



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

PEOLA REIS DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA, MICROBIOLÓGICA E
ESTABELECIMENTO DE INDICADORES E ÍNDICES DE QUALIDADE DE SOLOS
SOB CACAUEIROS NATIVOS NA AMAZÔNIA

BELÉM

2020

PEOLA REIS DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA, MICROBIOLÓGICA E
ESTABELECIMENTO DE INDICADORES E ÍNDICES DE QUALIDADE DE SOLOS
SOB CACAUEIROS NATIVOS NA AMAZÔNIA**

Pesquisa da dissertação apresentada a Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Agronomia.

Orientadora: Profa. Dra. Herdjania Veras de Lima.

BELÉM

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S719c Souza, Peola Reis de Souza

Caracterização química, física, microbiológica e estabelecimento de indicadores e índices de qualidade de solos sob cacauzeiros nativos na Amazônia / Peola Reis de Souza Souza. - 2020.

103 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2020.

Orientador: Profa. Dra. Herdjania Veras de Lima Lima

Coorientador: Profa. Dra. Gisele Barata da Silva.

1. Frutíferas nativas. 2. Theobroma cacao L. 3. Qualidade do solo. 4. Microrganismos. I. Lima, Herdjania Veras de Lima, orient. II. Título

PEOLA REIS DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA, MICROBIOLÓGICA E ESTABELECIMENTO DE INDICADORES E ÍNDICES DE QUALIDADE DE SOLOS SOB CACAUEIROS NATIVOS NA AMAZÔNIA

Pesquisa da dissertação apresentada a Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Mestre.

Apresentado em fevereiro de 2020

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Herdjanía Veras de Lima
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Prof. Dr. Antonio Clementino dos Santos
Universidade Federal do Tocantins - UFT

Dra. Marcela Cristiane Ferreira Rêgo
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Dra. Lorena Chagas Torres
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Aos meus pais, Edina Nogueira Reis e Orenio Pompeu de Souza Filho e irmãos Guilber Nogueira Reis e Paula Freitas de Almeida.

Peola Souza

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder força e guiar meu caminho nessa etapa tão importante da vida;

Aos meus pais, Edina Nogueira Reis e Orenio Pompeo de Souza Filho, pela dedicação, carinho e amor, mesmo estando longe;

A minha orientadora Profa. Dra. Herdjania Veras de Lima, pelos ensinamentos e confiança;

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia (PGAgro);

A Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisa (FAPESPA), pela concessão da bolsa de estudos;

A Prof. Dra. Gisele Barata pelos conselhos e apoio a pesquisa;

A todos que participaram e ajudaram nas coletas e análises, Adriano Moura, Aline Noronha, Daynara Vieira, Lorena Chagas, Sueli Rodrigues, pela amizade e companheirismo;

A Prof. Dra Merivalda da UFPA pela contribuição nas coletas;

Aos técnicos da Ufra que me auxiliaram na pesquisa, Fernando, Seu Amalry, Seu Junior, Júlio e Jeferson;

A todos os bolsistas de iniciação científica, Leonardo, Valdiney e Ana Carolina;

Aos colegas da sala de estudo, em especial Daihany Callegari, Rafael Rodrigo, José Ailton Jr;

Aos colegas do LPP, Aline Cardoso, Gleice, Gledson e Alessandra.

A todos da turma de mestrado 2018-2020, por todos os momentos de felicidade;

E aos que diretamente ou indiretamente, contribuíram na minha formação acadêmica e realização desta pesquisa.

OBRIGADA!

“Suba o primeiro degrau com fé.
Não é necessário que você veja
toda a escada. Apenas dê o
primeiro passo.”

(MARTIN LUTHER KING)

RESUMO GERAL

A exploração de frutíferas nativas tem alto potencial para a geração de receitas atrelada ao desenvolvimento sustentável e manutenção de serviços ecossistêmicos. O cacauero (*Theobroma cacao* L.) é uma frutífera nativa da Amazônia encontrada sob o dossel das árvores em regiões de ilhas. As áreas nativas, fornecem amêndoas orgânicas para a produção de chocolates finos. Assim, o objetivo deste estudo foi caracterizar e estabelecer indicadores e índices de qualidade dos solos sob cacaueros nativos, em função das propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo. Foram realizadas coletas de solo deformadas e indeformadas, profundidade 0-0,10 m, na Ilha de Tatuoca (S_T), Ilha do Combu (S_C) e Comunidade Pacajá (S_P), Estado do Pará. Os solos foram caracterizados quanto as propriedades químicas (pH, Carbono orgânico, P, K, Ca, Mg, Al, acidez potencial, soma de bases, capacidade de troca de cátions e saturação por bases); físicas (textura, conteúdo de água, microporosidade, macroporosidade, porosidade total, razão de vazios textural, residual, estrutural e total, diâmetro efetivo dos poros textural e estrutural, densidade do solo, densidade de partículas e estabilidade de agregados); microbiológicas, (carbono da biomassa microbiana, respiração basal, densidade microbiana); bioquímicas (solubilização de fósforo, produção de sideróforos, ácido indol acético 3 – AIA, catalase, conteúdo de glomalina facilmente extraível e glomalina total); biológica (massa de raízes). A alta concentração de carbono orgânico contribuiu positivamente para os resultados de soma de bases, capacidade de troca de cátions e saturação por bases nos solos. A saturação por bases foi > 50% nos solos. Os solos das ilhas do Tatuoca, Combu e Comunidade Pacajá possuem classe textural franco argilo siltosa, franco siltosa e franca, respectivamente. A equação duplo exponencial mostrou o comportamento bimodal da distribuição de poros com maior pico referente a porosidade textural nos três solos. O conjunto mínimo de dados – CMD formado a partir da análise de componentes principais – ACP selecionou as variáveis: pH em água, soma de bases, porosidade total, densidade do solo, carbono da biomassa microbiana e respiração basal como indicadores de qualidade de solo sob cacaueros nativos. Os índices de qualidade dos solos foram altos, próximos a 1, indicando a boa qualidade destes solos. A densidade de microrganismos e caracterização bioquímica foram realizadas no solo da ilha do Tatuoca, onde houve alto número de unidades formadoras de colônias bacterianas ($8,84 \times 10^4$). 13 isolados bacterianos produziram halo característico de solubilização P em meio NBRIP, 4 produziram sideróforos, 3 produziram AIA e 23 foram positivos para catalase. A glomalina não foi o principal agente de ligação dos agregados, porém houve correlação positiva entre a glomalina facilmente extraível e a massa de agregados com diâmetro < 2 mm. A glomalina total interagiu positivamente com o conteúdo de fósforo. A massa de raízes aumentou com o aumento do conteúdo de fósforo no solo da ilha do Tatuoca. Os índices de qualidade do solo podem ser usados para o monitoramento da qualidade do solo em área de cacauero plantado e solos sujeitos ao hidromorfismo e os microrganismos dos grupos 1 e 2 apresentaram potencial para a promoção do crescimento de plantas.

Palavras-chave: Frutíferas nativas. *Theobroma cacao* L. qualidade do solo. Microrganismos.

GENERAL ABSTRACT

Fruit native exploitation has a high potential for generating income linked to sustainable development and maintenance of ecosystem services. Cacao tree (*Theobroma cacao* L.) is a fruit native to Amazon found under the dossal of trees in island regions. The native areas provide organic almonds for the production of fine chocolates. Objective of this study was to characterize and establish indicators and indexes of soil quality under native cacao trees, depending on the physical, chemical and microbiological properties of the soil. Deformed and undisturbed soil collections were carried out, depth 0-0.10 m, on Tatuoca Island (S_T), Combu Island (S_C) and Pacajá Community (S_P), State of Pará. The soils were characterized in terms of chemical properties (pH, organic carbon, P, K, Ca, Mg, Al, potential acidity, total of bases, cation exchange capacity and base saturation) physical (texture, water content, microporosity, macroporosity, total porosity, textural, residual, structural and total void ratio textural and structural, bulk density, particle density and aggregate stability); microbiological, (basal respiration and carbon of microbial biomass, microbial density); biochemical (solubilization of P, production of siderophores, indole acetic acid - AIA, catalase, easily extractable glomalin content - FE-PRGS and total glomalin - T-PRGS); biological (root mass). High concentration of organic carbon contributed positively to results of total of bases, cation exchange capacity and base saturation in soils. Base saturation was > 50% in soils. Tatuoca Island, Combu Island, Pacajá Community soils have textural class silty clay loam, silty loam and loam, respectively. Double exponential equation showed the bimodal behavior of pore distribution with the highest peak regarding the textural porosity in three soils. Minimum data set – CMD formed from principal component analysis – ACP selected the variables: pH in water, total of bases, total porosity, bulk density, carbon of microbial biomass and basal respiration as indicators of soil quality under native cacao trees. Soil quality indexes were high, next to 1, indicating the good quality of these soils. Density of microorganisms and biochemical characterization were realized in Tatuoca Island soil, where were a high number of colonies forming units bacterial (8.84×10^4). 13 bacterial isolates presented a halo characteristic of P solubilization in NBRIP medium, 4 produced siderophores, 3 produced AIA and 23 were positive for catalase. Glomalin was not the main link agent for aggregates, but there was a positive correlation between easily extractable glomaline and the aggregate mass with diameter < 2 mm. Total glomalin interacted positively with the phosphorus content. The root mass increased with the increase of the phosphorus content in Tatuoca Island soil. Soil quality indexes can be used for monitoring soil quality in a planted cocoa area and soils subject to hydromorphism and microorganisms from groups 1 and 2 of cluster analyses showed potential for promoting plant growth.

Keywords: Native fruits. *Theobroma cacao* L. soil quality. Microorganisms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aspectos da planta (A), frutos (B), sementes (C) e barra de chocolate nativo (D). 22	22
Figura 2 - Mapa de localização das áreas avaliadas, em três municípios do estado do Pará. 37	37
Figura 3 - Cacaueiro nativo inundado no período de colheita na Ilha do Tatuoca, Mocajuba, Pará..... 38	38
Figura 4 - Visão geral do cacaueiro nativo na ilha do Combu, Belém, Pará (A); cobertura do solo (B); e torrão de solo apresentando características de hidromorfismo (C). 40	40
Figura 5 - Cacaueiro nativo no Rancho Sagrada Família, Comunidade Pacajá, Cametá, Pará. 41	41
Figura 6 - Amostra de solo da Comunidade Pacajá com alta presença de conchas. 41	41
Figura 7 - Curva de retenção de água no solo (CRA) e distribuição do tamanho dos poros ($d\psi/d(\log h)$) em função do potencial matricial dos solos S_T (A e B), S_C (C e D) e S_P (E e F), sob cacaueiros nativos localizadas em três municípios do estado do Pará (n = 30). Profundidade: 0-0,10 m..... 54	54
Figura 8 - Índice de qualidade do solo e contribuição individual dos indicadores do conjunto mínimo de dados (CMD) para os solos S_T , S_C e S_P , sob cacaueiros nativos em três municípios do estado do Pará. 61	61
Figura 9 - Mapa de localização da ilha do Tatuoca, Mocajuba, estado do Pará. Altitude: 20 m. 76	76
Figura 10 - Número de colônias bacterianas e fúngicas (UFC ml ⁻¹) cultiváveis nos meios 523, KingB e BDA do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacaueiro nativo em Mocajuba, Pará. 82	82
Figura 11 - Análise de grupamento dos isolados microbianos em função dos testes bioquímicos, coloração Gram, catalase, solubilizador de P, AIA e sideróforos do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacaueiro nativo em Mocajuba, Pará..... 83	83
Figura 12 - Isolados bacterianos (ST6B, ST21B, SR20B, SR11P) mostrando halo característico da solubilização de P, indicados pela seta, do solo da ilha do Tatuoca, sob cacaueiro nativo. 84	84
Figura 13 - Isolado bacteriano ST12B, produtor de sideróforos, que converteu a cor azul da solução CAS para o amarelo, do solo da ilha do Tatuoca, sob cacaueiro nativo. 85	85
Figura 14 - Isolado bacteriano ST7B produtor de ácido indol acético 3 – AIA, do solo da ilha do Tatuoca, sob cacaueiro nativo..... 86	86

