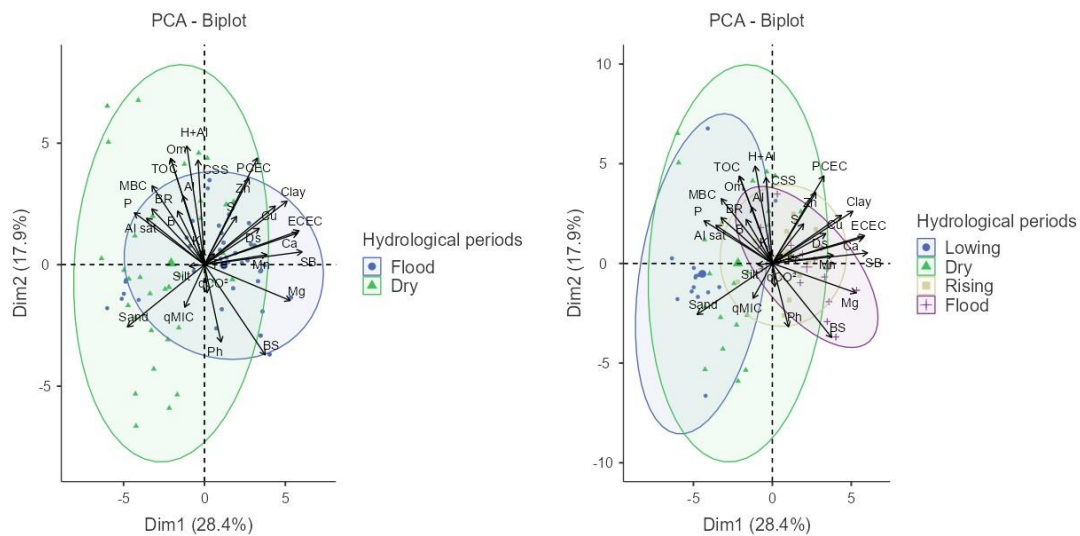


Figura 13: Análise do componente principal dos parâmetros componente principal dos períodos hidrológicos(Lowing-Vazante; Dry- seca; Rising-enchente; Flood- cheia)

O gráfico à esquerda representa dois períodos hidrológicos: Inundação (círculos azuis) e Seco (triângulos verdes). A sobreposição e separação dos pontos e elipses fornecem insights sobre como as propriedades do solo diferem entre os períodos de Inundação e Seco. A separação distinta entre os agrupamentos do período de Inundação (azul) e do período Seco (verde) indica diferenças significativas nas propriedades do solo entre esses períodos. Por outro lado, o gráfico à direita representa quatro períodos hidrológicos: Baixa (círculos azuis), Seco (triângulos verdes), Subida (quadrados bege) e Inundação (cruzes roxas). Este gráfico oferece uma comparação mais detalhada, abrangendo uma gama mais ampla de condições hidrológicas. As variações e separações observadas nos pontos e elipses entre esses quatro períodos fornecem uma visão mais abrangente das mudanças nas propriedades do solo ao longo de diferentes condições hidrológicas.

Os gráficos PCA biplots oferecem um resumo visual claro de como as propriedades do solo variam sob diferentes condições hidrológicas. O agrupamento e a separação dos pontos, juntamente com a direção das setas, auxiliam na identificação das principais propriedades que influenciam o comportamento do solo durante cada período. Essa análise

visual é extremamente valiosa para compreender a dinâmica do solo e pode fornecer insights importantes para práticas de manejo de terra e água em uma variedade de contextos hidrológicos. Ao permitir uma compreensão mais profunda das relações entre as propriedades do solo e as condições hidrológicas, os gráficos PCA biplots (Figura 13) podem orientar decisões e estratégias para otimizar a produtividade agrícola e a sustentabilidade ambiental.

Conclusão

A dinâmica dos períodos de inundação sugere uma influência significativa dos ciclos hidrológicos na distribuição e disponibilidade de nutrientes e elementos no solo de várzea. Durante a inundação, os sedimentos ricos em nutrientes são depositados, enriquecendo o solo e melhorando sua fertilidade. Na fase de seca, esses nutrientes tornam-se disponíveis para as plantas, promovendo o crescimento vegetal e a atividade microbiana. Assim, os ciclos naturais de inundação e seca são fundamentais para a manutenção da fertilidade do solo e a sustentabilidade dos ecossistemas de várzea.

Referências:

Abreu EMA, Fernandes AR, Ruivo MLP (2007). Variação temporal e vertical de atributos química de um gleissolo do rio Guamá cultivado com canaranas , Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa , v. 31, p. 277-285, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200010>.

Afonso A, Barbosa C, Novo E (2011). Mudanças na qualidade da água em lagos de várzea em função do pulso de cheia do rio Amazonas: Lago Grande de Curuaí (Pará). Revista Brasileira de Biologia, v. 71, n. 3, pág. 1–10. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842011000400004>

Alvares CA, Stape JL , Sentelhas PC, Gonçalves JL, De M, Sparovic G (2013). Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. Meteorologische Zeitschrift , Stuttgart, v.22, n.6, p.711–728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Abril, G., Kim, J.-H., Mortillaro, J.-M., Meziane, T., Moreira-Turcq, P., & Sinninghe Damsté, J. S. (2016). Contrastes espaciais e sazonais de matéria orgânica sedimentar em

lagos de várzea da bacia amazônica central. *Biogeosciences*, 13, 467–482. <https://doi.org/10.5194/bg-13-467-2016>

Alcântara, L., Barros, N., Araújo, A., & Amorim, M. (2019). Dinâmica Sazonal de Indicadores Biológicos do Solo em Floresta Ombrófila Densa. *Embrapa Florestas*. Artigo em anais de congresso.

Barbarisi BF, Renó VF, Barbosa CC, Novo EMLM (2010). Integração de dados censitários e de sensoriamento remoto para estimar o rebanho bovino e bubalino da várzea do Baixo Amazonas. Em: Enner Herenio Alcântara, Evlyn márcia Leão de Moraes Novo e José Luiz Stech. (Org.). *Novas Tecnologias para o Monitoramento e Estudo de Reservatórios Hidrelétricos e Grandes Lagos*. 1ed. São José dos Campos: Parêntese Editora, v. 1, p. 257-273. Disponível em : < <https://docplayer.com.br/50776998-Novas-tecnologias-para-o-monitoramento-e-estudo-de-reservatorios-hidreletricos-e-grandes-lagos.html> > Acesso : Novembro 04, 2023.

Bayley P, Petre M (1989). Pescarias amazônicas: métodos de avaliação, situação atual e opções de manejo. *Publicações especiais canadenses pescarias e ciências aquáticas* 106: 385-98.

Brasil EC, Cravo MS, Viégas IJM (2020). *Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará e*. – 2. ed. – Brasília, DF: Embrapa. Disponível em : <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1125022> Acesso : 15 de novembro de 2021.

Barbosa, C. C. F., et al. (2011). Regime hidrossedimentológico do rio Amazonas na escala mensal baseado em dados de satélite (1998-2008). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16(4), 55-68.

Barros, N., et al. (2011). Resuspended sediment fluxes in the lower Amazon River: A major pathway for delivering organic matter to the ocean. *Geophysical Research Letters*, 38.

Cravo, M. S., Xavier, J. J. B. N., Dias, M. C., & Barreto, J. F. (2002). Características, uso agrícola atual e potencial das várzeas no Estado do Amazonas, Brasil. *Acta Amazonica*, 32, 351-366. <https://doi.org/10.1590/1809-43922002323365>

Chambers JQ, Tribuzy ES, Toledo LC, Crispin BF, Higuchi N, Santos JDos, Araújo AC, Kruijt B, Nobre AD, Trumbore SE (2004). Respiração de um ecossistema de floresta tropical: partição de fontes e eficiência de uso de baixo carbono. *Ecology Application*, v.14, n.4 (supl.), p.72-s88, 2004. <https://doi.org/10.1890/01-6012>

Fageria NK (1989). Química de solos de várzea. Em: DECHEN, AR; CARMELLO, QA de C.; FLOSS, EL (Coord.). *SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS*, 2. Piracicaba. Anais. Campinas, Fundação Cargil, pág. 93-114.

Fajardo JDV, Souza LAG, Alfaia SS, (2009). Características químicas de solos de várzeas sob diferentes sistemas de uso da terra, na calha dos rios baixo Solimões e médio Amazonas. *Acta amazônica* vol. 39(4), pág. 731 – 740. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000400001>

Ferreira LV (1997). Efeitos da duração da inundação n / D riqueza de espécies e composição florística em três hectares no Parque Nacional do Jaú em florestas de várzea na Amazônia central. *Biodiversidade e Conservação* , 6(10):1353-1363.

Ferreira SJF, Luizão FJ, Miranda SAF, Silva MSR, Vital ART (2006). Nutrientes n / D solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central foram atendidos seletiva de madeira. *Acta Amazônica* VOL. 36(1) pág. 59 – 68. 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000100008>

Filizola N, Guyot JL (2011). fluxo de sedimentos em suspenso não rios da Amazônia. revista Brasileira de Geociências . Volume 41(4): 566-576. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414566576>

Furch, K. (1995). Analysis of flooding tolerance of plants in the Amazon and in Central Europe. Tese de Doutorado, Universidade de Bayreuth, Bayreuth, Alemanha.

Gaspar, A. B. dos S., Bezerra, D. P., Reis, I. M. S., & da Silva, R. (2023). Chemical and textural properties of floodplain forest soils in the Eastern Amazon, Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 19(1), 91-100. <https://doi.org/10.5897/AJAR2022.16242>

Gama-Rodrigues, E. F., et al. (1996). Characterization of soils from floodplain forests in the Amazon Basin. *Soil Science Society of America Journal*, 60(5), 1426-1437.