Figura 15 - Correlação entre as proteínas do solo relacionadas à glomalina facilmente extraível e total (FE-PRGS e T-PRGS) e a massa de agregados retida por peneira (2, 1, 0,50, 0,25, 0,10, 0,05 mm) do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacauero nativo.....	90
Figura 16 - Correlação entre o conteúdo de P e as proteínas do solo relacionadas a glomalina total (T- PRGS) do solo S _T sob cacauero nativo.	93
Figura 17 - Correlação entre o conteúdo de P e a massa de raízes do solo S _T sob cacauero nativo.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de localização e clima das áreas com cacauzeiros nativos em três municípios paraenses.	37
Tabela 2 - Estatística descritiva das propriedades químicas dos solos sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará (n = 58). Profundidade: 0-0,10 m.....	48
Tabela 3 - Análise de componentes principais das propriedades químicas dos solos S _T , S _C e S _P sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará.....	49
Tabela 4 - Valores médios de P, K, Ca, Mg e Al dos solos S _T , S _C e S _P comparados a classe de interpretação listada por Cravo et al., 2007.	52
Tabela 5 - Classificação textural dos solos de áreas de cacauzeiros nativos localizadas em três municípios do estado do Pará (n = 58). Profundidade: 0-0,10 m.	52
Tabela 6 - Valores de R ² , parâmetros ajustados da equação duplo exponencial de retenção de água, obtidos dos solos sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará (n = 30). Profundidade: 0-0,10 m.....	53
Tabela 7 - Razões de vazios equivalentes aos poros residual (e _{residual}), textural (e _{textural}), estrutural (e _{estrutural}), totais (e _{total}), porosidade total (PT), diâmetro efetivo textural (δ_1) e estrutural (δ_2), densidade do solo (D _s), densidade de partícula (D _p) e diâmetro médio ponderado (DMP) de solos sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará (n = 30). Profundidade: 0-0,10 m.....	56
Tabela 8 - Análise de componentes principais das propriedades físicas dos solos S _T , S _C e S _P sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará.	57
Tabela 9 - Valores médios de respiração basal (C-CO ₂), carbono da biomassa microbiano (CBM), quociente metabólico (qCO ₂) e quociente microbiano (qMIC) de solos S _T , S _C e S _P sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará (n = 5). Profundidade: 0-0,10 m.....	58
Tabela 10 - Análise de componentes principais das propriedades microbiológicas dos solos S _T , S _C e S _P sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará.	59
Tabela 11 - Caracterização químicas, físicas, microbiológica e biológica do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacauzeiros nativos (n = 5). Profundidade de coleta: 0-0,10 m.....	87
Tabela 12 - Classificação dos agregados do solo da Ilha do Tatuoca determinada por peneiramento via úmido, considerando o intervalo entre peneiras (mm) e a massa de agregados retidos (g) (n = 5). Profundidade de coleta: 0-0,10 m.	89

Tabela 13 - Correlação de Pearson entre variáveis químicas, físicas, microbiológicas e biológicas do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacauero nativo (n = 5)..... 92

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ACP: Análise de componentes principais	Mg: Magnésio
AIA: Ácido indol acético	NaOH: Hidróxido de sódio
C, A, h: Parâmetros da equação duplo exponencial de Dexter	NBRIP: National Botanical Research Institute's phosphate growth medium
Ca: Cálcio	P: Fósforo
CBM: Carbono da biomassa microbiana	pH: Potencial hidrogeniônico
C-CO ₂ : Respiração basal	PT: Porosidade total
CMD: Conjunto mínimo de dados	<i>q</i> CO ₂ : Quociente metabólico
CO: Carbono orgânico	<i>q</i> MIC: quociente microbiano
CO ₂ : Dióxido de Carbono	SB: Soma de bases
CP: Componente principal	S _C : Solo da ilha do Combu, Belém
CRA: Curva de retenção de água no solo	SOC: estoque de Carbono no solo
CTC: Capacidade de troca de cátions	S _P : Solo da comunidade Pacajá, Cametá
DMP: Diâmetro médio ponderado	S _T : Solo da ilha do Tatuoca, Mocajuba
Dp: Densidade da partícula do solo	TFSA: Terra fina seca ao ar
Ds: Densidade do solo	T-PRGS: Proteínas do solo relacionada a glomalina total
DTP: Distribuição do tamanho dos poros	UFC: Unidade formadora de colônia
Fe: Ferro	Ug DE: Umidade ajustada pela equação de Dexter
FE-PRGS: Proteínas do solo relacionada a glomalina facilmente extraível	Ug: Umidade gravimétrica
FMA: Fungos micorrízicos arbusculares	V%: Saturação por bases
H: Hidrogênio	δ: Diâmetro efetivo de poros
h: Tensão de água no solo	
H+A1: Acidez potencial	
IQS: Índice de qualidade do solo	
K: Potássio	
KCl: Cloreto de Potássio	
M.O: Matéria orgânica do solo	

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.2 Objetivo geral	17
1.1.3 Objetivos específicos	17
REFERENCIAS	17
1.2 Revisão de literatura.....	20
1.2.1 Frutíferas nativas: ambientes de ocorrência	20
1.2.2 <i>Theobroma cacao</i> L.: Origem, disseminação e características	21
1.2.3 Cacau no cenário econômico.....	24
1.2.4 Os cacauicultores ribeirinhos	26
1.2.5 Solos hidromórficos	26
1.2.6 Indicadores de Qualidade de Solos	27
REFERENCIAS	29
2 CARACTERIZAÇÃO E ESTABELECIMENTO DE INDICADORES E ÍNDICES DE QUALIDADE DE SOLOS SOB CACAUEIROS NATIVOS NA AMAZÔNIA	33
2.1 Introdução	35
2.2 Material e métodos.....	37
2.2.1 Características gerais das áreas de estudo	37
2.2.2 Amostragem	41
2.2.3 Propriedades químicas do solo	42
2.2.4 Propriedades físicas do solo	42
2.2.5 Propriedades microbiológicas	44
2.2.6 Índice de qualidade do solo	45
2.2.7 Análises dos dados	47
2.3 Resultados e discussão	47
2.3.1 Propriedades químicas	47
2.3.2 Propriedades físicas	52
2.3.3 Propriedades microbiológicas	58
2.3.4 Indicadores e índices de qualidade do solo	61
CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	63

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MICRORGANISMOS E CONTEÚDO DE GLOMALINA DE SOLO SOB CACAUEIRO NATIVO EM MOCAJUBA, BAIXO TOCANTINS	72
3.1 Introdução	74
3.2 Material e métodos.....	76
3.2.1 Características gerais das áreas de estudo	76
3.2.2 Amostragem	76
3.2.3 Propriedades químicas	77
3.2.4 Propriedades físicas	77
3.2.5 Propriedades microbiológicas	78
3.2.6 Propriedades bioquímicas	79
3.2.7 Propriedade biológica	80
3.2.8 Análise estatística	81
3.3 Resultados e discussão	81
3.3.1 Densidade de microrganismos e caracterização bioquímica.....	81
3.3.2 Caracterização quantitativa das propriedades do solo	86
3.3.3 Agregação e proteínas do solo relacionadas a glomalina (PRGS)	88
CONCLUSÃO	94
REFERÊNCIAS	95

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Amazônia é uma das maiores fronteiras agrícolas do Brasil, com acelerada transição de floresta para áreas de cultivo, isso contribui para a perda da biodiversidade e degradação dos solos (KASCHUK et al., 2011). Em contrapartida, as atividades econômicas baseadas no extrativismo florestal incentivam a conservação da floresta em longo prazo, fomentando os serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, e o aumento do potencial para o crescimento financeiro, convertendo parte da floresta em incentivos econômicos (RODRIGUES et al., 2009).

À medida que a população aumenta e a demanda por vários serviços ecossistêmicos cresce, ocorre a necessidade de integrar o conhecimento local e científico sobre os serviços de maneira que seja acessível aos tomadores de decisão (RAMIREZ-GOMEZ et al., 2014). A exploração de frutíferas nativas tem potencial para a geração de receitas associada ao desenvolvimento sustentável e permanência da qualidade do solo, água, recursos genéticos, matéria orgânica, alimento, fibras e mitigação de gases do efeito estufa, os quais impactam o desenvolvimento humano.

Na Amazônia, cerca de 220 espécies de frutíferas comestíveis nativas e exóticas foram documentadas (DE CARVALHO, 2012). Algumas já passaram, ou estão em processos de domesticação e melhoramento genético, como o açaizeiro, cupuaçuzeiro, camu-camuzeiro e cacauzeiro. Estas espécies são encontradas nas margens de rios e lagos na Amazônia sobre solos férteis, onde há influência das águas que vem dos Andes ou marés oceânicas, até solos pobres de areia branca (YUYAMA, 2011).

Dentre as frutíferas exploradas comercialmente destaca-se o cacauzeiro, *Theobroma cacao* L., que ocorre naturalmente sob o dossel das árvores nas florestas tropicais, em área de várzea (MICHELI et al., 2010). Estas áreas são fertilizadas pelos sedimentos em suspensão nas águas durante as cheias dos rios, (ALMEIDA; BRITO, 2003). Nestes agroecossistemas, não é comum o uso de manejo intenso mecanizado. As práticas se limitam a roçagens manual, replantio e beneficiamento de sementes (BRITO et al., 2002).

É uma frutífera cultivada em grande escala, porém sua exploração de forma extrativista agrega valor ao produto. Pois, em sites especializados na venda de chocolates nativos, os valores da barra de 50 g variam de R\$ 15,00 à R\$ 50,00, superior ao valor pago pelo chocolate nacional oriundo de áreas plantadas. O manejo do cacauzeiro nativo pode combater ações que comprometem a preservação da Amazônica, como o garimpo praticado nas terras Yanomami e o avanço da pecuária na região do Baixo Tocantins, Pará. Algumas pesquisas já evidenciaram a qualidade das amêndoas de cacau nativo (VOIGT et al., 2018;

BOZA et al., 2014). Porém, os estudos sobre caracterização e estabelecimento de indicadores e índices de qualidade do solo foram mais consistentes em áreas de cultivo convencional ou sistemas agroflorestais, porque são utilizados para o monitoramento dos impactos antrópicos e ambientais e como tomada de decisão no manejo das culturas.

A qualidade do solo é tema que preocupa pesquisadores do mundo inteiro e a Amazônia por ser um dos principais biomas, devido a biodiversidade que comporta, tem sido alvo de pesquisas acerca do assunto. Este bioma abriga cerca de 40% do remanescente florestal do planeta, desempenhando papel indispensável para a conservação da biodiversidade, regulação do clima e ciclos biogeoquímicos (RODRIGUES et al., 2009).

Os indicadores de qualidade do solo são compostos pelos atributos químicos, físicos e microbiológicos, capazes de expressar as características do solo, após a redução dos dados mediante a aplicação de análises multivariadas (CORSTANJE et al., 2017; BONE et al., 2010). Estes indicadores integram os índices de qualidade do solo (IQS's), que variam de 0 a 1 e ajudam na avaliação e monitoramento dos impactos naturais e antrópicos. Bem como, identificam a eficácia de práticas de recuperação e manejo. Valores de IQS's próximos de 1 indicam solos de boa qualidade (ANDREWS et al., 2002).

As propriedades físicas do solo atuam diretamente na produção de amêndoas, porque estão intimamente ligadas à movimentação de água no solo, emergência de plântulas e crescimento radicular; as químicas explicam a relação solo-planta mediante a fertilidade e a capacidade do solo de fornecer nutrientes às plantas; e as microbiológicas estão relacionadas à diversidade dos microrganismos e capacidade dos mesmos fornecer benefícios ao solo e as plantas, relacionados a mineralização da matéria orgânica e produção de compostos por organismos, que promovem o crescimento de plantas e a agregação do solo, como o teor de glomalina, produzida por fungos micorrízicos arbusculares (GOMES et al., 2006; YANG et al., 2017).

As análises multivariadas são boas ferramentas para pesquisas sobre manejo e uso que influenciam na qualidade dos solos (CHEN et al., 2013; ZHANG et al., 2016; BISWAS et al., 2017; KONGOR et al., 2019). A densidade do solo, porosidade, textura, pH, K, CTC e saturação por base foram estabelecidas como indicadores robustos da qualidade do solo no sul da Amazônia (ROBOREDO et al., 2016). A pesquisa de Kaschuk et al. (2011) revelou a eficiência do CBM como indicador de qualidade do solo nos biomas brasileiros. E em lavouras cacaeiras no estado da Bahia Araújo et al. (2018) encontraram valores de IQS, 0,42 a 0,61, estes valores foram utilizados para planejar o manejo nutricional da cultura.