Gomes PF (2000). Curso de estatística experimental. 14. ed. Piracicaba: Degaspari , 477p

Gomes AS, Silva CAS, Parfitt JMB, Pauletto EA, Pinto LFS (2006). Caracterização de Indicadores da Qualidade do Solo, com Ênfase Como Áreas de Várzea do Rio Grande do Sul Pelotas: Embrapa Clima Temperado , 40 p. — (Embrapa Clima Temperado . Documentos , 169). Disponível em < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/746124/caracterizacao-de-indicadores-da-qualidade-do-solo-com-enfase-as-areas-de-varzea-do-rio-grande-do-sul>> Acesso : Dezembro 21,2021.

Guimarães ST, Lima HN, Teixeira WG, Neves Junior AF, Silva FWR, Macedo RS, Souza KW (2013). Caracterização e classificação de Gleissolos da várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil ., *Revista Brasileira de Ciências do Solo* 37 (2) • Abr. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200003>

IUSS Grupo de Trabalho WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources (WRB), sistema universal reconhecido pela International Union of Soil Science (IUSS) e FAO. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>.

Jamovi (2021). O projeto jamovi jamovi . (Versão 2.2) [Software de computador]. Recuperado de <https://www.jamovi.org>.

Junk Wj , Krambeck Hj (2000). Clima e hidrologia. In: JUNK, WJ et al. A planície de inundação da Amazônia central: uso atual e opções para um manejo sustentável. Holanda: Backhuys Publishers, Leiden, p. 95-108.

Junk WJ, Piedade MTF, Schöngart J, Cohn-Haft M, Adeney JM, Wittmann FA (2011). Classificação das principais áreas úmidas de ocorrência natural na Amazônia. *Zonas húmidas*, v. 31, n. 4, pág. 623–640. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0190-7>

Junk WJ, Piedade MTF, Wittmann F, Schongart J (2020) *Várzeas Amazônicas : Desafios para um Manejo Sustentável* . - Manaus: Editora do INPA. Disponível em <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/36480>>. acesso em Dezembro 22, 2021. See More

Junk, W. J., et al. (2020). Condições físico-químicas dos solos na várzea da Amazônia Central. In: Junk WJ, Ohly J, Piedade MTF, Wittmann F, Schöngart J (Eds.), *Várzeas Amazônicas: Desafios para um manejo sustentável* (p. 78-86). Manaus: Editora do Inpa. Disponível em: https://repositorio.inpa.gov.br/bitstream/1/36480/3/manejo_sustent%c3%a1vel_das_varzeas.pdf

Junk, W. J.; Piedade, M. T. F.; Wittmann, F.; et al. A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands Ecology and Management**, v. 21, p. 461–475, 2013. DOI: 10.1007/s11273-013-9309-6.

Kochian, L. V.; Pineros, M. A.; Hoekenga, O. A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. **Plant and Soil**, v. 274, n. 1-2, p. 175-195, 2005. DOI: 10.1007/s11104-004-1158-7.

Kopittke, P. M.; Moore, K. L.; Lombi, E.; Gianoncelli, A.; Ferguson, B. J.; Blamey, F. P. C.; ... Menzies, N. W. Identification of the primary lesion of toxic aluminum in plant roots. **Plant Physiology**, v. 167, n. 4, p. 1402-1411, 2015. DOI: 10.1104/pp.114.252643.

Kottek M , Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006). Mapa- mundi da classificação climática de Koppen -Geiger atualizado. *Meteorol . Zeitschr .*, 15(3), 259–263.

Lima HN, Teixeira WG, Souza KW (2007). Os solos da paisagem da várzea com ênfase no trecho entre Coari e Manaus. In: FRAXE, TJP; PEREIRA, HS & WITKOSKI, AC, organizadores. *comunidades ribeirinhas amazônicas : Modos de vida e uso dos recursos naturais* . Manaus, Universidade Federal do Amazonas, p.35-52. Disponível em < https://transforma.fbb.org.br/storage/socialtecnologias/24/files/comunidades_ribeirinhas_modos_de_vida_web.pdf> Acesso : Dezembro 21,2021.

Lima HN, Mello JWV, Schaefer CEGR, Ker JC (2005). Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia à inundação . *Acta amazônica* . Vol. 35(3) 317 – 330. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000300003>

Lopes, A. S., et al. (2013). *The Soils of the Amazon Region*. Springer Science+Business Media.

Magalhães RC, Gomes RCM (2013). Mineralogia e química de solo de várzea e suas suscetibilidades no processo de terras caídas n / D comunidade do divino Espírito Santo-AM. *Sociedade . & Natureza* ., Uberlândia , 25 (3): 609-621. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300013>

Malavolta E (1992). ABC da análise de solos e folhas : sugestão , interpretação e sugestões de adubação . São Paulo: Ceres, 124 p.

Martinelli LA, Vitória RL, Damatte JLI , Richey JE, Devo AH (1993). Composição Química e Mineralógica de Sedimentos de Várzea do Rio Amazonas, Brasil. *Geoquímica Aplicada*, v. 8, n. 4, pág. 391–402. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(93\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(93)90007-4)

Meade RH, Nordin Jr CF, Curtis WF, Costa Rodrigues FM, Do Vale CM, Edmond JM (1979). Transporte de sedimentos no rio Amazonas. *Acta Amazônica* . Vol. 9 (3). <https://doi.org/10.1590/1809-43921979093543>

Melo NC, Souza LC, Costa CAS, Coelho R, Covre WP, Costa DLP (2013). Caracterização química de diferentes sistemas de uso do solo. *revista Agroecossistemas* , Belém , v. 5, n. 2, pág. 8-13. <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v5i2.1793>

Melo, A. C. G., Gonçalves, J. F. C., Silva, M. L. N., & Fernandes Filho, E. I. (2010). Nutrient cycling in Amazon floodplain ecosystems: a review. *Acta Limnológica Brasiliensia*, 22(4), 405-424.

Rayburg, S., Neaves, M., & Thompson-Laing, J. (2023). O impacto da frequência de inundação na heterogeneidade das propriedades do solo superficial da planície de inundação. *Sistema de Solo*, 7, 63. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030063>

Silva, F. W. R., Lima, H. N., Teixeira, W. G., Motta, M. B., & Santana, R. M. (2011). Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (terras pretas de índio) na Amazônia Central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 673-681. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300002>

Souza, E. S. D., Fernandes, A. R., De Souza Braz, A. M., Oliveira, F. J. D., Alleoni, L. R. F., & Campos, M. C. C. (2018). Atributos físicos, químicos e mineralógicos de um grupo representativo de solos da região amazônica oriental do Brasil. *SOIL*, 4, 195–212. <https://doi.org/10.5194/soil-4-195-2018>

Santos, T. F., Menezes, M. O., Lousada, J. M., & Buckeridge, M. S. (2020). Dinâmica sazonal de indicadores biológicos do solo em florestas de várzea da Amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44.

Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. (2018). Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>. Acesso em: 15 de novembro de 2021.

Sobrinho, RL, Bernardes, MC, Abril, G., Kim, J.-H., Zell, CI, Mortillaro, J.-M., Meziane, T., Moreira-Turcq, P., e Sinninghe Damsté, JS : Contrastes espaciais e sazonais de matéria orgânica sedimentar em lagos de várzea da bacia amazônica central, *Biogeosciences*, 13, 467–482, <https://doi.org/10.5194/bg-13-467-2016>, 2016.

Montanher OC, Souza Filho E, Novo E, Barbosa CA (2014). produção de sedimentos em suspensão do rio Amazonas está mudando ? *REVISTA GEONORTE*, [S. l.], v. 5, n. 20, pág.

17–23. Disponível em : www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1511. acesso em : 3 jan. 2022.

Moraes JFV (1973). Efeitos da inundação do solo. II. Influência sobre uma absorção de nutrientes e crescimento de arroz (*Oryza sativa* L.). pesquisa Agropecuária Brasileira , Rio de Janeiro, v.8, n.7, p.103-108.

Ounissi M, Ziouch OR, Aounallah O (2014). Variabilidade das concentrações de nutrientes dissolvidos (N, P, Si) na Baía de Annaba em relação às entradas dos estuários de Seybouse e Mafragh . *Marine Pollution Bulletin* , Amsterdam, v. 80, n. 1-2, pág. 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.030>

Parolin P, Lucas C, Piedade MTD, Wittmann F (2010). Respostas à seca de árvores tolerantes a inundações em várzeas amazônicas. *Annals of Botany* 105: 129–139. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp258>.

Prance GT, Rodrigues WA, da Silva MF (1976). inventário florestal de um hectare de mata de terra firme km 30 da Estrada Manaus - Itacoatiara . *Acta Amazônica* , 6(1):9-35.

Queiroz MMA, Horbe AMC, Moura CAV (2011). Mineralogia e química dos sedimentos de fundo do médio e baixo Madeira e de seus principais tributários : Amazonas – Brasil . *Acta Amazônica* . 41 (4). <https://doi.org/10.1590/S0044-59672011000400003>

Equipe Núcleo R (2021). R: Linguagem e ambiente para computação estatística. (Versão 4.0) [Software de computador]. Recuperado de <https://cran.r-project.org>. (Pacotes R recuperados do instantâneo MRAN 2021-04-01).

Renó V, Novo E (2015). alterações da cobertura florestal de várzea e seus efeitos no bem-estar das pessoas ribeirinhas do Estado do Pará: uma análise exploratória com dados sociodemográficos . *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, Brasil , 25 a 29 de abril de 2015, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em : < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0562.pdf>> Acesso em Dezembro 22, 2021. See More

Santos HG et al (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa . Disponível em < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>> acesso : 15 de novembro de 2021.

Silva SB, Galvão JR, Pastana JC, Silva DR, Almeida KC, Souza FJL, Nascimento ISB (2018). Influência das águas do estuário do Rio Pará na fertilidade do solo das ilhas de várzea em Belém , Pará, *Biotemas* , 31 (4): 15-21. <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7925.2018v31n4p15>

Silva GJ, Neves SMAS, De Paula WCS, Da Silva VN (2017). Relação da cobertura vegetal e uso do solo com o ndvi e a temperatura superficial da área não inundável do pantanal de Cáceres / MT . *Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada.v1i*. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2244>

Silva LS, Ranno SK (2005). calagem em solos de várzea e disponibilidade de nutrientes n / D solução do solo após o alagamento . *Ciência Rural*, Santa Maria, v35, n.5, p.1054-1061, set-out, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000500011>

Sioli H (1968). Hidroquímica e geologia no Brasil região amazônica . *Amazonas*, 1: 267-277.