Os microrganismos são usados como biofertilizantes (ZHAO et al., 2018), bioestimulantes (ALOO et al., 2018), e bioprotetores do crescimento de plantas (SCHWARTZ et al., 2013). Algumas bactérias (gêneros: *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Azospirillum* spp., *Gluconacetobacter* spp., *Rhizobium* spp., e *Paenibacillus* spp.) e fungos (gêneros: *Trichoderma* spp., *Aspergillus* spp., *Piriformospora* spp., e *Penicillium* spp.) solubilizam o P insolúvel, tornando-o disponível para as plantas (KUMAR; RAI, 2017). As *Pseudomonas* sp. também podem ser eficientes produtoras de sideróforos, um quelantes do Fe^{3+} (DAVID et al., 2019), ou produzem ácido indol acético (AIA), hormônio, que atua no desenvolvimento de raízes e brotações (SYAMSIA et al., 2015).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) interagem com as raízes de alguns vegetais e após a sua morte liberam hifas e esporos para a produção de glomalina, glicoproteína que funciona como ligante dos agregados do solo (WU et al., 2008; FOLLI-PEREIRA et al., 2012; WANG et al., 2018). Esta proteína é resistente a degradação por altas temperaturas (SHARIFI et al., 2018), sendo associada a estabilização do solo em diversos estudos (FOLLI-PEREIRA et al., 2012; FOKOM et al., 2012; ZOU et al., 2016; SHING et al., 2018).

A caracterização dos solos sob cacauzeiros nativos é necessidade real, que levará ao conhecimento destes ambientes, pois são áreas que produzem amêndoas com particularidades em aroma e sabor já comprovadas, e que são comercializadas em outros estados brasileiros e no exterior. O estabelecimento de indicadores e índices de qualidade do solo sob cacauzeiro nativos pode servir como base para futuras pesquisas sobre planejamento de manejo em cultivos convencionais e monitoramento da qualidade do solo e cenário de conservação de agroecossistemas, que são indispensáveis para a manutenção da biodiversidade e da economia do estado do Pará.

Por isso as hipóteses desta pesquisa são: (i) os indicadores de qualidade de solo sob cacauzeiros nativos apresentam relação direta com o carbono orgânico, (ii) os solos sob cacauzeiros nativos apresentam boa qualidade, IQS próximos de 1, (iii) os isolados microbianos de solo sob cacauzeiro nativo podem apresentar características para a promoção de crescimento de plantas, e o (iiii) conteúdo de glomalina está diretamente relacionado à estabilidade de agregados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo geral

Caracterizar e estabelecer indicadores e índices de qualidade do solo solos sob cacauzeiros nativos, em função das propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo.

1.1.3 Objetivos específicos

- 1) Caracterizar as propriedades químicas: pH, Carbono orgânico, P, K, Ca, Mg, Al, e H+Al, capacidade de troca de cátions, soma de base e saturação por bases de solos sob cacauzeiros nativos;
- 2) Caracterizar as propriedades físicas: textura, curva de retenção de água, porosidade textural, estrutural, residual e total, diâmetro efetivo dos poros, densidade do solo, densidade das partículas, estabilidade de agregados e estoque de carbono de solos sob cacauzeiros nativos;
- 3) Caracterizar as propriedades microbiológicas: carbono da biomassa microbiana, respiração basal, quociente metabólico, quociente microbiano de solos sob cacauzeiros nativos;
- 4) Estabelecer indicadores e índices de qualidade de solos sob cacauzeiros nativos;
- 5) Quantificar a densidade de microrganismos e caracterizar qualitativamente *Bacilos* spp., *Pseudomonas* spp., e *Trichoderma* spp., quanto a solubilização de fósforo, sideróforos, ácido indol acético 3 e catalase, do solo sob cacauzeiros nativo na Ilha do Tatuoca;
- 6) Quantificar o conteúdo de glomalina total e facilmente extraível do solo sob cacauzeiros nativo na Ilha do Tatuoca.

REFERENCIAS

- ALMEIDA, L.C.de.; BRITO, A.M.de. Manejo do cacauzeiro silvestre em várzea do estado do Amazonas, Brasil. **Agrotrópica**, v. 15, p. 1, 2003.
- ALOO, B. N. *et al.* The Potential of Bacilli Rhizobacteria for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability. **Microbiological Research**. 2018. Doi:10.1016/j.micres.2018.10.011.
- ANDREWS, S. S. *et al.* A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 90, n. 1, p. 25–45, 2002.
- ARAÚJO, Q. *et al.* Soil quality index for cacao cropping systems. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 13, p. 1892-1909, 2018.
- BISWAS, S.*et al.* Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. **Geoderma**, v. 292, p. 34-48, 2017.

- BONE, J. *et al.* Soil quality assessment under emerging regulatory requirements, *Environ. Environment International*, v. 36, p. 609-622, 2010.
- BOZA, E.J. *et al.* Genetic Characterization of the Cacao Cultivar CCN 51: Its Impact and Significance on Global Cacao Improvement and Production. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 139, n. 2, p. 219–229, 2014.
- BRITO, A.M. de *et al.* Cultivo de cacau em várzeas amazônicas. *CEPLAC/CEPEC*, Ilhéus, n. 184, 2002. **Boletim Técnico**, p. 32.
- DE CARVALHO, J. E. U. **Frutas da Amazônia na era das novas culturas**. Embrapa Amazônia Oriental: Belém, 2012.
- CHEN, Y. *et al.* Minimum Data Set for Assessing Soil Quality in Farmland of Northeast China. *Pedosphere*, v. 23, n. 5, p. 564–576, 2013.
- CORSTANJE, R. *et al.* Physical soil quality indicators for monitoring British soils. *Solid Earth*, v. 8, p. 1003–1016, 2017.
- DAVID, S. R. *et al.* Iron removal from raw asbestos by siderophores-producing *Pseudomonas*. **Journal of Hazardous Materials**, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121563>.
- FOKOM, R. *et al.* Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon. **Soil Tillage Research**, v. 120, p. 69-75, 2012.
- FOLLI-PEREIRA, M. da S. *et al.* Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 36, p. 1663-1679, 2012.
- GOMES, A. da S. *et al.* Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul. **Embrapa Clima Temperado**, Pelotas, 2006. Documentos 169, 40p.
- KASCHUK, G. *et al.* Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: inferences to improve soil quality. **Plant Soil**, v. 338, p. 467–481, 2011.
- KONGOR J. E. *et al.* Assessment of soil fertility and quality for improved cocoa production in six cocoa growing regions in Ghana. **Agroforest Syst**, v. 93, p. 1455–1467, 2019.
- KUMAR, A.; RAI, L. C. Soil Organic Carbon and Availability of Soil Phosphorus Regulate Abundance of Culturable Phosphate Solubilizing Bacteria in Paddy Fields of the Indo Gangetic Plain. **Pedosphere**, 2017. DOI: 10.1016/S1002-0160(17)60403-X.
- MICHELI, F. *et al.* Functional genomics of cacao. **Advances in Botanical Research**, v. 55, n. C, p. 119–177, 2010.

RAMIREZ-GOMEZ, S.O.I. *et al.* Analysis of ecosystem services provision in the Colombian Amazon using participatory research and mapping techniques. **Ecosystem Services**, nov. 2014.

ROBOREDO, D. *et al.* Aggregate index of social–environmental sustainability to evaluate the social–environmental quality in a watershed in the Southern Amazon. **Ecological Indicators**, v. 63, p. 337–345, 2016.

RODRIGUES, A.S.L. *et al.* Boom-and-Bust Development Patterns Across the Amazon Deforestation Frontier. **Science**, v. 324, p. 12, 2009.

SCHWARTZ, A. R. *et al.* *Bacillus simplex* – A Little Known PGPB with Anti-Fungal Activity Alters Pea Legume Root Architecture and Nodule Morphology When Coinoculated with *Rhizobium leguminosarum* bv. *Viciae*. **Agronomy**. V. 3, p. 595-620, 2013.

SHARIFI, Z. *et al.* The response of glomalin-related soil proteins to fire or tillage. **Geoderma**, v. 329, p. 65-72, 2018.

SINGH, G. *et al.* Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. **Soil & Tillage Research**, v. 184, p. 291–300, 2018.

SYAMSIA. *et al.* The Potency of Endophytic Fungal Isolates Collected from Local Aromatic Rice as Indole Acetic Acid (IAA) Producer. **Procedia Food Science**, v. 3, p. 96-103, 2015.

VOIGT, J. *et al.* pH-Dependency of the proteolytic formation of cocoa- and nutty-specific aroma precursors. **Food Chemistry**, v. 255 p. 209–215, 2018.

WANG, W. Glomalin changes in urban-rural gradients and their possible associations with forest characteristics and soil properties in Harbin City, Northeastern China. **Journal of Environmental Management**, v. 224, p. 225–234, 2018.

WU, Q. S. *et al.* Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. **European Journal of Soil Biology**, v. 44, p. 122-128, 2008.

YANG, Y. *et al.* The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on glomalin-related soil protein distribution, aggregate stability and their relationships with soil properties at different soil depths in leadzinc contaminated área. **PLOS ONE**, aug. 3, 2017.

YUYAMA, K. A cultura de camu-camu no brasil. **Revista brasileira de fruticultura**, v. 33, n. 2 p.335-690, 2011.

ZHANG, G. *et al.* Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 458-466, 2016.

ZHAO, L. *et al.* Antagonistic endophytic bacteria associated with nodules of soybean (*Glycine max* L.) and plant growth-promoting properties. **Brazilian Journal of microbiology**, v. 49, p. 269-278, 2018.

ZOU, Y. N. Glomalin: A Potential Soil Conditioner for Perennial Fruits. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 18, p. 293–297, 2016.

1.2 Revisão de literatura

1.2.1 Frutíferas nativas: ambientes de ocorrência

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo, recobre 7% da superfície do planeta, abriga mais de 50% das espécies vegetais, e possui volumosa hidrografia. É o centro de origem e repositório de valiosos recursos genéticos de espécies frutíferas. As frutíferas nativas são consumidas regionalmente e já expandiram para outras regiões do mundo, pois apresentam potencial de exploração para abastecer outros nichos de mercado (SHANLEY, 2005). Como é o caso do cacau e açaí, os quais são conhecidos mundialmente como produtos da floresta e já passaram por processos de domesticação.

Essas espécies são encontradas as margens de rios e lagos na Amazônia sobre solos férteis, onde há influência das águas da cordilheira dos Andes ou marés, até solos pobres de areia branca (YUYAMA, 2011). No ecossistema de várzea os açazeiros e cacauzeiros nativos estão estabelecidos sob solos hidromórficos, que sofrem a influência do regime de marés por ocupar áreas planas e baixas, que margeiam os rios. Nas várzeas os solos em geral possuem boa fertilidade por causa da deposição sedimentar (AZEVEDO, 2010). Os açazeiros e cacauzeiros ocorrem em regiões de ilhas, porém na parte mais baixa do terreno predomina os açazeiros. E na várzea mais alta os cacauzeiros predominam ficando alagados no período de cheias.

As várzeas são terras que ocupam a planície aluvial de inundação, pois secam e afloram no período de estiagem, ou devido o regime hidrológico, de vazante dos rios ou de marés diárias (preamar e baixamar). Geologicamente as várzeas são divididas entre as formadas no período Pleistoceno e as formadas no Holoceno, ambas oriundas das flutuações das águas do mar e dos rios (LIMA, 1956; DOS SANTOS et al., 2004; JUNK, 1983).

Na Amazônia as várzeas podem ser influenciadas por marés diárias, sizígias ou de equinócio. As marés diárias são ocasionadas pela força de atração que a lua exerce sobre a terra, acrescida do alinhamento terra, lua, sol e do movimento de rotação. Nas marés de sizígias ocorre a intensificação da preamar e baixar devido as forças de atração da lua e do sol que se somam duas vezes a cada lunação, por ocasião da lua nova e lua cheia. E as marés de equinócio ocorrem duas vezes ao ano (final do verão e da primavera), quando o sol está diretamente na linha do Equador, sendo a ocasião em que há os maiores picos de marés, com inundação de maiores extensões (SILVA et al., 2002).

Os principais solos hidromórficos encontrados na Região Amazônica são os os Gleissolos Háplicos, Gley Pouco Húmico ou Gley Húmico, os quais possuem fertilidade de média a alta, pois são resultantes do acúmulo de sedimentos; e os Espodossolos, que apresentam baixa fertilidade e acidez (FALESI, 1986).