Sioli H (1984). A Amazônia e seus principais afluentes : hidrografia, morfologia dos cursos dos rios e tipos de rios. In: Sioli , H. (ed) *A Amazônia - Limnologia e ecologia da paisagem de um poderoso rio tropical e sua bacia*. Porcaria. Dordrecht. Holanda, pp. 127-166.

Singh BR, Steinnes E (1994). Contaminação do solo e da água por metais pesados. In: LAI, R. & STEWART, BA, eds. *Avanços na ciência do solo: processo do solo e qualidade da água*. Lewis. p.233-237.

Singh, S. K.; Singh, R.; Kumar, M. Impact of waterlogging on soil nutrient dynamics and growth parameters of rice (*Oryza sativa* L.) under subtropical India. **Paddy and Water Environment**, v. 18, n. 3, p. 563-576, 2020. DOI: 10.1007/s10333-020-00844-0.

Teixeira WG, Lima HN, Pinto WHA, Souza KW, Shinzato E (2019). O manejo do solo nas várzeas da Amazônia G. in: *Manejo e Conservação do Solo e da Água* eds. I. Bertol , IC De Maria, LS Souza. pp.701-728. Editora : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Vale Júnior JF, Souza MIL, Nascimento PPRR, Cruz DLS (2011). Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável . revista *Agro@mbiente On-line*, v. 5, n. 2, p.158-165. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v5i2.562>

Victoria RL, Martinelli LA, Richey JE, Forsberg BR (1989). Variações espaciais e temporais na química do solo na planície de inundação amazônica. *Geojournal* , 19(1): 45-52.

Wang, G.; Liu, H.; Zhou, G. Flooding affects soil phosphorus and potassium availability and uptake by soybean (*Glycine max* L. Merr.) under different soil types. **Plant and Soil**, v. 443, n. 1-2, p. 187-202, 2019. DOI: 10.1007/s11104-019-04077-z.

Wittmann F, Junk JW , Piedade MTF (2004). As florestas de várzea na Amazônia: inundações e a geomorfologia altamente dinâmica interagem com a sucessão florestal natural. *Forest Ecology and Management* 196, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.060>

Szili-Kovács T, Takács T. Biomassa microbiana e propriedades do solo da rizosfera em resposta a inundações contaminadas por metais pesados. *Agricultura* . 2024; 14(5):756. <https://doi.org/10.3390/agriculture14050756>

WINDING, Anne; HUND-RINKE, Kerstin; RUTGERS, Michiel. The use of microorganisms in ecological soil classification and assessment concepts. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 62, n. 2, p. 230-248, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.03.026>

Creame, RE; Schulte, RPO; Apedrejado.; Gal, A.; Krogh, PH; Papai, GL; Murray, PJ; Peres, G.; Foerster, B.; Rutgers, M.; e outros. Medir a respiração basal do solo em toda a Europa: a temperatura e o período de incubação são importantes? *Eco. Indica*. **2014**, *36*, 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.08.015>

Xu, F.; Guo, W.; Xu, W.; Wei, Y.; Wang, R.; & Xu, J. (2019). Physiological and transcriptomic responses of roots to limited soil hypoxia in soybean (*Glycine max L.*) during initial flooding. *BMC Genomics*, v. 20, n. 1, p. 1-18, 2019. DOI: 10.1186/s12864-018-5401-2.

Chen, Y.; Tang, Z.; Sun, S.; Lin, Z.; Li, X.; Zhang, J.; ... & Zhou, J. (2020). Flooding alters the composition and functions of the soil microbial community and promotes the establishment of invasive *Solidago canadensis*. *Science of the Total Environment*, v. 708, p. 135110, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135110.

Liu, Q.; Zhang, W.; Zhang, Y.; & Li, X. (2018). Flooding-induced changes in the availability and distribution of iron, manganese, and zinc in soil aggregates. *Journal of Soils and Sediments*, v. 18, n. 2, p. 567-578, 2018. DOI: 10.1007/s11368-017-1813-2.

Kong, X.; Gao, Y.; Shi, X.; Jiang, Y.; & Zhang, M. (2021). Flooding affects carbon and nitrogen sequestration in paddy soil under long-term different fertilization regimes. *Soil and Tillage Research*, v. 206, p. 104776, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104776.

Junk, W. J., et al. (2020). Condições físico-químicas dos solos na várzea da Amazônia Central. In: Junk WJ, Ohly J, Piedade MTF, Wittmann F, Schöngart J (Eds.), *Várzeas Amazônicas: Desafios para um manejo sustentável* (p. 78-86). Manaus: Editora do Inpa. Disponível em: https://repositorio.inpa.gov.br/bitstream/1/36480/3/manejo_sustent%c3%a1vel_das_varzeas.pdf

Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Wittmann, F., et al. (2013). A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 21, 461–475.

Lopes, A. S., et al. (2013). *The Soils of the Amazon Region*. Springer Science+Business Media.

Melo, A. C. G., Gonçalves, J. F. C., Silva, M. L. N., & Fernandes Filho, E. I. (2010). Nutrient cycling in Amazon floodplain ecosystems: a review. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 22(4), 405-424.

Rayburg, S., Neaves, M., & Thompson-Laing, J. (2023). O impacto da frequência de inundação na heterogeneidade das propriedades do solo superficial da planície de inundação. *Sistema de Solo*, 7, 63. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030063>

Silva, F. W. R., Lima, H. N., Teixeira, W. G., Motta, M. B., & Santana, R. M. (2011). Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (terras pretas de índio) na Amazônia Central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 673-681. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300002>

Souza, E. S. D., Fernandes, A. R., De Souza Braz, A. M., Oliveira, F. J. D., Alleoni, L. R. F., & Campos, M. C. C. (2018). Atributos físicos, químicos e mineralógicos de um grupo representativo de solos da região amazônica oriental do Brasil. *SOIL*, 4, 195–212. <https://doi.org/10.5194/soil-4-195-2018>

Santos, T. F., Menezes, M. O., Lousada, J. M., & Buckeridge, M. S. (2020). Dinâmica sazonal de indicadores biológicos do solo em florestas de várzea da Amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44.

Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. (2018). Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>. Acesso em: 15 de novembro de 2021.

IUSS Grupo de Trabalho WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources (WRB), sistema universal reconhecido pela International Union of Soil Science (IUSS) e FAO. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos indicadores de solos em áreas de floresta de várzea da calha do rio Amazonas consistiu em caracterizar de forma ampla, primeiramente, a distribuição espacial desses indicadores ao longo da calha do rio. Em seguida, analisou-se a relação dos indicadores com as práticas de manejo agrícola empregadas nessas áreas. Finalmente, investigou-se a dinâmica dos indicadores ao longo do pulso de inundação. Essa abordagem permite compreender como os diferentes fatores ambientais e antropogênicos influenciam a qualidade do solo e sua capacidade de sustentar a biodiversidade e a produtividade agrícola. A análise espacial detalhada oferece insights sobre a variabilidade dos solos em resposta às variações topográficas e hidrológicas. A avaliação das práticas de manejo agrícola ajuda a identificar métodos que promovam a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais. O estudo da dinâmica dos indicadores durante o pulso de inundação é crucial para entender como os ciclos naturais de inundação e seca afetam a fertilidade do solo, a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana, fornecendo informações essenciais para a gestão e a conservação das áreas de várzea.

A avaliação dos solos em regiões amazônicas apresenta desafios significativos devido à vastidão da área. Além disso, analisar solos na calha dos rios é um desafio adicional, pois essas regiões são submetidas a diversas alterações naturais e antrópicas que podem modificar as características dos solos de várzea. Os solos na calha do rio Amazonas estão sujeitos a múltiplas intempéries, tanto naturais quanto antrópicas, que alteram suas características ao longo do tempo e do espaço. A agricultura praticada nessas áreas, seja de forma familiar ou convencional, juntamente com outras atividades de uso e ocupação do solo, como habitação, exploração florestal e pecuária, alteram significativamente as características naturais dos solos de várzea.

O pulso de inundação natural, seja monomodal ou plurimodal, encontrado nas áreas de várzea amazônicas, é o principal fator de modelação das características naturais do solo nesse tipo de ambiente. No entanto, mesmo sendo um fenômeno natural, ele altera de forma distinta as características do solo, dependendo da região em que ocorre, da vegetação e do relevo específicos do local, bem como do tempo de inundação a que a área está sujeita. Do ponto de vista científico, é crucial entender que a dinâmica dos solos amazônicos é complexa e multifacetada, envolvendo interações entre fatores hidrológicos, biológicos e antrópicos.

A análise detalhada desses solos requer abordagens multidisciplinares que considerem a variabilidade espacial e temporal das inundações, as práticas de uso da terra e as respostas ecológicas dos solos a essas perturbações. Estudos de longo prazo e monitoramento contínuo são essenciais para uma compreensão mais abrangente das mudanças nas características dos solos de várzea e para o desenvolvimento de práticas de manejo sustentável que minimizem impactos negativos e preservem a integridade ecológica da região.

São necessários estudos complementares que fragmentem os indicadores de qualidade do solo e aprofundem ainda mais na relação individual de cada indicador com as variações de nível de água e deposição de sedimentos. Esse enfoque detalhado é crucial para uma compreensão mais clara do efeito individual do pulso de inundação em cada indicador de qualidade do solo.

Ao analisar separadamente cada indicador, como a matéria orgânica, a respiração basal do solo, os nutrientes disponíveis e a atividade microbiana, será possível identificar como cada um responde às mudanças no nível de água e à deposição de sedimentos durante o ciclo de inundação e seca. Essa abordagem permitirá identificar as dinâmicas específicas

que influenciam a fertilidade do solo, a saúde dos ecossistemas e a eficiência das práticas agrícolas na várzea. Compreender essas relações em detalhe pode fornecer informações valiosas para a implementação de estratégias de manejo sustentável, que aproveitem os benefícios naturais das inundações enquanto minimizam os impactos negativos, promovendo a conservação e a resiliência dos solos de várzea na bacia do rio Amazonas.