Estes solos são caracterizados por apresentar perfis de horizonte superficial organomineral, com acentuada variação em espessura, e matéria orgânica parcialmente decomposta ou humificada. Como estes solos são resultantes do acúmulo de sedimentos advindos das águas dos rios, apresentam má drenagem e elevados teores de argila. Podem apresentar boa fertilidade, porém alguns solos apresentam altos teores de alumínio trocável e não são dotados de boas propriedades físicas, devido às constantes inundações (FALESI, 1986; DOS SANTOS et al., 2004).

No ecossistema nativo as frutíferas convivem com espécies florestais, medicinais, palmeiras e oleaginosas. As principais espécies encontradas junto aos cacaeiros nativos são seringueira (*Hevea brasiliensis*), samaúma (*Ceiba pentandra*), castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*), andiroba (*Carapa guianensis*), e em menor ocorrência a ucuúba (*Virola surinamensis*), ingá (*Ingá* spp.) e frutíferas como o abacateiro (*Persea americana*), cajazeira (*Spondias monbin*), açazeiro (*Euterpe oleracea*), goiabeira (*Psidium guayava*) (ALMEIDA; BRITO, 2003), mututi (*Pterocarpus amazonicus* Huber), ipê (*Macrobium anugustifolium* (Benth.) Cowan.), murumuru (*Astrocaryum murumuru* Mart.), pracaxi (*Pentacleth ramacroloba* (Willd.) Kuntze.), anani (*Symphonia globulifera* L. f.), e miriti (*Mauritia flexuosa*) (AZEVEDO, 2010).

1.2.2 *Theobroma cacao* L.: Origem, disseminação e características

O cacau, *Theobroma cacao* L., é uma espécie ombrófila, que pertence à família Malvaceae, subfamília Sterculiaceae e ocorre naturalmente no sub-bosque da floresta Amazônica, com origem nas bacias dos rios Amazonas e Orinoco (SANCHEZ, 2011). O gênero *Theobroma* contém 22 espécies classificadas em seis seções, a maioria nativa da Amazônia. Porém, apenas *T. cacao* e *T. grandiflorum* são explorados comercialmente em larga escala (MICHELI et al., 2010).

O cacau foi citado pela primeira vez na literatura no século XVII, por Charles de L'Écluse que o descreveu com o nome de *Cacao fructus*, mas em 1753 essa denominação foi modificada por Lineu para a atual (SILVA NETO, 2001).

Do centro de origem, as espécies se disseminaram e surgiram dois grupos principais: cacau crioulo (ou nativo) e forasteiro (ou amazônico). O crioulo teve origem a partir da

disseminação pela região dos Andes em direção às terras baixas da Venezuela, Colômbia, e Equador, com expansão para a América Central e México. E o forasteiro, resultou da disseminação em direção ao Vale do Amazonas no norte do Brasil e Guianas. Além desses existe o trinitário (Trinidad), possivelmente oriundo do cruzamento entre crioulo e forasteiro. O genótipo Forasteiro é o mais cultivado no Brasil e na África Ocidental e representam a maior parte da produção comercial de cacau (MICHELI et al., 2010; NAIR, 2010).

A domesticação e consumo do cacau tiveram origem nas civilizações Maias e Astecas, onde o *Theobroma* significava “Comida dos Deuses”. No império Asteca, México era comum o consumo de bebida quente derivada do cacau, a qual era aromatizada com especiarias e chamada de xocoatl. Com a colonização da América os Espanhóis começaram a consumir o xocoatl no século XVI. A palavra chocolate provavelmente deriva de xocoatl e a palavra cacau vem de cacahuatl (PORRO, 1997). É válido salientar que antes da colonização, o cacau era levado a diferentes regiões pelos Maias, Astecas e Pipil-nicaraos.

O cacaueiro é uma planta que pode apresentar de 5 a 8 m de altura e 4 a 6 m de diâmetro de copa, quando propagado por sementes. Em área nativa as plantas podem chegar até 20 m de altura dependendo da área de sombra (Figura 1A) e o sistema radicular é composto por numerosas raízes secundárias na camada superficial (0,10 m), porque é o local onde está concentrado a maior quantidade de nutrientes, e pode se estender horizontalmente entre 1,20 a 1,50 m em torno de uma planta adulta. A raiz pivotante em solos profundos pode alcançar até 2 m (BRASIL, 2014). Cerca de 70 a 90% das raízes responsáveis pela nutrição do cacaueiro estão nos primeiros 0,30 m do perfil do solo (SILVA NETO, 2001).

Figura 1- Aspectos da planta (A), frutos (B), sementes (C) e barra de chocolate nativo (D).



Fonte: Google imagem.

O cacau possui caule ereto e é uma espécie cauliflora, ou seja, as almofadas florais surgem no tronco ou ramos lenhosos, nas axilas de folhas antigas em gemas desenvolvidas. A flor do cacau é hermafrodita e possui cinco sépalas, cinco pétalas, cinco estaminóides, cinco estames e um pistilo cujo ovário possui cinco lojas (BRASIL, 2014).

A polinização do cacau é limitada, pois as flores apresentam características estruturais que desfavorecem o processo, apesar de serem hermafroditas e homógamas. Isto ocorre porque o estigma feminino encontrar-se envolvido por um círculo de estaminóides masculino e suas anteras apresenta-se envolvidas pela cógula, formação recurvada das pétalas. A polinização do cacau é feita especificamente por um pequeno grupo de insetos da família Ceratopogonidae, gênero *Forcipomya* (YOUNG, 1982). Na Amazônia o cacau floresce duas vezes ao ano, o menor pico no início do período de menor pluviosidade e o maior ocorre no início do período chuvoso (OLIVEIRA et al., 2013).

O fruto do cacau é uma drupa e quando jovens apresentam cor verde ou roxa e quando maduros amarelos ou alaranjados, respectivamente (Figura 1B). O amadurecimento do cacau ocorre em média com 167 dias de desenvolvimento do fruto. A semente é dicotiledônea e pode apresentar forma elipsóide ou oval, com 0,02 a 0,03 m de comprimento (NAIR, 2010; SILVA NETO, 2001) e é recoberta por uma mucilagem de cor branca, rica em sacarose (90% do total de açúcares), frutose e glicose (aproximadamente 6%) (KONGOR et al., 2016). A semente é o principal produto comercializado, após a fermentação e secagem para a fabricação de chocolate (Figura 1C).

Os produtos oriundos da semente de cacau são manteiga, cacau em pó e licor, que são extraídos das sementes fermentadas e secas, principais matérias-primas para a fabricação de chocolate (Figura 1D), cosméticos, indústria de confecção e farmacêutica. O cacau é considerado uma das principais culturas tropicais do mundo, com produção estimada em de 4.168 milhões de toneladas em 2015 (FAO, 2016). A etapa de fermentação é necessária para o desenvolvimento do sabor e aroma de chocolate (KRÄHMER et al., 2015).

O cacau se desenvolve bem em regiões tropicais, onde a variação climática é pequena durante o ano, em termos de temperatura, radiação solar e comprimento do dia. A quantidade ótima de chuva para a espécie está entre 1.500 mm a 2.000 mm, bem distribuídos ao longo do ano e temperatura média de 25°C (SANCHEZ, 2011).

No que tange ao cacau nativo, o mesmo é típico dos ecossistemas de terra firme (áreas que não são influenciadas pelos rios) e várzeas da Amazônia brasileira. Em condição de terra firme apresenta distribuição aleatória ou agregada. E quando agregado forma agrupamentos com densidade populacional e distribuição espacial heterogênea. Nas várzeas,

constitui formações vegetais de extensão variada e idade desconhecida, provavelmente estabelecida por ribeirinhos, em associação com outras espécies botânicas de valor econômico, adaptadas a regime periódico de inundações (SILVA NETO, 2001).

Nas várzeas o cacauero é explorado de forma semi extrativista, com elevado número de ramos ortotrópicos jovens ou chupões e troncos por touceira, alta variação no número de touceiras por hectare, excesso de sombreados e baixa produtividade (ALMEIDA; BRITO, 2003).

Em áreas nativas as práticas de manejo são ausentes e quando há manejo este se limita a roçagens, replantio e práticas de beneficiamento de sementes (BRITO et al., 2002). A fertilização dos cacaueros é realizada pelos sedimentos em suspensão nas águas durante as cheias dos rios, assim, não há utilização de fertilizantes químicos e agrotóxicos (SILVA et al., 2002), originando produto genuinamente orgânico com amplas possibilidades de conquistar altos preços em nichos de mercado específicos e exigentes em produtos florestais com “selo verde”. Portanto, o que deve ser buscado no atual cenário é: melhor divulgação, marketing do cacau nativo e avançar na estrutura de produção, beneficiamento e comercialização.

As principais doenças que acometem os cacaueros nativos são podridão parda causada por *Phytophthora* spp. e vassoura-de-bruxa por *Moniliophthora perniciosa* (OLIVEIRA; LUZ, 2005). Entretanto, a baixa incidência da vassoura-de-bruxa na copa e almofadas florais de cacaueros nativos na várzea foi constatada (NASCIMENTO et al., 1984). Isto ocorre devido a época de disseminação da vassoura-de-bruxa não coincidir com a floração das plantas (SUFRAMA, 2003). Nos cacaueros de várzea, a ausência de tratos culturais somado aos efeitos das cheias anuais reduz a atividade fisiológica das plantas, isso reduz a disponibilidade de tecidos suscetíveis ao patógeno, nos meses de esporulação, contribuindo para a baixa incidência da vassoura-de-bruxa.

Nas regiões de ilhas no Pará os cacaueros nativos são explorados em regimes semi-extrativistas, onde o principal meio de transporte dos agricultores são canoas, barcos ou rabetas. O período de colheita do fruto coincide com o período de cheias dos principais rios da região, por isso o produtor coleta o cacau andando pela mata de canoa. E em algumas áreas há o desenvolvimento de tratos culturais, que consiste apenas na realização de roçagens e beneficiamento das sementes (colheita, quebra do fruto, fermentação parcial e secagem).

1.2.3 Cacau no cenário econômico

O Brasil figura como o quinto maior produtor de amêndoas de cacau do mundo. Nos últimos anos a decadência dos números de produção está atrelada as doenças que acometeram

os plantios nos maiores estados produtores, Pará e Bahia. A doença de maior expressão é a vassoura-de-bruxa (AIPC, 2018).

A demanda de amêndoas do país é grande, pois existem indústrias beneficiadoras, por isso a importação de amêndoas é uma realidade. Em 2018, o Brasil importou 62,4 mil toneladas de amêndoas. Mais de 90% da importação são provenientes de Gana e o restante da Costa do Marfim. Já o volume brasileiro exportado de amêndoas de cacau no mesmo ano foi de 616 mil toneladas, negociados principalmente com Japão, França e Holanda. E a exportação de chocolate tem volume de 28,8 mil toneladas em 2018, contribuindo com R\$ 24 bilhões no PIB (MAPA, 2019).

Em termos de produtividade, o estado do Pará detém os maiores números nos anos mais recentes. O estado produziu cerca 116 mil toneladas de cacau em 2018, em aproximadamente 180 mil hectares. As pesquisas do IBGE apontam crescimento da produção de cacau no Pará de 200% entre 2005 e 2018, com média aproximada de seis mil toneladas ao ano. Essa ascensão está atrelada as boas condições de clima e aos incentivos governamentais que os produtores têm recebido (MAPA, 2019).

É válido salientar que a produção das áreas nativas não é amplamente divulgada em dados estatísticos. Mas, é sabido que o extrativismo do cacau na Amazônia representa parcela da economia, bem como é atividade sustentável, e tem potencial para atingir melhores classificações devido ao ambiente de ocorrência, que o torna especial em aroma e sabor (SOS AMAZÔNIA, 2017). O preço pago pelas amêndoas de cacau nativo no estado do Amazonas em 2017 foi de R\$ 6,22 por quilograma, um valor muito baixo se comparado ao valor pago por amêndoas de híbridos (CONAB, 2017). Porém, em sites especializados na venda de chocolates nativos, os valores da barra de 50 g variam de R\$ 15,00 à R\$ 50,00, superior ao valor pago pelo chocolate nacional oriundo de áreas plantadas.

A Cooperativa Agroextrativista do Mapiá e Médio Purus (Cooperar), sediada em Boca do Acre, Amazonas, é uma das pioneiras na produção do cacau nativo. Desde 2006, o cacau vem sendo coletado, beneficiado e exportado para empresas europeias e americanas. A experiência da Cooperar é muito importante para o desenvolvimento dessa cadeia na região do Juruá. O cacau nativo tem diversas finalidades econômicas, porém a fabricação de chocolate é a mais atrativa (SOS AMAZÔNIA, 2017).

Há 18 anos a produção de chocolates finos de cacau nativo vem ganhando espaço no cenário Paraense. O pioneiro foi “Os chocolates De Mendes” que são vendidos com rótulo de referência à orientação geográfica de origem das amêndoas. Após a constatação do potencial da região para a produção de chocolates finos, outras marcas foram surgindo e hoje existe

cerca onze marcas de chocolate na região. Uma destas é a “Filha do Combu”, cacau colhido e produzido na Ilha do Combu. Nesta ilha a atividade cacauífera movimentou a economia com a venda de chocolate e também com o turismo, pois as pessoas têm a oportunidade de conhecer o ambiente de ocorrência do cacau e o processo de fabricação do chocolate.

A produção de cacau em área de várzea do Pará no ano de 2015 foi de 3.987 Mg (SEDAP, 2016). Parte desta produção é exportada como chocolate fino de origem da floresta para os Estados Unidos, Japão, França, Holanda, Bélgica, e para os estados brasileiros como São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

1.2.4 Os cacauicultores ribeirinhos

Os cacauíferos nativos da Amazônia são explorados por caboclos ribeirinhos, que vivem à margem dos rios que compõem a região e tem os rios como via natural de acesso. Os mesmos possuem moradia, hábitos e economia distintos dos cacauicultores que vivem em regiões de terra firme, onde não há influência das cheias dos rios. Os ribeirinhos dos rios Amazonas, Tocantins e Guamá, por exemplo, possuem como principais meios de transportes os barcos, canoas, "rabetas" e "voadeiras". Como o período de colheita do cacau coincide com o período de cheias dos rios da região é comum o ribeirinho utilizar a canoa como meio de transporte dentro do cacauífero nativo (BRITO et al., 2002).

Na ocasião da colheita os frutos são colhidos e quebrados, as amêndoas passam pela fermentação e secagem. O processo de fermentação é bem simples, as sementes são colocadas em cochos ou barris de madeira e cobertas com folhas de cacau ou banana. E na secagem as sementes são colocadas no sol. Da polpa do cacau também é feito o vinho, bebida comum entre o povo ribeirinho.

1.2.5 Solos hidromórficos

Os solos hidromórficos nas florestas geralmente estão localizados na parte mais baixa do relevo onde a água de escoamento está concentrada. Eles são caracterizados por lençóis freáticos elevados, sujeitos a gleização e apresentam elevados estoques de carbono em comparação com os solos que estão na parte alta do relevo (CHRISTIANSEN et al., 2012). As ilhas onde ocorre o cacau nativo possuem solos com características mineralógicas e químicas específicas, devido ao material de origem e as inundações periódicas. São formados em decorrência de processos pedogenéticos, sendo o mais comum a gleização, responsável pelas cores cinzentas no perfil do solo, bem como estão sujeitos à adição ou perda de materiais inorgânicos e orgânicos na forma particulada (CORINGA et al., 2012).

Os solos hidromórficos ficam um período inundado em anos normais em um ou mais horizontes a 50 cm da superfície do solo mineral (SOIL SURVEY STAFF, 2014). As inundações ocasionam a diminuição do potencial eletroquímico do solo (LIMA et al., 2005), e dessa forma altera as condições de redução e oxidação dos óxidos de ferro e manganês e sua solubilidade no solo. Isso influencia as características morfológicas do solo, levando à segregação do Fe^{3+} e à formação de zonas enriquecidas com Fe^{2+} , apresentando perfis com coloração mosqueadas marrom, cinza, azul, preto e amarelo, comumente observados em solos hidromórficos (SANTOS et al., 2018).

As manchas cinzas em três solos da bacia amazônica são enriquecidas com quartzo, as manchas amarelas consistiam em caulinita, illita e goethita, enquanto a matriz vermelha era enriquecida com ferro (ROSOLEN et al., 2002). Rosolen et al. (2002) também concluíram que as manchas oxidadas eram formadas pela intensa depleção de óxidos de Fe de um solo rico em Fe inicialmente homogêneo durante o processo pedogênico.

Os horizontes superficiais do solo também podem apresentar cor escura devido à deposição e acúmulo de matéria orgânica, entretanto, os organismos anaeróbios são menos eficientes na mineralização da matéria orgânica do que os aeróbios. Os processos de redução envolvem, a produção ou o consumo de H^+ , interferindo diretamente no pH do solo, dessa forma, solos hidromórficos têm maiores concentrações de nutrientes disponíveis para as plantas, como o Fe e o Mn, em estado reduzido, do que solos com boa drenagem (CORINGA et al., 2012).

Estudos sobre as características e função dos solos hidromórficos são pertinentes devido os impactos de mudanças na cobertura florestal sobre os fluxos de gases de efeito estufa nas florestas ripárias, pois essas florestas são pontos críticos para o ciclo de C e N no ambiente (GUNDERSEN et al., 2010).

1.2.6 Indicadores de Qualidade de Solos

O conceito de qualidade do solo está relacionado com a sua capacidade de funcionar dentro dos limites do ecossistema em sistema natural ou manejado, onde é possível manter a produtividade vegetal ou animal, manter ou melhorar a qualidade da água ou do ar e suportar a saúde humana e habitacional (DE ARAÚJO et al., 2012). Os indicadores de qualidade do solo ajudam na avaliação e monitoramento dos impactos antrópicos e naturais no solo, principalmente os processos de degradação, bem como identifica a eficácia de práticas de restauração e manejo do solo. Por isso, para avaliar a qualidade do solo é importante a

combinação dos atributos químicos, físicos e biológicos (CORSTANJE et al., 2017; BONE et al., 2010).

Os indicadores de qualidade do solo são categorizados em indicadores físicos, químicos e biológicos. Os indicadores físicos estão relacionados à organização das partículas e do espaço poroso, incluindo densidade, porosidade, estabilidade de agregados, textura, compactação, condutividade hidráulica e capacidade de armazenagem de água disponível e refletem a limitação ao crescimento radicular, aeração e movimentação de água no solo. Já o pH, salinidade, CTC, teor de nutrientes e elementos potencialmente tóxicos, são considerados indicadores químicos, e estão ligados a relação solo-planta. E os indicadores biológicos são a matéria orgânica, diversidade da fauna e flora, massa microbiana e respiração microbiana (GOMES et al., 2006).

Com o objetivo de avaliar a qualidade do solo em áreas de várzea com cultivo de arroz no Rio Grande do Sul foram determinados indicadores químicos, físicos e biológicos (DE LIMA et al., 2008). Os autores avaliaram o pH, carbono orgânico, N total, P, K, Ca, Mg, micronutrientes (Fe, Zn, Cu), Al trocável, saturação por Al, CTC e acidez potencial como indicadores químicos; já as propriedades físicas foram: a densidade do solo, textura, estabilidade dos agregados, microporosidade e retenção de água no solo. E como propriedades biológicas a biomassa microbiana, respiração do solo, N potencialmente mineralizável, β -glicosidase, fosfatase ácida e fosfatase alcalina. Os autores concluíram que estas variáveis foram eficazes na avaliação da sustentabilidade do uso da terra para o cultivo de arroz.

A análise e interpretação da dinâmica das propriedades do solo é fundamental para entender as respostas hidrológicas e o potencial de rendimento dos solos de várzea segundo a pesquisa de Daniel et al. (2017). Estes autores caracterizaram e espacializaram as propriedades físicas dos solos de várzea de Kilombero, Tanzânia. Foram avaliados a textura, densidade do solo, carbono orgânico e condutividade hidráulica saturada e obtiveram resultados que serviram como referência para o planejamento do manejo do solo e da água em planície de inundação.

A caracterização do solo de regiões sujeitas a inundação e a avaliação da qualidade do solo pelo índice de qualidade do solo (IQS), calculado com o conjunto mínimo de dados (CMD) baseado na análise de componentes principais (ACP) foi alvo da pesquisa de Zhang et al. (2016). Os resultados dessa pesquisa mostraram que os teores de carbono são indicadores de qualidade para as condições estudadas e que IQS baseado em CMD é ferramenta útil para avaliação da qualidade do solo em áreas úmidas. Nesta mesma linha de pesquisa Biswas et al. (2017) investigou indicadores de qualidade do solo e estabeleceu índices e limites críticos das

propriedades físicas, químicas e biológicas de três classes de solo na China e concluíram que os Inceptisols (Cambissolos) apresentam maior índice de qualidade em relação aos Entisols (Gleissolos) e Alfisols (Luvisolos).

REFERENCIAS

AIPC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS INDUSTRIAS PROCESSADOREAS DE CACAU. **Câmara setorial – 27 de março de 2018**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/cacau/2018/42a-ro/aipc-camara-setorial-marco2018.pdf>. Acesso em: 17 de out. 2019.

ALMEIDA, L.C.de.; BRITO, A.M.de. Manejo do cacau silvestre em várzea do estado do Amazonas, Brasil. **Agrotropica**, v. 15, p. 1, 2003.

AZEVEDO, J. R. DE. **Sistema de manejo de açazais nativos praticado por ribeirinhos**. Universidade Federal do Pará, p. 113, 2005. São Luis/MA: EDUFMA, 2010, 100 p.

BISWAS, S. *et al.* Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. **Geoderma**, v. 292, p. 34-48, 2017.

BONE, J. *et al.* Soil quality assessment under emerging regulatory requirements, **Environ. Environment International**, v. 36, p. 609-622, 2010.

BRASIL. **Implantação do cacau em sistemas agroflorestais**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira. Brasília: Mapa/ACS, 2014. 76 p.

BRITO, A.M. de. *et al.* Cultivo de cacau em várzeas amazônicas. **CEPLAC/CEPEC**, Ilhéus, n. 184, 2002. **Boletim Técnico**, p. 32.

CHRISTIANSEN, J. R. *et al.* Influence of hydromorphic soil conditions on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in a Danish temperate forest. **Forest Ecology and Management**, v. 284, p. 185–195, 2012.

CONAB – COPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Cacau (Amêndoa)**. 2017. Disponível em: [file:///C:/Users/User/Downloads/Cacau_-_Analise_Mensal_-_dezembro-2017%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Cacau_-_Analise_Mensal_-_dezembro-2017%20(4).pdf). Acesso em: 11 de set. 2019.

CORINGA, E. *et al.* Atributos de solos hidromórficos no pantanal norte matogrossense. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 1, p. 19–28, 2012.

CORSTANJE, R. *et al.* Physical soil quality indicators for monitoring British soils. **Solid Earth**, v. 8, p. 1003–1016, 2017.

DANIEL, S. *et al.* Spatial Distribution of Soil Hydrological Properties in the Kilombero Floodplain, Tanzania. **Hydrology**, v. 4, n. 57, 2017.

DE ARAÚJO, E. A. *et al.* Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, v.5, n.1, 2012.

DE LIMA, A. C. R. *et al.* Soil Quality Assessment in Rice Production Systems: Establishing a Minimum Data Set. *Journal of Environmental Quality*, v. 37, p. 623-630, 2008.

DOS SANTOS, S. R. M. *et al.* Análise florística e estrutural de sistemas agroflorestais das várzeas do rio Juba, Cametá, Pará. *Acta Amazonica*, v. 34, n. 2, p. 251-263, 2004.

FALESI, I. C. **Estado atual de conhecimento de solos da Amazônia brasileira.** In: SIMPÓSIO DO TRÓPICO ÚMIDO, 1., 1984, Belém,PA. Anais... Belém, PA: EMBRAPA-CPATU. 1986. v.1, p. 168-191. (EMBRAPA-CPATU. Documentos, 36).

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Proposed draft maximum levels for Cadmium in Cocoa and Cocoa-derived products.** 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/.pdf>. Acesso em: 10 de out. 2019.

GOMES, A. da S. *et al.* Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul. *Embrapa Clima Temperado*, Pelotas, 2006. Documentos 169, 40p.

GUNDERSEN, P. *et al.* Environmental services provided from Riparian Forests in the Nordic Countries. *A Journal of the Human Environment, Stockholm*, v. 39, n. 8, p. 555-566, 2010.

JUNK, W.J. **As águas da região Amazônica.** In: E. SALATI, et al (eds). *Amazônia: Desenvolvimento, integração e ecologia.* Editora Brasiliense/CNPq. p. 45-100, 1983.

KONGOR, J. E. *et al.* Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile — A review. *Food Research International*, v. 82, p. 44-52, 2016.

KRÄHMER, A. *et al.* Fast and neat – Determination of biochemical quality parameters in cocoa using near infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, v. 181, p. 152–159, 2015.