ANEXO I- CAPÍTULO I PUBLICADO NA REVISTA AFRICAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH

Chemical and textural properties of floodplain forest soils in the Eastern Amazon, Brazil.

Avner Brasileiro dos Santos Gaspar¹, Diego Pereira Bezerra², Iolanda Maria Soares Reis³, Rodrigo da Silva^{1,2}

¹Postgraduate Program in Society, Nature, and Development (PPGSND), Biodiversity and Forest Institute (IBEF), Federal University of Western Pará, Santarém, Pará, Brazil.

²Engineering and Geoscience Institute (IEG), Federal University of Western Pará, Santarém, Pará, Brazil.

³Biodiversity and Forest Institute (IBEF), Federal University of Western Pará, Santarém, Pará, Brazil.

*Corresponding author: e-mail address: avnergaspar@gmail.com

Soils in floodplain ecosystems are sedimentary and subject to removal, transport, and deposition processes caused mainly by the water cycle, contributing to frequent variations in landscape patterns and continuous transformation of the floodplain environment. Given the constant disturbance caused by flood pulse variability, it is difficult to assess soil properties in floodplain ecosystems. Soil samples were collected at a depth of 0–0.10 m at floodplain and upland forest sites between Santarém and Gurupá, Pará State, Brazil. Samples were analyzed for pH H₂O, aluminum, calcium, magnesium, potassium, phosphorus, total organic carbon, boron, zinc, copper, iron, manganese, sand, silt, and clay. Potential and effective cation-exchange capacity, sum of bases, base saturation, aluminum saturation, and organic matter were calculated. Data were subjected to descriptive analysis, analysis of variance, correlation analysis, and hierarchical clustering. Chemical and textural parameters differed significantly between floodplain and upland forest soils. Soil properties were highly heterogeneous. Aluminum and, aluminum saturation had the highest coefficients of variation among floodplain samples, whereas pH H₂O and base saturation had the lowest. It is possible to infer from the results that floodplain forest soils maintain high levels of fertility. However, this environment also shows high acidity and toxic levels of exchangeable aluminum.

Key words: flood pulse, soil fertility, floodplain ecosystem.

INTRODUCTION

Lowland forests along the banks of white-water rivers are known as floodplain forests and represent the most extensive type of flooded forests in South America (BAYLEY & PETRERE, 1989), occupying 1.5 to 2% of the total area of the Amazon River basin (about 29 million hectares or 288.42 km²) (JUNK, 2000; WITTMANN et al., 2004). Initially,

floodplains were little-used areas predominately occupied by native vegetation, whose composition may vary according to terrain elevation and duration of the annual flooding period. However, studies have shown a 52% reduction in floodplain forest areas between 1970s and 2008 in the Lower Amazon region (RENÓ & NOVO, 2015), accompanied by intensification of agricultural activity (BARBARISI et al., 2010) and degradation of water quality for human use (AFFONSO et al., 2011).

Floodplain forests have great potential for food production in the Amazon, given the high natural fertility of soils along river banks in this region. This explains the intense occupation of these areas, as well as their replacement by a broad range of agricultural activities (FARJADO et al., 2009). The vast majority of upland soils in the Amazon are nutrient-poor and provide low agricultural yields, as their ancient geological origin resulted in advanced weathering, according to Ferreira et al. (2006) and Vale Júnior et al. (2011). By contrast, floodplain soils are much more fertile because they originate from solid particles in suspension in the Amazon River, rich in montmorillonite, which has high ion-exchange capacity, and illite, which releases potassium upon decomposition (JUNK et al., 2011). As described by Junk et al. (2020), these minerals of Andean and pre-Andean origin are deposited in few-millimeter-thick layers during annual floods.

According to Ferreira (1997), the low topography of the Amazon River basin, combined with the seasonality of rainfall, results in the flooding of plains for up to six months a year, and the annual fluctuation of the water level of the Amazon River and its tributaries can reach 14 m. These factors promote the formation of soils of sedimentary origin exposed to removal, transport, and deposition processes associated with the water cycle (SILVA et al., 2017).

Developed in lowland areas from sediments deposited by river waters, floodplain soils have a diverse textural and mineralogical composition, varying greatly from one site to another and causing changes in landscape patterns. Floodplains are periodically enriched by sediment deposition during seasonal or tidal floods, resulting in relatively higher fertility than that found in non-flooded upland or *terra-firme* sites (SIOLI, 1984; MARTINELLI et al., 1993; PAROLIN et al., 2010; QUEIROZ et al., 2011). However, it is still necessary to elucidate whether this behavior is similar throughout different reaches of the Amazon River and how it compares to that of upland forests soil.

Based on the premise that there is little information on soil composition in floodplain environments in the Amazon region, this study seeks to answer the following question: How do soil physical and chemical parameters vary between floodplain and upland environments along the Amazon River channel? Given that floodplain soils have a sedimentary origin and are exposed to removal, transport, and deposition processes related to the water cycle, it is assumed that floodplain soil constituents show great variation. This study aimed at (i) quantify soil chemical and textural properties in floodplains, (ii) compare soil composition between floodplain and upland environments, and (iii) evaluate soil quality in a floodplain forest along the Amazon River channel.

MATERIALS AND METHODS

Study sites

The study sites comprise a floodplain forest along the Amazon River channel in a region extending between the municipalities of Santarém and Gurupá, Pará State, Eastern Amazon, Brazil, and a native upland forest fragment located in the Arapixuna District, Santarém, which was used as control (Figure 1).

The climate of the region is of the Am type (tropical monsoon) in the Köppen–Geiger classification (KOTTEK et al., 2006). The average relative humidity is 85% and the average annual temperature 26 °C. There are two seasons, a dry season with a monthly rainfall of 100 mm and a rainy season with monthly rainfall values above 200 mm, starting in December (CHAMBERS et al., 2004; ALVARES et al., 2013).

According to Vitória et al. (1989), floodplain forest soils are poorly developed and are mainly represented by the orders Neosols, Gleysols, Organosols, and Vertisols. These soils can be either eutrophic or dystrophic depending on topographic location, water effects, and sediment origin. The upland soil was classified as Yellow Latosol. Soil classification followed the Brazilian Soil Classification System (Santos et al., 2018). In the World Reference Base for Soil Resources, the orders Neosols, Gleysols, Organosols, Vertisols, and Latosols correspond respectively to the orders Fluvisols, Gleysols, Histosols, Vertisols, and Ferralsols (IUSS, 2015).

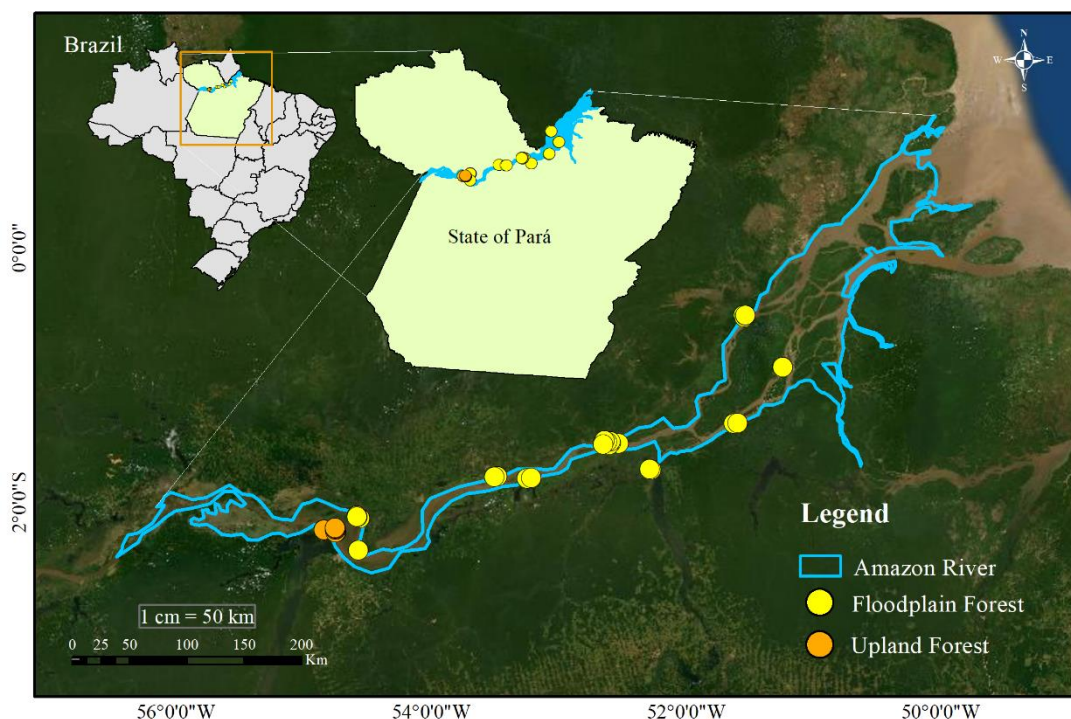


Figure 1. Location map showing soil collection sites in Pará State, Brazil. Source: Authors.

Soil collection and analysis

Soil samples were collected using a Dutch auger in January and February 2020. A total of 60 points were sampled over approximately 10,000 m² of floodplain forest along the Amazon River plus 18 control points in native upland forest in the Arapixuna community. Each sample consisted of 10 subsamples collected at a depth of 0–0.10 m. Samples were collected from points exposed to minimal or no anthropogenic action, as proposed by Singh and Steinnes (1994). After the collection, soil samples were air dried and sieved through 2 mm mesh before chemical and physical characterization.