LIMA, H. N. *et al.* Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia submetidos à inundação. *Acta Amazonica*, v. 35, n. 3, p. 317-330, 2005.

LIMA, R. R. A agricultura nas várzeas do estuário do Amazonas. *Instituto Agrônomo do Norte*, n. 33, 1956.

MAPA. **Brasil quer ganhar posições na produção mundial de cacau e chocolate.** Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/noticias/brasil-quer-retomar-protagonismo-no-cenario-global-de-cacau-e-chocolate>. Publicado em: 08 de julho, 2019. Acesso em: 11 de setembro, 2019.

MICHELI, F. *et al.* Functional genomics of cacao. *Advances in Botanical Research*, v. 55, n. C, p. 119–177, 2010.

NAIR, K. P. P. *Cocoa (Theobroma cacao L.)*. 2010.

NASCIMENTO, J.C. *et al.* Efeito de práticas culturais sobre a produção de cacauzeiros em várzea amazônica. **Revista Theobroma**, v. 14, n. 3, p. 175-180, 1984.

OLIVEIRA, C. P. **Cultivo e manejo de cacauzeiros**. Associação para o desenvolvimento da agricultura familiar do Alto Xingú. São Feliz do Xingú: Adafax. 2013. 36 p.

OLIVEIRA, M. L.; LUZ, E. D. M. N. **Identificação e manejo das principais doenças do cacauzeiro no Brasil**. Ilhéus: CEPLAC. 2005. 132p.

PORRO, A. Cacau e chocolate: dos hieróglifos maias à cozinha Ocidental. **Anais do Museu Paulista**, v. 5, p. 279-284, 1997.

ROSOLEN, V. *et al.* Genesis of the mottled horizon by Fe-depletion within a lateritic cover in the Amazon Basin. **C.R. Geoscience**, v. 334, p.187-195, 2002.

SANCHEZ, S. E. M. **Cacau e graviola: descrição e danos das principais pragas-de-insetos**. Ilhéus: Editus, 2011. 147 p.

SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SEDAP – SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO E DA PESCA. Pará 2030 – **Cadeia Produtiva do cacau no Estado do Pará**. 2016. Disponível em: <http://www.sedap.pa.gov.br/sites/default/files/Prodecacau.pdf>. Acesso em: 04 de nov de 2019.

SHANLEY, P. (Coord.). **Frutíferas e Plantas Úteis na Vida Amazônica**. Belém: CIFOR, Imazon, 2005.

SILVA NETO, P. J. da *et al* (Coord.). **Sistema de produção de cacau para a Amazônia brasileira**. Val de Belém, CEPLAC, 2001. 125p. ISSN 0102-5511.

SILVA, L. G. T. *et al.* Análise fisiográfica das várzeas do baixo Tocantins: uma contribuição ao manejo e desenvolvimento dos sistemas de uso da terra. **Serie Documentos - Embrapa Amazônia Oriental**, n. 149, p. 34, 2002.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12th edition. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C, 2014.

SOS AMAZÔNIA. **Cacau nativo da Amazônia: boas práticas de produção recomendadas para o Vale Juruá no Acre**. SOS Amazônia, Rio Branco, 2017, 43 p.

SUFRAMA. **Cacau**. Superintendência da Zona Franca de Manaus. Vol. 3. Manaus: Suframa, 2003. 34 p.

YOUNG, A.M. Effects of shade cover and availability of midge breeding sites on pollinating midge populations and fruit set in two cocoa farms. **The Journal of Applied Ecology**. v. 19, p. 47-63, 1982.

YUYAMA, K. A cultura de camu-camu no brasil. **Revista brasileira de fruticultura**, v. 33, n. 2 p.335-690, 2011.

ZHANG, G. *et al.* Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 458-466, 2016.

2 CARACTERIZAÇÃO E ESTABELECIMENTO DE INDICADORES E ÍNDICES DE QUALIDADE DE SOLOS SOB CACAUEIROS NATIVOS NA AMAZÔNIA

RESUMO

O cacauieiro (*Theobroma cacao* L.) ocorre naturalmente sob o dossel das árvores na Amazônia, em ecossistemas de várzea. É manejado em áreas nativas, e nesta condição, fornece amêndoas orgânicas para a produção de chocolates finos. Esta atividade contribui com a preservação da floresta e manutenção de serviços ecossistêmicos. O objetivo deste estudo foi caracterizar solos sob cacauieiros nativos, em função das propriedades físicas, químicas e microbiológicas e estabelecer indicadores e índices de qualidade do solo. Foram realizadas coletas de solo deformadas e indeformadas, profundidade 0-0,10 m, na Ilha de Tatuoca (S_T), Ilha do Combu (S_C) e Comunidade Pacajá (S_P). Os solos foram caracterizados quanto as propriedades químicas (pH, carbono orgânico – CO, P, K, Ca, Mg, Al, acidez potencial – H+Al, soma de bases – SB, capacidade de troca de cátions – CTC e saturação por bases – V%), propriedades físicas (textura, conteúdo de água, razão de vazios textural, residual, estrutural e total, diâmetro efetivo dos poros textural e estrutural, densidade do solo, densidade de partículas e estabilidade de agregados) e propriedades microbiológicas, (respiração basal - C-CO₂ e carbono da biomassa microbiana - CBM). Os três solos apresentaram saturação por bases > 50% e houve correlação positiva entre o carbono orgânico e a soma de bases, capacidade de troca de cátions e saturação por bases. Os solos S_T, S_C, S_P apresentam classe textural franco argilo siltosa, franco siltosa e franca, respectivamente. A equação duplo exponencial mostrou o comportamento bimodal da distribuição de poros com maior pico referente a porosidade textural nos três solos. Houve correlação positiva entre CO e argila em S_T e S_P, mostrando a interação das partículas coloidais na agregação do solo. O conteúdo de silte e argila contribuiu para a maior estabilidade de agregados, porosidade total e menor densidade do solo dos três solos. O carbono da biomassa microbiana foi superior a respiração basal em S_T e S_P. A análise de componentes principais foi eficiente na redução de dados e apontou o pH_{H2O}, SB, PT, Ds, CBM e C-CO₂ como indicadores de qualidade de solo para áreas sob cacauieiros nativos. Os índices de qualidade dos solos sob cacauieiros nativos ficaram próximos a 1, os quais podem ser a base para estudos futuros sobre qualidade de solos sob cacauieiros cultivados.

Palavras-chave: Frutífera nativa. *Theobroma cacao* L. solo de várzea. qualidade do solo.

ABSTRACT

Cacao tree (*Theobroma cacao* L.) occurs naturally under dossal of trees in Amazon, in lowland ecosystems. It is managed in native areas, and in this condition, it provides organic almonds for production of fine chocolates. This activity contributes to preservation of forest and maintenance of ecosystem services. The objective of this study was to characterize soils under native cocoa trees, depending on physical, chemical and microbiological properties and to establish indicators and indexes of soil quality. Deformed and undisturbed soil collections were carried out, depth 0-0.10 m, on Tatuoca Island (S_T), Combu Island (S_C) and Pacajá Community (S_P). Soils were characterized in terms of chemical properties (pH, organic carbon – CO, P, K, Ca, Mg, Al, potential acidity – H+Al, total of bases – SB, cation exchange capacity – CTC and base saturation – V%), physical properties (texture, water content, textural void ratio, residual, structural and total, effective diameter of pores textural (δ_1) and structural (δ_2), bulk density, particle density and aggregate stability) and microbiological properties, (basal respiration – C-CO₂ and carbon from microbial biomass – CBM). Three soils showed base saturation > 50% and there was a positive correlation between organic carbon and total of bases, cation exchange capacity and base saturation. S_T, S_C, S_P soils have textural class silty clay loam, silty loam and loam, respectively. Double exponential equation showed the bimodal behavior of pore distribution with the highest peak regarding the textural porosity in three soils. There was a positive correlation between organic carbon and clay in S_T and S_P, showing interaction of colloidal particles in soil aggregation. Silt and clay content contributed to high stability of aggregates, total porosity and lower Ds of three soils. Microbial biomass was superior to basal respiration in S_T and S_P. Principal component analysis was efficient in reducing data and effective out pH_{H2O}, SB, PT, Ds, CBM and C-CO₂ as indicators of soil quality for areas under native cacao trees. Soil quality indexes – SQI under native cacao trees were nest to 1, which may be basis for future studies on soil quality under cultivated cacao trees.

Keywords: Native fruit. *Theobroma cacao* L. native areas. floodplain soil. soil quality.

2.1 Introdução

O cacauero (*Theobroma cacao*) é uma importante *comodity* para a economia global, em virtude do uso de suas amêndoas para a fabricação de chocolate. Esta espécie tem como centro de origem o bioma amazônico (MICHELI et al., 2010), onde é cultivado em sistemas agroflorestais ou manejado em ecossistemas nativos. Nos estados do Pará e Amazonas o extrativismo do cacau ocorre em área de várzea e, a comercialização de amêndoas é destinada para a produção de chocolates finos. Os dados econômicos de áreas nativas são pouco divulgados, mas, em 2015 a extração de cacau nativo foi de 3.987 toneladas (SEDAP, 2016).

No bioma amazônico o cacauero se estabelece sob o dossel de espécies florestais, próximo aos rios ou em ilhas. As árvores promovem a deposição contínua de resíduos vegetais, que atuam na manutenção da matéria orgânica, e influenciam as propriedades químicas (WOLINSKA; STEPNIIEWSKA, 2013), físicas (PICCOLI et al., 2017; SIMONETTE et al., 2016) e microbiológicas dos solos (DE SOUZA et al., 2010; QIAN et al., 2018).

Neste cenário predominam os solos hidromórficos, os quais, são influenciados pela deposição sedimentar proveniente do movimento das águas (WANG et al., 2017; DELARMELINDA et al., 2017), e por fluxos de entrada e saída de material vegetal e animal (SMITH et al., 2012). Estes solos apresentam pH ácido (CORINGA et al., 2012), alto conteúdo de carbono orgânico (MAFRA et al., 2007), potássio (MAGNAGO et al., 2010) e classificação textural franco siltosa e franco argilo siltosa (LOPES et al., 2006). O clima tropical úmido da região acelera a mineralização da matéria orgânica do solo, porém o aumento da biomassa microbiana ocorre por causa da diversidade do material que compõe a serapilheira (QIAN et al., 2018; BISSONNAIS et al., 2018).

Estudos em áreas com cacaueros têm sido realizados, em solos cultivados com híbridos e em sistemas agroflorestais (SOUZA Jr et al., 1999; MONROE et al., 2016; MOÇO et al., 2010; ADENIYI et al., 2018). As propriedades do solo, textura, pH, carbono orgânico, P, K, Ca, Mg, CTC, V% foram estudadas por Singh et al. (2019) em solo sob cacauero cultivado a fim de estabelecer o uso sustentável dos recursos do solo e melhorar a produção de amêndoas. Índices de qualidade do solo (IQS) são usados para o monitoramento dos impactos naturais e antrópicos (ANDREWS et al., 2002), estes foram estabelecidos para sistemas agroflorestais e cabruca (cacauero plantado dentro da mata Atlântica) no sul da Bahia por Fernandes et al. (2013), que comprovaram o baixo nível de fertilidade dos solos. Na mesma região Araújo et al. (2018) estabeleceram o IQS para atender os critérios nutricionais do cacauero e observaram que 66% dos solos possuem qualidade regular, IQS entre 0,42 a

0,61. Em cacauzeiros na Nigéria a seleção de variáveis indicadoras da qualidade do solo através da ACP revelou a alta influência do pH, CTC e fósforo no IQS (KONGOR et al., 2019).

O desenvolvimento produtivo de frutíferas em seu ambiente natural é uma forma de preservar as características genéticas das espécies e atrelar a qualidade do produto a sua origem geográfica (PEREIRA; PASQUALETO, 2011). Por isso, caracterizar solos sob cacauzeiros nativos é importante para entender o comportamento desses solos e a sua influência no crescimento de plantas, manutenção de serviços ecossistêmicos e preservação da floresta. E a seleção de indicadores e índices de qualidade do solo nativo pode estabelecer parâmetros de gestão sustentável para os solos sob cacauzeiros nativos e cultivados.

As análises multivariadas são boas ferramentas para pesquisas sobre manejo e uso da terra que influenciam na qualidade dos solos (CHEN et al., 2013; ZHANG et al., 2016; BISWAS et al., 2017; KONGOR et al., 2019). Em ecossistema nativo a qualidade do solo é influenciada principalmente pela deposição de material orgânico. Por isso, as hipóteses deste estudo são: (i) os indicadores de qualidade de solo sob cacauzeiros nativos apresentam relação direta com o carbono orgânico e (ii) os solos sob cacauzeiros nativos apresentam boa qualidade, IQS próximos de 1. O objetivo foi caracterizar solos sob cacauzeiros nativos, em função das propriedades físicas, químicas e microbiológicas e estabelecer indicadores e índices de qualidade do solo.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Características gerais das áreas de estudo

O estudo foi desenvolvido em três áreas de cacauzeiros nativos, nas Regiões do Baixo Tocantins e Guajará, estado do Pará, Brasil: a ilha do Tatuoca foi a área estudada no município de Mocajuba, a comunidade de Pacajá a área do município de Cametá e a ilha do Combu, no município de Belém (Tabela 1). A localização das três áreas está representada na Figura 2. O clima das áreas é classificado como “Ami” segundo a classificação de Köppen. Os solos da Ilha do Tatuoca e Combu são classificados como Gleissolo Háptico (EMBRAPA, 2016). Na comunidade Pacajá os solos ocorrem sobre depósitos mais grosseiros, com predomínio de silte e areia fina (SILVA et al., 2002)

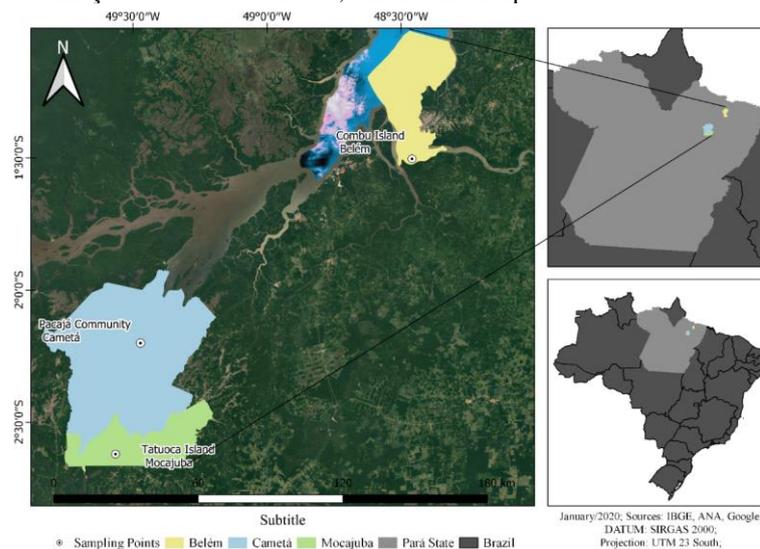
Tabela 1- -Dados de localização e clima das áreas com cacauzeiros nativos em três municípios paraenses.

Áreas	Coordenadas	Altitude (m)	Precipitação (mm ano ⁻¹)	T°
S _T (Ilha do Tatuoca)	2°37'12" S; 49°34'7" W	20	2.225	25,6° C
S _C (Ilha do Combu)	1°30'9,7" S; 48°27'31" W	17	2.891	26° C
S _P (Com. Pacajá)	2°12'1,7" S; 49°28'19,4" W	10	2.202	25,3° C

Onde, T°: temperatura média anual.

Neste estudo, os solos amostrados foram indicados por siglas baseadas no local de coleta, desta forma o solo da ilha do Tatuoca, ilha do Combu e Comunidade Pacajá receberam a denominação S_T, S_C e S_P, respectivamente.

Figura 2 - Mapa de localização das áreas avaliadas, em três municípios do estado do Pará.



Fonte: Peola Souza.

Município de Mocajuba: Ilha do Tatuoca

A Ilha de Tatuoca tem como principal rio o Tocantins. Nesse trecho do rio há influência da maré semidiária e no período de enchente o nível do rio sobe, principalmente em março, e na vazante desce, nos meses de setembro e outubro. A variação anual do nível da água é de 9 m nessa região. Na vazante a água do rio apresenta cor verde clara e na enchente a água é barrenta devido à alta presença de sedimentos provenientes de erosões nas margens do Alto Tocantins (DE MERONA, 1987).

Durante o período de enchente os cacaeiros da Ilha do Tatuoca são inundados e esse período coincide com a colheita do cacau (Figura 3). Nesta ilha a população ribeirinha trabalha com a pesca e o manejo do cacaeiro e açaizeiro nativos, além da extração do látex da seringueira, que quando fermentado é chamado de salambri.

Figura 3 - Cacaueiro nativo inundado no período de colheita na Ilha do Tatuoca, Mocajuba, Pará.



Fonte: Peola Souza.

O estudo na ilha do Tatuoca foi realizado em área com predomínio de cacaeiro com características típicas do Bioma Amazônico e presença de muitas espécies florestais e frutíferas. O cacaeiro não é manejado, porém, as espécies florestais de maior valor econômico foram retiradas. As principais espécies encontradas na Ilha são seringueira (*Hevea brasiliensis*), samaúma (*Ceiba pentandra*), castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*), andiroba (*Carapa guianensis*), ucuúba (*Virola surinamensis*), ingá (*Ingá* spp.), cajazeira (*Spondias monbin*), muruci (*Byrsonima crassifolia* (L.) Rich), açaizeiro (*Euterpe oleracea*), goiabeira (*Psidium guayava*), jameiro (*Syzygium* spp.).

Município de Belém: Ilha do Combu

A ilha do Combu é uma Área de Proteção Ambiental (APA), localizada entre o rio Guamá e a baía de Guajará (JARDIM; VIEIRA 2001). O rio Guamá é fortemente influenciado pela mesomaré (maré semidiurna). O solo da Ilha do Combu é formado por sedimentos da formação Barreiras (Mioceno) (EMBRAPA, 2016).

A vegetação da Ilha do Combu é composta por floresta de várzea com cipós, árvores, arbustos e espécies de sub-bosque, apresentando estrutura e composição florística variada. Pesquisas sobre a composição florística desta ilha identificaram 23 famílias, 36 gêneros e 40 espécies na várzea baixa, predominando as famílias Mimosaceae, Aracaceae e Fabaceae. Na várzea alta foram catalogadas 23 famílias, 37 gêneros e 40 espécies, predominando as famílias Arecaceae, Mimosaceae, Araceae, Sterculiaceae e Chrysobalanaceae (RODRIGUES et al., 2006).

A população da ilha tem como fonte de renda a colheita e venda dos frutos de açaí, principal atividade econômica, além da venda de amêndoas de cacau nativo, látex, pesca e criação de animais de pequeno porte.

O sítio denominado “Filha do Combu” foi o local onde a coleta foi realizada (Figura 4). Nesta área a principal atividade econômica é a colheita do cacau e fabricação de chocolates. Apesar de ser área nativa, o cacauzeiro é manejado, pois algumas espécies florestais foram retiradas e é realizado o desbaste das touceiras, podas, roçagens e replantio do cacau. Muitas plantas foram eliminadas devido a ocorrência da “vassoura de bruxa”, ocasionada pelo fungo *Moniliophthora perniciosa*. As mudas usadas no replantio são feitas na propriedade com sementes nativas. Não há utilização de fertilizantes minerais e pesticidas e o beneficiamento e fabricação do chocolate são realizados na propriedade. O ecoturismo também é uma atividade econômica da ilha.

Figura 4 - Visão geral do cacaueteiro nativo na ilha do Combu, Belém, Pará (A); cobertura do solo (B); e torrão de solo apresentando características de hidromorfismo (C).



Fonte: Peola Souza.

Município de Cametá: comunidade Pacajá

A hidrografia é representada pelo rio Tocantins, que forma a “região de ilhas” com cerca de noventa ilhas, distribuídas ao longo do Baixo Tocantins. Em Cametá o rio Tocantins é mais influenciado pela maré oceânica, a qual afeta a modificação do fluxo dos canais fluviais e a formação de bancos de areia associados a erosão nas margens do rio.

A comunidade Pacajá está localizada na margem esquerda do rio, onde ocorre solos desenvolvidos sobre depósitos mais grosseiros. Esta área é considerada várzea alta, com oscilação do lençol freático abaixo de 2,5 m de profundidade ao longo do ano (SILVA et al., 2002), porém, não é inundada na enchente do rio.

A coleta na Comunidade Pacajá foi realizada em sítio agroflorestal com predomínio de cacaueteiro nativo (Figura 5). No sítio residiam duas famílias, que desenvolviam o extrativismo. A área apresentava outras frutíferas nativas como o cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*), jameiro, taperebazeiro, bacurizeiro (*Platonia* sp.) e açazeiro. Além de outras frutíferas que foram introduzidas pelas famílias, como a aceroleira (*Malpighia emarginata*), laranjeira (*Citros* sp.), limoeiro (*Citros* sp.) e goiabeira. O cacaueteiro não era efetivamente manejado, a única prática realizada era a roçagem e no perímetro mais próximo as residências a superfície do solo era varrida e as folhas e galhos amontoados próximo as árvores.

Figura 5 - Cacaueiro nativo no Rancho Sagrada Família, Comunidade Pacajá, Cametá, Pará.



Fonte: Peola Souza.

Em alguns pontos de coleta, próximo à divisa da várzea alta com a várzea baixa encontramos uma quantidade expressiva de conchas, fragmentos cerâmicos e ossos em superfície (Figura 6). Sobre o histórico da área, a população local relatou que a comunidade foi habitada por indígenas antes da colonização de Cametá.

Figura 6 - Amostra de solo da Comunidade Pacajá com alta presença de conchas.



Fonte: Peola Souza.

2.2.2 Amostragem

A amostragem do solo ocorreu nos meses de menor pluviosidade na região (junho a novembro). As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-0,10 m, na projeção da copa do cacaueiro, com distância de cerca de 20 m de um ponto a outro.

Em cada área foram coletadas 58 amostras simples deformadas de solo, para a determinação das propriedades químicas do solo, textura e densidade de partícula. Também foram coletadas 30 amostras indeformadas, na mesma profundidade, utilizando anéis cilíndricos de 0,05 m de diâmetro e altura, para a determinação das características de retenção

de água no solo e densidade do solo. Para a determinação da estabilidade de agregados foram coletadas 28 amostras com estrutura preservada em anéis cilíndricos com 0,05 m de diâmetro e altura.

Para a avaliação das propriedades microbiológicas foram coletadas cinco amostras simples deformadas por área, na profundidade de 0-0,10 m, as quais, foram armazenadas em caixas térmicas e encaminhadas ao laboratório para a determinação do carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal (C-CO₂), quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) e quociente microbiano ($q\text{MIC}$).

2.2.3 Propriedades químicas do solo

As propriedades químicas do solo foram determinadas seguindo os procedimentos descritos por Teixeira et al. (2017a) e consistiram na avaliação do: pH em água e KCl na proporção solo:solução (1:2,5). P disponível e K, extraídos por Mehlich-1 (0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄ + 0,05 mol L⁻¹ de HCl), sendo o P determinado por colorimetria e o K por fotometria de chama; Al, Ca e Mg extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, sendo o Al determinado por titulação (volumetria de neutralização), enquanto que Ca e Mg foram determinados por complexometria com EDTA; H+Al extraídos com solução de acetato de cálcio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0 e determinados por titulação. O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley e Black (1934) modificado, baseado no princípio da oxidação da matéria orgânica, com dicromato de potássio em meio sulfúrico.

Foram calculados a soma de bases (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺), capacidade de troca de cátions efetiva (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Al³⁺) e a saturação por bases ($V\% = \text{SB} \times 100 / \text{CTC}$).

2.2.4 Propriedades físicas do solo

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada pelo método da pipeta com uso do NaOH 1M como dispersante químico e agitação por 16 h. Antes da dispersão, as amostras com conteúdo de matéria orgânica > 5% passaram por pré-tratamento para remoção da matéria orgânica com H₂O₂. As amostras coletadas no município de Cameté com fragmentos de conchas e cerâmicas, foram submetidas ao pré-tratamento com HCl, para remoção de carbonatos e sais solúveis (GEE; BAUDER, 1986).

As amostras indeformadas foram saturadas por 48 h em bandejas por meio da elevação gradual da lâmina de água. Após a saturação as amostras foram submetidas aos potenciais matriciais: -10, -30, -60, -100, -200, -300, -400, -500, -600, -700 hPa em mesa de tensão (KLUTE, 1986). Os potenciais abaixo de -5000 hPa foram determinados utilizando o

psicrômetro (modelo WP4-T) (SCANLON et al., 2002). Nas amostras da ilha do Tatuoca foram medidos os potenciais matriciais -5900, -6600, -10200, -12900, -16500, -17700, -17900 hPa; ilha do Combu os potenciais -4400, -7500, -8100, -10600, -11500, -12900, -15200, 15700, -20100 hPa; e na comunidade Pacajá -3600, -7500, -10090, -12400, -12600, -17600 hPa.