The following chemical properties were evaluated: pH H₂O, aluminum (Al³⁺), calcium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), potassium (K⁺), phosphorus (P), total organic carbon (TOC), boron (B), zinc (Zn), copper (Cu), iron (Fe), and manganese (Mn). Soil pH was determined in H₂O using a soil/solution ratio of 1:2.5. Ca²⁺, Mg²⁺, and Al³⁺ were extracted with 1 N KCl, and P, K⁺, Zn, Cu, Fe, and Mn were extracted with Mehlich-1 (double-acid extraction solution containing 0.0125 M H₂SO₄ + 0.05 M HCl). After extraction, cations were determined by atomic absorption spectroscopy. TOC was determined by oxidation with potassium dichromate in the presence of sulfuric acid, followed by titration of excess dichromate with ferrous ammonium sulfate. These generated data were used to calculate the

following parameters: potential cation exchange capacity (PCEC), effective cation exchange capacity (ECEC), sum of bases (SB), base saturation (BS), aluminum saturation, and organic matter (OM). The physical properties evaluated were sand, silt, and clay contents. All analyses were performed according to the methods described by Teixeira et al. (2019). Nutrient contents were classified according to Brasil et al. (2020).

Data analysis

Data were subjected to descriptive analysis, normality test, univariate analysis of variance (ANOVA) with comparison of means by student's *t*-test, and Spearman correlation analysis for comparison of soil chemical and textural properties between study sites. In addition to these tests, given the multivariate structure of the dataset, statistical techniques were used to normalize the data to zero mean and unit variance to ensure that all variables contributed equally to the model. Then after this procedure, transformed data were subjected to hierarchical cluster analysis and principal component analysis (PCA).

Data were subjected to multivariate analysis of variance (MANOVA) with Pillai's trace test to analyze the relationship between several response variables and a common set of predictors at the same time. Hierarchical cluster analysis was performed by calculating the Euclidean distance between collections for a set of 22 variables (pH H₂O, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H + Al, K⁺, P, S, OM, B, Zn, Cu, Fe, Mn, ECEC, PCEC, SB, BS, Al saturation, silt, clay, and sand) and using Ward's algorithm to identify groups composed of similar collections. Results are presented graphically in the form of a dendrogram illustrating groupings of samples. Hierarchical cluster analysis was complemented by PCA, a technique that allowed to obtain a smaller set of combinations, qualitatively assess soil characteristics of floodplain and upland forests, and identify the variables that most strongly related to each site. Statistical analyses were performed using the free software Jamovi (version 1.8, 2021) and R (version 4.03, R Core Team, 2020).

RESULTS

Descriptive analysis of chemical and textural properties of floodplain and upland soils

The results of exploratory analysis of chemical and textural attributes of floodplain and upland soils are presented in Table 1 and Figure 2.

Table 1. Descriptive statistics and Analysis of variance (ANOVA) of soil chemical and textural properties in floodplain and upland forests in Pará State, Brazil.

Soil property	Floodplain forest			Upland forest			<i>p</i>	ANOVA	
	Mean	SD	CV (%)	Mean	SD	CV (%)		Mean difference	SE difference
pH H₂O	5.1	0.4	8.3	3.7	0.2	4.3	<0.001	1.4	0.1
OM (g kg⁻¹)	15.7	5.4	34.3	25.4	6.6	26.1	<0.001	-9.7	1.5
P (mg dm⁻³)	51.5	41.3	80.5	23.4	12.8	54.8	0.006	28.1	9.9
S (mg dm⁻³)	19.8	13.6	68.6	6.1	0.4	5.91	<0.001	13.7	3.2
K (mg dm⁻³)	109.1	80.4	73.7	25.1	15.8	62.8	<0.001	83.9	19.1
Ca (cmol dm⁻³)	5.4	1.8	33.8	0.4	0.3	73.5	<0.001	4.9	0.4
Mg (cmol dm⁻³)	2.5	1.4	56.2	0.8	0.1	82.4	<0.001	2.3	0.3
Al (cmol dm⁻³)	1.1	1.1	97.9	1.9	0.3	17.7	0.006	-0.7	0.3
H + Al (cmol dm⁻³)	4.3	1.8	42.9	6.3	1.2	19.6	<0.001	-2.1	0.5
SB (cmol dm⁻³)	8.1	2.3	28.2	0.7	0.4	54.2	<0.001	7.5	0.5
PCEC (cmol dm⁻³)	12.3	3.3	26.5	7.0	1.4	19.5	<0.001	5.5	0.8
ECEC (cmol dm⁻³)	9.3	2.5	26.9	2.5	0.5	17.7	<0.001	6.8	0.6
BS (%)	64.9	11.4	17.6	9.4	5.2	55.6	<0.001	55.6	2.8
Al saturation (%)	12.3	11.1	89.6	74.9	11.7	15.6	<0.001	-62.5	3.01
B (mg dm⁻³)	0.2	0.05	24.4	0.2	0.03	20.2	0.026	0.02	0.01

Cu (mg dm⁻³)	3.3	1.6	48.0	3.1	1.7	54.5	0.596	0.2	0.4
Fe (mg dm⁻³)	315.8	208.8	66.1	504.1	263.9	52.4	0.002	-188.5	59.7
Mn (mg dm⁻³)	50.2	44.3	88.3	79.3	63.2	79.7	0.031	-29.2	13.2
Zn (mg dm⁻³)	4.2	2.1	49.4	5.1	2.4	46.6	0.118	-0.9	0.6
Clay (g kg⁻¹)	233.5	77.6	33.2	685.6	130.5	19.1	<0.001	-452.1	24.8
Silt (g kg⁻¹)	321.421	270.9	84.3	173.7	56.9	32.7	0.025	147.8	64.5
Sand (g kg⁻¹)	445.1	268	60.2	140.8	121.5	86.3	<0.001	304.3	65.3

Source: Authors.

SD, standard deviation; CV, coefficient of variation; SE, standard error; OM, organic matter; SB, sum of bases; PCEC, potential cation-exchange capacity; ECEC, effective cation-exchange capacity; BS, base saturation.

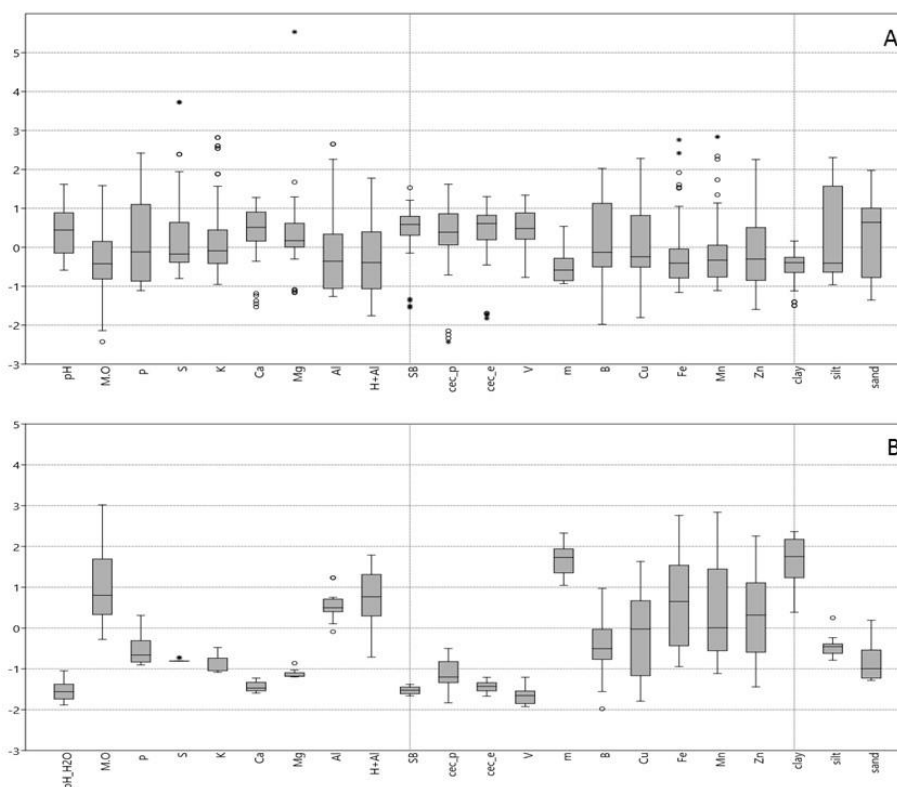


Figure 2. Boxplot showing the variation in normalized soil properties for (A) floodplain and (B) upland forests in Pará State, Brazil. OM, organic matter; SB, sum of bases; PCEC, potential cation-exchange capacity; ECEC, effective cation-exchange capacity; BS, base saturation; Al sat, aluminum saturation. Source: Authors.

The coefficient of variation (CV) depicts the dispersion of data in relative terms (%). A CV of less than 30% indicates intermediate or low dispersion around mean values (homogeneous data). A CV greater than 30%, on the other hand, indicates high dispersion of data in relation to the mean, representing heterogeneous data, as described by Gomes (2000).

For floodplain soil, 27% of variables were considered homogeneous (CV < 30%), namely pH H₂O < BS < B < PCEC < ECEC < SB, in ascending order of CV. For upland soil, the homogenous parameters were pH H₂O < S < Al saturation < ECEC < Al < clay < H + AL < PCEC < B < OM, representing 45.5% of variables. The parameters with high CV (>30%) for floodplain soil were, in ascending order, clay < Ca²⁺ < OM < H + Al < Cu < Zn < Mg²⁺ < sand < Fe < S < K⁺ < P < silt < Mn < Al saturation < Al³⁺. For upland soil, the heterogeneous parameters were silt < Zn < Fe < SB < Cu < P < BS < K⁺ < Ca²⁺ < Mn < Mg²⁺ < sand. These parameters accounted for 73% and 54.5% of all variables, respectively.

Quality of floodplain and upland soils

The quality attributes of floodplain soil were assessed according to reference values published by Brasil et al. (2020). The soil was found to have intermediate to high acidity (4.4 to 4.9), with a mean pH of 5.1 (Table 1). Similar pH values, namely pH 4.94 and 5.83, were reported by Silva et al. (2018) and Teixeira et al. (2019), respectively. K⁺ availability in soil ranged from low to very high, as a result of the high data dispersion. Mean K⁺ values, however, indicated high availability.

Physical parameters of floodplain soil are described in Table 1. Physical parameters showed high dispersion, representing heterogeneous data. For upland soil, however, the physical parameters were homogeneous. Classification of soil texture (Figure 3) was based on the Brazilian Soil Classification System (SANTOS et al. 2018). A predominance of sandy clay loam (61.67%) and silt loam (31.67%) was observed. The other floodplain samples were classified as silty clay loam, clay loam, sandy loam/loamy sand, and sand. These findings are in agreement with the results of Guimarães et al. (2013). Upland soil samples were classified as very clayey (77%) and clayey (23%).

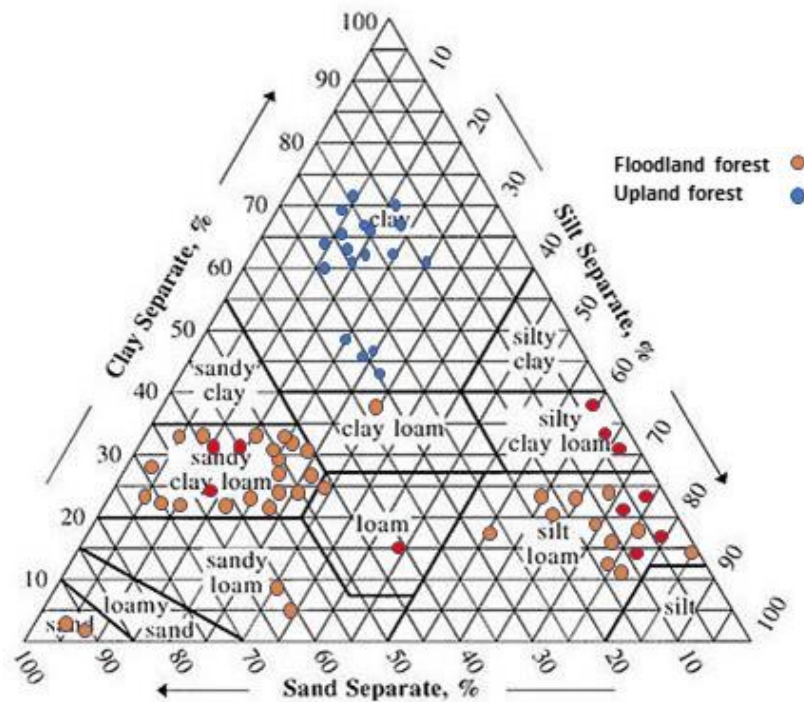


Figure 3. Texture triangle for 0–0.10 m depth soil samples collected from floodplain and Upland forests in Pará State, Brazil, according to the Brazilian Soil Classification System. Source: Authors.

The high variability of chemical and textural data is due to the fact that, although samples were collected on the banks of the Amazon River, collection points differed in vegetation and sediment discharges from tributaries and rivers that form the Amazon basin (MEADE et al., 1979; FILIZOLA & GUYOT, 2011; SILVA et al., 2005; MONTANHER et al., 2014; SILVA et al., 2018).

Comparison of floodplain and upland soil properties

Floodplain soils are influenced by the hydrodynamics of the Amazon River and its muddy water tributaries, especially those that are rich in suspended sediments. Rivers form beds and deposit sediments in these areas, contributing to frequent landscape variations and continuous transformation of floodplain environments.

The correlation matrix (Figure 4) revealed that there were significant relationships between soil properties for floodplain samples compared with upland soil samples. Fageria (1989) and Junk et al. (2020) stated that poor drainage or hydromorphism of floodplain soils

promotes oxidation–reduction processes, altering soil chemical attributes and nutrient dynamics.

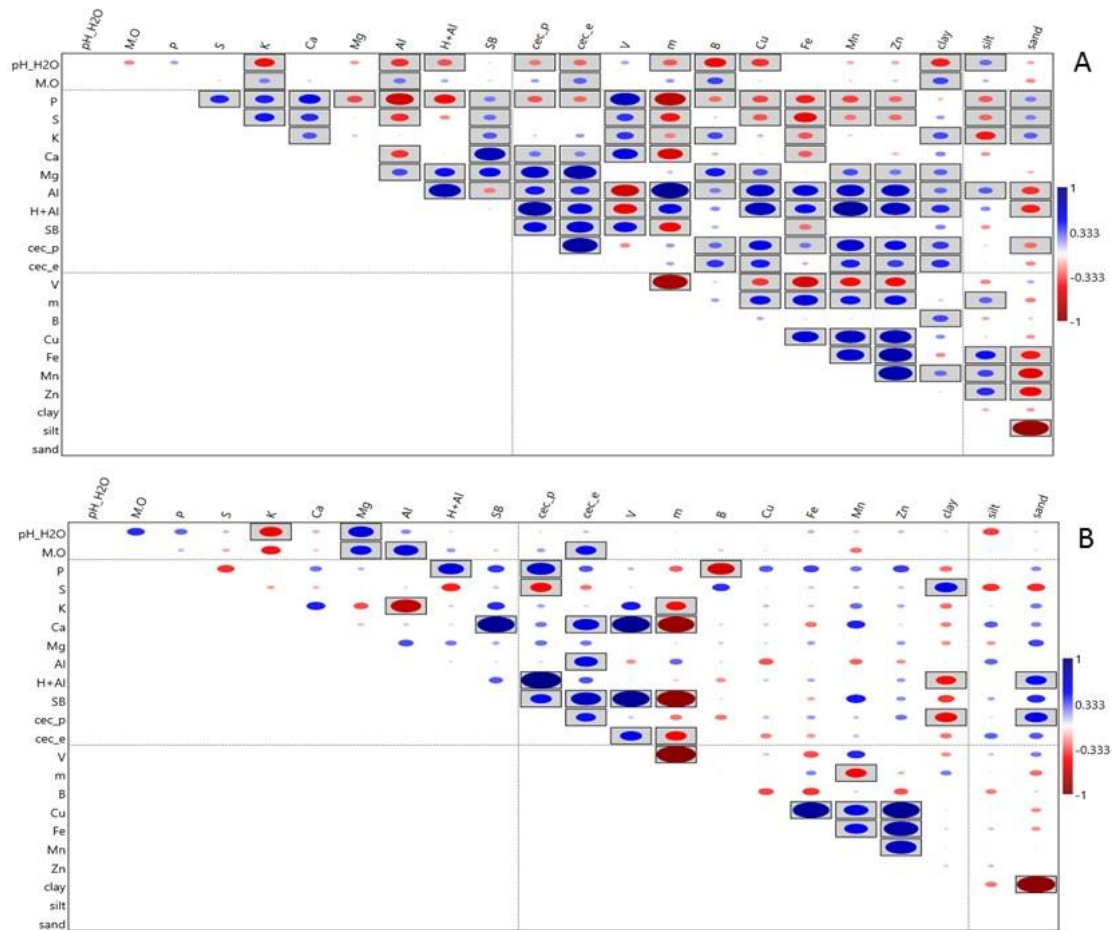


Figure 4. Spearman correlation matrix for soil properties in (A) floodplain and (B) upland forests in Pará State, Brazil. OM, organic matter; SB, sum of bases; PCEC, potential cation-exchange capacity; ECEC, effective cation-exchange capacity; BS, base saturation; Al sat, aluminum saturation. Source: Authors.

Multivariate exploratory analysis of chemical and textural properties of floodplain and upland soils

A Euclidean distance of 28 was used for hierarchical clustering (Figure 5), which allowed ordering samples into two groups. The first group (G1) represented upland soil samples with similar clay, Al saturation, H + Al, Al^{3+} , Cu, Fe, Mn, and Zn values. The second group (G2) encompassed floodplain samples showing similarity in silt, pH, BS, P, K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} .

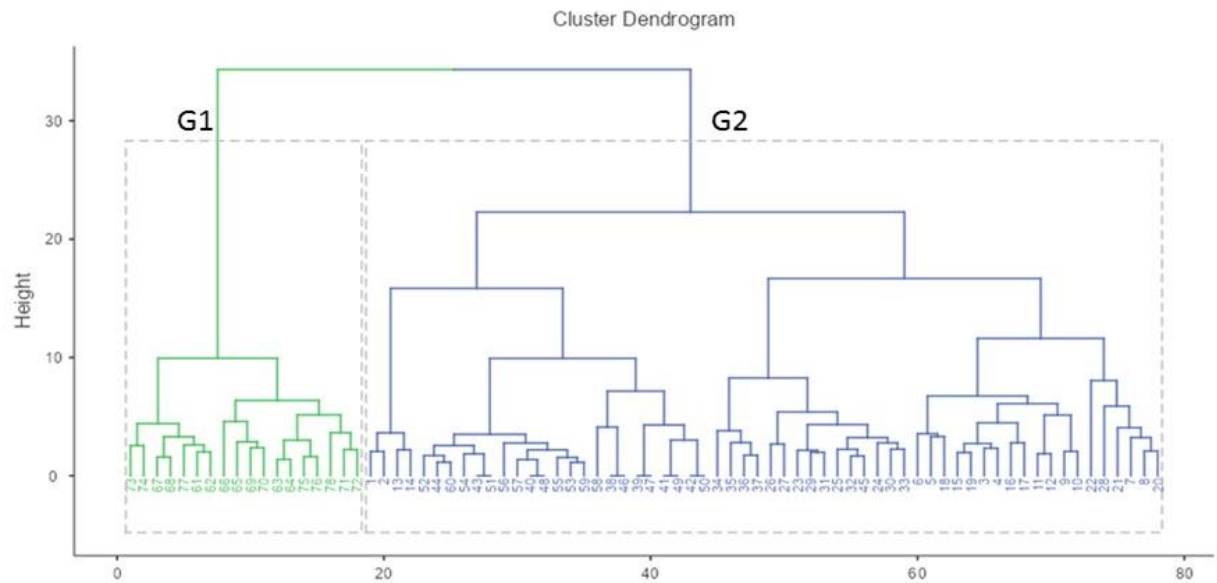


Figure 5. Hierarchical cluster analysis dendrogram of soil properties in (G1) upland and (G2) floodplain forests in Pará State, Brazil. Source: Authors.

PCA was performed using a data matrix composed of 22 variables and 78 soil samples (Figure 6). Data were normalized to mean 0 and variance 1, given the high variation in the order of magnitude of samples. The two principal components (PCs) described together 61% of the total variance in the dataset. PC1 explained 41.4% of the variance. The variables with the highest positive weights in PC1 were BS, Ca^{2+} , and $\text{pH H}_2\text{O}$. The highest negative weight was that of Al saturation. PC1 represents, therefore, the chemical properties that characterize soil fertility, being associated with the majority of floodplain samples.

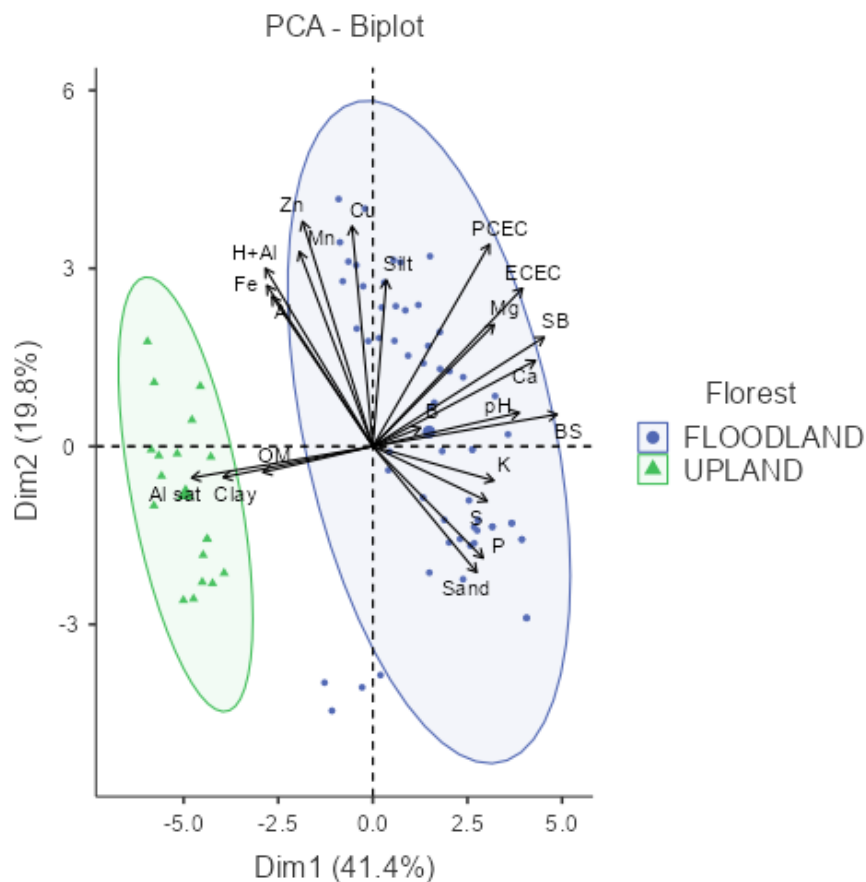


Figure 6. Principal component analysis (PCA) ordination biplot for soil chemical properties at 0–0.10 m depth in floodplain and upland forests in Pará State, Brazil. OM, organic matter; SB, sum of bases; PCEC, potential cation-exchange capacity; ECEC, effective cation-exchange capacity; BS, base saturation; Al sat, aluminum saturation. Source: the authors.

PC2 explained 19.8% of the total variance in the dataset. The variables with the highest weights were micronutrient (Cu, Fe, and Zn) contents and the highest negative weight was that of P content. PC2 represents the micronutrient content of soil and was mainly associated with upland samples. Multivariate analysis showed that chemical and textural properties differ significantly between floodplain and upland environments.

DISCUSSION

Dispersion of normalized data and variable weights were similar between floodplain and upland soil samples (Figure 2). However, there was higher discrepancy between floodplain samples, because, although seasonal flooding occurs regularly in floodplain areas, flooded

forests have different hydrochemical and vegetative characteristics (SIOLI, 1968), as a result of depositions originating from different regions (PRANCE, 1976).

Melo et al. (2013), Farjado et al. (2009), Magalhães and Gomes (2013), and Lima et al. (2005) analyzed the chemical properties of soils with different plant covers. pH H₂O values were 5.38, 5.0, 6.3, and 4.84, respectively, showing the low natural acidity of soils in these areas. It is worth mentioning that pH variations caused by flooding have a marked influence on nutrient availability. Neutral soil pH in floodplain soil increases nutrient availability compared with upland soil (MORAES, 1973).

Because of the heterogeneity and hydromorphism of floodplain soils, samples differed greatly in morphological, physical, chemical, and mineralogical characteristics, being grouped into different classes with different limitations and uses (GOMES, et al. 2006; LIMA et al., 2007). High levels of Al³⁺ (1.12 cmol_c dm⁻³) in soil limit plant development, as stated by Silva et al. (2018). The value observed in the current study was much higher than those reported by Farjado et al. (2009) and Magalhães and Gomes (2013), namely 0.08 and 0.00 cmol_c dm⁻³, respectively, but within the range of 0.19 to 2.50 cmol_c dm⁻³ described by Teixeira et al. (2019) and Lima et al. (2005) for several types of floodplain soils. Abreu et al. (2007), while evaluating the chemical and physical properties of a humic Gleysol under forage species, argued that Al is directly affected by the water condition of the site, in that high amounts of water lead to a decrease in Al.

Floodplain soils had high levels of Ca²⁺ and Mg²⁺, according to the classification of Brasil et al. (2020), with means of 5.38 cmol_c dm⁻³ and 2.49 cmol_c dm⁻³ respectively. However, the nutrient contents were lower than those reported by Teixeira et al. (2019), namely 9.04–10.62 cmol_c dm⁻³ Ca²⁺ and 2.54–3.21 cmol_c dm⁻³ Mg²⁺; the same values were reported by Lima et al. (2005) and Junk (2020) in studies on Amazon soils subjected to flooding. According to Lima et al. (2000), Ca²⁺ and Mg²⁺ accumulation in floodplain soils might be related to the quality of deposited sediments.

Considering that 90% of floodplain samples had intermediate texture, it was found that the P content of soil was very high (mean of 51.5 mg dm⁻³) according to Brasil et al. (2020). Values were within the range (25 to 92 mg dm⁻³) reported by Teixeira et al. (2019) and Lima et al. (2005) for floodplain soils. Ounissi et al. (2014), in assessing the P contents of two estuaries, found that values were higher at a site subjected to different external

influences than at a site without external influences. Magalhães and Gomes (2013) identified high P levels in floodplain soils of the Lower Solimões region, Amazonas State.

For K^+ , the values observed in the current study were in agreement with those reported by Teixeira et al. (2019) and Lima et al. (2005) (46–300 $mg\ dm^{-3}$). Farjado et al. (2009) observed a K^+ content of 320.62 $mg\ dm^{-3}$ in floodplain soils of secondary forests in the Lower Amazon River, confirming the high dispersion of K^+ data for floodplain soils.

The mean BS and Al saturation values observed were 64.94% and 12.37%, respectively. These values indicate adequate soil fertility, according to Malavolta (1992), being similar to those reported by Teixeira et al. (2019) and Lima et al. (2005): BS = 68% and Al saturation = 16%. Junk et al. (2020), in recent floodplain soils from Marchantaria Island, observed high BS (81–99%) and, consequently, low Al saturation (1–15%), representing good conditions for floodplain soils. Soil fertility is affected by the environment and the contribution of salts dissolved in water to the soil complex (SANTOS et al., 2018). This fact was supported by the observed differences between floodplain and upland samples.

The high dispersion in soil physical properties is explained by the fact that floodplain soils are sedimentary and subject to removal, transport, and deposition promoted by the water cycle (SILVA et al. 2018).

CONCLUSION

Floodplain soils showed high variability in chemical and physical properties as a result of differences in sediment discharges from tributaries of the Amazon River basin. Soil samples had intermediate levels of K, P, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, and Fe, demonstrating high availability of these nutrients in floodplain ecosystems. Nevertheless, although most samples had high nutrient contents, a few had intermediate to low levels, showing that some nutrients may be limiting factors for plant growth. Overall, these findings demonstrate the heterogeneity of floodplain soils.

Multivariate analysis allowed comparing chemical and textural properties between floodplain and upland soils, and the correlation matrix indicated greater synergy between floodplain soil properties. Although floodplain soils had high fertility, they were found to have high acidity and toxic values of exchangeable Al, which may affect root growth, plant development, phosphate availability, and iron absorption.

Acknowledgments

The authors thank the Graduate Program in Society, Nature, and Development (PPGSND) of the Federal University of Western Pará (UFOPA) and the Geological Survey of Brazil.

REFERENCES

- Abreu EMA, Fernandes AR, Ruivo MLP (2007). Variação temporal e vertical de atributos químicos de um gleissolo do rio Guamá cultivado com canaranas, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, p. 277-285, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200010>.
- Affonso A, Barbosa C, Novo E (2011). Water quality changes in floodplain lakes as a function of the Amazon River flood pulse: Lago Grande de Curuaí (Pará). *Brazilian Journal of Biology*, v. 71, n. 3, p. 1–10. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842011000400004>
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JL, De M, Sparovic G (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v.22, n.6, p.711–728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Barbarisi BF, Renó VF, Barbosa CC, Novo EMLM (2010). Integração de dados censitários e de sensoriamento remoto para estimar o rebanho bovino e bubalino da várzea do Baixo Amazonas. In: Enner Herenio Alcântara, Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo e José Luiz Stech. (Org.). *Novas Tecnologias para o Monitoramento e Estudo de Reservatórios Hidrelétricos e Grandes Lagos*. 1ed.São José dos Campos: Parêntese Editora, v. 1, p. 257-273. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/50776998-Novas-tecnologias-para-o-monitoramento-e-estudo-de-reservatorios-hidretricos-e-grandes-lagos.html>> Acesso: Novembro 04, 2021.
- Bayley P, Petrere M (1989). Amazon fisheries: assessment methods, current status and management options. *Canadian special publications fisheries and aquatic science* 106: 385-98.
- Brasil EC, Cravo MS, Viégas IJM (2020). *Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará* e. – 2. ed. – Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1125022> Acesso: novembro 15,2021.
- Chambers JQ, Tribuzy ES, Toledo LC, Crispin BF, Higuchi N, Santos JDos, Araújo AC, Kruijt B, Nobre AD, Trumbore SE (2004). Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. *Ecology Application*, v.14, n.4 (supl.), p.72-s88, 2004. <https://doi.org/10.1890/01-6012>

- Fageria NK (1989). Química de solos de várzea. In: DECHEN, A.R.; CARMELLO, Q.A. de C.; FLOSS, E.L. (Coord.). SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 2. Piracicaba. Anais. Campinas, Fundação Cargill, p. 93-114.
- Fajardo JDV, Souza LAG, Alfaia SS, (2009). Características químicas de solos de várzeas sob diferentes sistemas de uso da terra, na calha dos rios baixo Solimões e médio Amazonas. Acta amazônica vol. 39(4), p. 731 – 740. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000400001>
- Ferreira LV (1997). Efeitos da duração da inundação na riqueza de espécies e composição florística em três hectares no Parque Nacional do Jaú em florestas de várzea na Amazônia central. Biodiversidade e Conservação, 6(10):1353-1363.
- Ferreira SJF, Luizão FJ, Miranda SAF, Silva MSR, Vital ART (2006). Nutrientes na solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração seletiva de madeira. Acta Amazonica VOL. 36(1) p. 59 – 68. 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000100008>
- Filizola N, Guyot JL (2011). Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. Revista Brasileira de Geociências. Volume 41(4): 566-576. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414566576>
- Gomes FP (2000). Curso de estatística experimental. 14. ed. Piracicaba: Degaspari, 477p
- Gomes AS, Silva CAS, Parfitt JMB, Pauletto EA, Pinto LFS (2006). Caracterização de Indicadores da Qualidade do Solo, com Ênfase às Áreas de Várzea do Rio Grande do Sul Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 40p. — (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 169). Disponível em < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/746124/caracterizacao-de-indicadores-da-qualidade-do-solo-com-ênfase-as-areas-de-varzea-do-rio-grande-do-sul>> Acesso: Dezembro 21,2021.
- Guimarães ST, Lima HN, Teixeira WG, Neves Junior AF, Silva FWR, Macedo RS, Souza KW (2013). Caracterização e classificação de Gleissolos da várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil., Revista Brasileira de Ciências do Solo 37 (2) • Abr. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200003>
- IUSS Working Group WRB. (2015) . World Reference Base for Soil Resources (WRB), sistema universal reconhecido pela International Union of Soil Science (IUSS) e FAO. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>>.
- Jamovi (2021). The jamovi project jamovi. (Version 2.2) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.

- Junk Wj, Krambeck Hj (2000). Climate and hydrology. In: JUNK, W.J. et al. The central Amazon floodplain: actual use and options for a sustainable management. The Netherlands: Backhuys Publishers, Leiden, p. 95-108.
- Junk WJ, Piedade MTF, Schöngart J, Cohn-Haft M, Adeney JM, Wittmann FA (2011). classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. *Wetlands*, v. 31, n. 4, p. 623–640. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0190-7>
- Junk WJ, Piedade MTF, Wittmann F, Schongart J (2020) Várzeas Amazônicas: Desafios para um Manejo Sustentável. - Manaus: Editora do INPA. Disponível em <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/36480>>. Acesso em Dezembro 22, 2021.
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006). World map of the Koppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Zeitschr.*, 15(3), 259–263.
- Lima HN, Teixeira WG, Souza KW (2007). Os solos da paisagem da várzea com ênfase no trecho entre Coari e Manaus. In: FRAXE, T.J.P.; PEREIRA, H.S. & WITKOSKI, A.C., orgs. Comunidades ribeirinhas amazônicas: Modos de vida e uso dos recursos naturais. Manaus, Universidade Federal do Amazonas, p.35-52. Disponível em <https://transforma.fbb.org.br/storage/socialtecnologias/24/files/comunidades_ribeirinhas_modos_de_vida_web.pdf> Acesso: Dezembro 21,2021.
- Lima HN, Mello JWV, Schaefer CEGR, Ker JC (2005). Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia submetidos à inundação. *Acta amazônica*. Vol. 35(3) 317 – 330. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000300003>
- Magalhães RC, Gomes RCM (2013). Mineralogia e química de solo de várzea e suas susceptibilidades no processo de terras caídas na comunidade do Divino Espírito Santo-AM. *Sociedade. & Natureza.*, Uberlândia, 25 (3): 609-621. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300013>
- Malavolta E (1992). ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo: Ceres, 124p.
- Martinelli LA, Vitoria RL, Damatte JLI, Richey JE, Devol AH (1993). Chemical and Mineralogical Composition of Amazon River Floodplain Sediments, Brazil. *Applied Geochemistry*, v. 8, n. 4, p. 391–402. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(93\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(93)90007-4)
- Meade RH, Nordin Jr CF, Curtis WF, Costa Rodrigues FM, Do Vale CM, Edmond JM (1979). Transporte de sedimentos no rio Amazonas. *Acta Amazonica*. Vol. 9 (3). <https://doi.org/10.1590/1809-43921979093543>
- Melo NC, Souza LC, Costa CAS, Coelho R, Covre WP, Costa DLP (2013). Caracterização química de diferentes sistemas de uso do solo. *Revista Agroecossistemas*, Belém, v. 5, n. 2, p. 8-13. <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v5i2.1793>

- Montanher OC, Souza Filho E, Novo E, Barbosa CA (2014). produção de sedimentos em suspensão do rio Amazonas está mudando? REVISTA GEONORTE, [S. l.], v. 5, n. 20, p. 17–23. Disponível em: www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1511. Acesso em: 3 jan. 2022.
- Moraes JFV (1973). Efeitos da inundação do solo. II. Influência sobre a absorção de nutrientes e o crescimento de arroz (*Oryza sativa* L.). Pesquisa Agropecuária Brasileira, Rio de Janeiro, v.8, n.7, p.103-108.
- Ounissi M, Ziouch OR, Aounallah O (2014). Variability of dissolved nutrient (N, P, Si) concentrations in the Bay of Annaba in relation to the inputs of the Seybouse and Mafragh estuaries. Marine Pollution Bulletin, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.030>
- Parolin P, Lucas C, Piedade MTD, Wittmann F (2010). Drought responses of flood-tolerant trees in Amazonian floodplains. Annals of Botany 105: 129–139. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp258>.
- Prance GT, Rodrigues WA, da Silva MF (1976). Inventário florestal de um hectare de mata de terra firme km 30 da Estrada Manaus - Itacoatiara. Acta Amazonica, 6(1):9-35.
- Queiroz MMA, Horbe AMC, Moura CAV (2011). Mineralogia e química dos sedimentos de fundo do médio e baixo Madeira e de seus principais tributários: Amazonas – Brasil. Acta Amazonica. 41 (4). <https://doi.org/10.1590/S0044-59672011000400003>
- R Core Team (2021). R: A Language and environment for statistical computing. (Version 4.0) [Computer software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org>. (R packages retrieved from MRAN snapshot 2021-04-01).
- Renó V, Novo E (2015). Alterações da cobertura florestal de várzea e seus efeitos no bem-estar das populações ribeirinhas do Estado do Pará: uma análise exploratória com dados sociodemográficos. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0562.pdf>> Acesso em Dezembro 22, 2021.
- Santos HG et al (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>> acesso: Novembro 15, 2021.
- Silva SB, Galvão JR, Pastana JC, Silva DR, Almeida KC, Souza FJL, Nascimento ISB (2018). Influência das águas do estuário do Rio Pará na fertilidade do solo das ilhas de várzea em Belém, Pará, Biotemas, 31 (4): 15-21. <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7925.2018v31n4p15>

- Silva GJ, Neves SMAS, De Paula WCS, Da Silva VN (2017). Relação da cobertura vegetal e uso do solo com o ndvi e a temperatura superficial da área não inundável do pantanal de Cáceres/MT . Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada.v1i. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2244>
- Silva LS, Ranno SK (2005). Calagem em solos de várzea e a disponibilidade de nutrientes na solução do solo após o alagamento. *Ciência Rural*, Santa Maria, v35, n.5, p.1054-1061, set-out, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000500011>
- Sioli H (1968). Hidroquímica e geologia no Brasil região amazônica. *Amazonian*, 1: 267-277.
- Sioli H (1984). The Amazon and its main affluents: Hydrography, morphology of the river courses, and river types. In: Sioli, H. (ed) *The Amazon - Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. Junk. Dordrecht. Netherlands, pp. 127- 166.
- Singh BR, Steinnes E (1994). Soil and water contamination by heavy metals. In: LAI, R. & STEWART, B.A, eds. *Advances in soil science: Soil process and water quality*. Lewis. p.233-237.
- Teixeira WG, Lima HN, Pinto WHA, Souza KW, Shinzato E (2019). O manejo do solo nas várzeas da Amazônia G. in: *Manejo e Conservação do Solo e da Água* eds. I. Bertol, IC De Maria, LS Souza. pp.701-728. Editora: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Vale Júnior JF, Souza MIL, Nascimento PPRR, Cruz DLS (2011). Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 5, n. 2, p.158-165. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v5i2.562>
- Victoria RL, Martinelli LA, Richey JE, Forsberg BR (1989). Spatial and temporal variations in soil chemistry on the Amazon Floodplain. *Geojournal*, 19(1): 45-52.
- Wittmanna F, Junk JW, Piedade MTF (2004). The várzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. *Forest Ecology and Management* 196, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.060>

ANEXO II- GRÁFICOS DE ÍNDICE DE MORAN E MAPAS INTERPOLADOS KRIGAGEM DOS INDICADORES DE SOLO COM CORRELAÇÃO SIGNIFICATIVAS