A determinação do potencial matricial no psicrômetro foi realizada com amostras deformadas partindo do princípio que a umidade do solo na parte mais seca da curva de retenção depende da textura do solo, sendo fortemente influenciada pelo teor de argila+silte no ponto de murcha permanente (KLEIN et al., 2010). Para tanto, das 58 amostras deformadas coletas em cada área, foi retirada uma amostra composta, da qual foram retiradas porções de TFSA, cerca de 3 g, que foram colocadas em cápsulas de aço inox, umedecidas com o conta gotas e levadas à geladeira por 24 h para que ocorresse a distribuição uniforme da água na amostra. Após esse período as amostras foram colocadas na câmara hermeticamente fechada do psicrômetro, onde a umidade da câmara entra em equilíbrio com o potencial da água no solo, que é calculado com base na temperatura do solo e do ar, no ponto de orvalho (SCANLON et al., 2002).

A curva de retenção de água no solo (CRA) foi ajustada ao modelo matemático duplo exponencial proposto por Dexter et al. (2008a), de acordo com a equação 1:

$$U_g = C + A_1 e^{(-h/h_1)} + A_2 e^{(-h/h_2)} \quad (1)$$

Onde, U_g : umidade gravimétrica do solo ($g\ g^{-1}$), que é expressa em função do potencial matricial (h), C : assíntota da equação e corresponde ao conteúdo de água residual ($g\ g^{-1}$), A_1 e A_2 : conteúdo de água referente a porosidade textural e estrutural, respectivamente ($g\ g^{-1}$), e h_1 e h_2 : potenciais matriciais aplicados para esvaziar o espaço poroso textural e estrutural, respectivamente (hPa). A distribuição do tamanho dos poros foi calculada a partir da diferenciação do modelo duplo exponencial, equação 1, em relação ao potencial mátrico conforme sugerido por Dexter et al. (2008a).

O diâmetro efetivo dos poros texturais (δ_1) e poros estruturais (δ_2), em μm , foi calculado usando a equação 2:

$$\delta = 3000/h \quad (2)$$

Onde, δ : diâmetro efetivo dos poros (μm) e o h o potencial matricial, responsável por esvaziar poros texturais e estruturais (hPa). A equação 2 deriva da equação física de ascensão capilar de Young-Laplace.

As razões de vazios equivalentes aos poros residuais (e_{residual}), texturais (e_{textural}) e estruturais ($e_{\text{estrutural}}$) foram obtidas por meio das equações 3 a, b e c, respectivamente:

$$e_{\text{residual}} = C[\rho_s/\rho_\theta] \quad (3a)$$

$$e_{\text{textural}} = A_1[\rho_s/\rho_\theta] \quad (3b)$$

$$e_{\text{estrutural}} = A_2[\rho_s/\rho_\theta] \quad (3c)$$

Onde, ρ_s : densidade de partículas (g cm^{-3}), ρ_θ : densidade da água (g cm^{-3}). C, A_1 e A_2 são os parâmetros de ajuste da equação 1.

A porosidade total (PT) foi calculada a partir da densidade do solo e da densidade das partículas (TEIXEIRA et al., 2017b). Ao final da determinação da CRA as amostras foram secas em estufa a 105 °C até atingir massa constante para a obtenção da densidade do solo (D_s) (BLAKE; HARTGE, 1986). A densidade das partículas (D_p) foi determinada pelo método do picnômetro (BLAKE; HARTGE, 1986).

A estabilidade dos agregados do solo foi determinada via peneiramento úmido. O procedimento consistiu na pesagem de 50 g de agregados secos ao ar (tamanho entre 8,00 a 4,76 mm) que foram umedecidos por capilaridade por 16 h. As amostras foram colocadas em conjunto de peneiras com aberturas de 0,053 mm, 0,105 mm, 0,25 mm, 0,50 mm, 1,00 mm, 2,00 mm e 4,76 mm para agitação mecânica em agitador vibratório, do tipo Yoder, durante 10 minutos com rotação de 30 rpm. Em seguida o material retido em cada peneira foi transferido para béqueres de 50 ml e levados para a estufa 105°C até atingir massa constante. Para correção da areia, nas amostras retidas em cada peneira, adicionou-se solução de NaOH a 1M, em seguida, esperou-se agir por 1 h para posterior lavagem, secagem em estufa até atingir massa constante (SALTON et al., 2012).

O diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados foi obtido pela equação 4:

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) / m_i \quad (4)$$

Onde, w_i : massa de cada classe (g), x_i : diâmetro médio das classes (mm), m_i : massa total de agregados retidos em todas as peneiras (g).

2.2.5 Propriedades microbiológicas

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado pelo método de irradiação por microondas (ISLAM; WEIL, 1998). As análises irradiadas foram submetidas à radiação eletromagnética por 45 segundos, com base na potência do forno micro-ondas. Após a radiação foram adicionados 40 ml de solução extratora, K_2SO_4 0,5 M (VANCE et al., 1987), e posterior filtragem. O carbono orgânico foi determinado com $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,066M em meio

sulfúrico. Foram feitas seis provas em branco, três contendo K_2SO_4 0,5 M e todos os demais reagentes e três apenas com o K_2SO_4 . O CBM foi obtido a partir das equações seguintes:

$$CiNi = \frac{(Vb - Vam) * (Molaridade\ do\ sulfato\ ferroso) * (3) * (1000) * (Vex)}{(Vex) * (Peso\ do\ solo)} \quad (5)$$

Onde, CiNi: representa as amostras irradiadas e não irradiadas, Vb: volume da prova em branco (ml), Vam: volume de sulfato ferroso consumido na amostra (ml), 3: relação entre o número de mols, 1000: fator de correção da umidade, Vex: volume do extrator (ml), Psolo: peso do solo.

$$CBM = (Ci - Cni) / RC \quad (6)$$

Onde, CBM: Carbono da biomassa microbiana ($mg\ kg^{-1}$), Ci: valor da amostra irradiada, Cni: valor da amostra não irradiadas, RC: valor de referência (0,33).

A atividade microbiana foi avaliada pela determinação da respiração basal (C-CO₂), segundo metodologia descrita por Alef e Nannipieri (1995), a partir da quantificação do CO₂ liberado no processo de respiração microbiana durante dez dias de incubação (28° C). O cálculo para a determinação da respiração basal foi feito com base na equação 7:

$$C - CO_2 = \left(\frac{Vb}{Va} \right) * N * f * V / At \quad (7)$$

Onde, C-CO₂: carbono oriundo da respiração basal do solo ($mg\ de\ C-CO_2\ kg^{-1}\ solo\ hora^{-1}$), Vb: volume de HCl gasto na titulação da prova em branco (ml), Va: volume gasto na titulação da amostra (ml), N: normalidade do HCl (0,5), f: fator de correção do HCl 0,5 M, V: volume de NaOH 0,5 M usado na captura de CO₂ (ml), At: alíquota que foi titulada (ml).

O quociente metabólico (qCO_2), que representa a quantidade de C-CO₂ liberada em determinado tempo, por unidade de carbono microbiano foi determinado conforme Da Silva (2007), equação 8:

$$qCO_2 = \frac{C-CO_2}{CBM} \quad (8)$$

E o quociente microbiano ($qMIC$) foi obtido através da equação 9, com a utilização do carbono orgânico (CO):

$$qMIC = \frac{CBM}{CO} * 100 \quad (9)$$

2.2.6 Índice de qualidade do solo

O índice de qualidade do solo foi desenvolvido em três etapas: 1º- seleção de indicadores; 2º- pontuação ou escore dos indicadores; 3º- cálculo do índice de qualidade do solo (IQS).

A seleção de um conjunto mínimo de dados (CMD) foi realizada para a escolha de indicadores de qualidade do solo através do método estatístico de análise de componentes principais (ACP). Apenas as componentes (CP's) um e dois e com autovalores ≥ 1 foram utilizadas (ANDREWS; CARROLL, 2001). Nesta pesquisa a ACP para redução dos dados foi realizada separadamente para cada área, e dentro de cada área separada por propriedade do solo (química, física e microbiológica).

A redução dos dados para as propriedades químicas foi realizada no conjunto de 12 variáveis (pH_{H2O}, pH_{KCL}, CO, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, SB, CTC, V%); as propriedades físicas para 7 variáveis (areia, silte, argila, silte/argila, PT, Ds, DMP); e para as propriedades microbiológicas 4 variáveis (C-CO₂, CBM, qCO₂, qMIC). As variáveis físicas e microbiológicas foram integralizadas no CMD com base na ACP e na literatura, pois nem todas as variáveis que tiveram alta contribuição entraram no conjunto.

Foi realizada uma análise de correlação com a finalidade de eliminar informações redundantes no CMD. As variáveis com grau de correlação $\geq 5,00$ foram consideradas redundantes, desta forma a escolha entre as variáveis correlacionadas foi baseada na praticidade de coleta e custos de análise.

Por causa das diferentes unidades dos indicadores analisados foi necessária a utilização de escores para cada indicador. O escore foi estabelecido a partir de funções de pontuação linear, variando de 0 a 1, para os indicadores incluídos no CMD, a partir da aplicação de "mais é melhor", ou "menos é melhor". As equações 10 e 11 foram usadas para as pontuações lineares "mais é melhor" e "menos é melhor", respectivamente:

$$Si = \frac{X-L}{H-L} \quad (10)$$

$$Si = \frac{1-(X-L)}{H-L} \quad (11)$$

Onde, Si: escore linear da variável (0-1), X: média dos dados da variável, L: valor mínimo, H: valor máximo.

As pontuações dos indicadores foram integradas no índice de qualidade do solo (ANDREWS et al., 2002), calculado pela equação 12:

$$IQS = \sum_{i=1}^n WiSi \quad (12)$$

Onde, Si: escore do indicador, n: número de variáveis integradas no índice, Wi: valor de pesagem dos indicadores. Os pesos dos indicadores foram determinados através do peso de

cada variável dentro da CP dividido pela porcentagem de variância acumulada da CP. Os valores de IQS variam de 0 a 1, valores altos indicaram melhor qualidade do solo (NGO-MBOGBA et al., 2015).

2.2.7 Análises dos dados

Foi realizada a estatística descritiva das propriedades químicas, físicas e microbiológicas. A ACP foi usada a fim de verificar quais variáveis influenciaram mais em cada propriedade do solo e qual a interação entre elas nos solos sob cacauzeiros nativos. Além disso, a ACP foi utilizada para selecionar os indicadores mais relevantes objetivando compor o CMD. Para as propriedades químicas a ACP foi aplicada a uma matriz de 58 pontos amostrais e doze propriedades, para as propriedades físicas a uma matriz 30 pontos amostrais e sete variáveis, para as microbiológicas cinco pontos amostrais e quatro variáveis nos solos S_T (ilha do Tatuoca), S_C (ilha do Combu) e S_P (Comunidade Pacajá).

A análise de correlação de Pearson foi empregada a fim de revelar a interação entre o carbono orgânico e as outras variáveis estudadas. Além disso, a correlação foi utilizada para eliminar variáveis redundantes do CMD.

As análises de correlações de Pearson e o ajuste da curva de retenção de água pelo modelo duplo exponencial (DEXTER et al., 2008a) foram realizadas utilizando o software R 3.6.0. A confecção das curvas de retenção foi realizada utilizando o Origin 8.0.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Propriedades químicas

Os resultados que refletem a fertilidade dos solos sob cacauzeiros nativos estão na tabela 2. Os solos de ilhas (S_T e S_C) apresentaram menores valores médios de pH em água e KCl, carbono orgânico (CO) e fósforo (P) em relação ao solo da comunidade Pacajá (S_P). O conteúdo de nutrientes nos três solos estudados mostra ampla distribuição e alta variação dentro de cada área. E ainda, apresentam saturação por bases > 50% na camada superficial.

Tabela 2 - Estatística descritiva das propriedades químicas dos solos sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará (n = 58). Profundidade: 0-0,10 m.

	pH		CO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	
	H ₂ O	KCl	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----								%
S_T (Ilha de Tatuoca)													
Mínimo	4,94	3,77	7,08	0,45	0,16	3,00	0,40	0,10	3,89	6,24	12,40	48,76	
Máximo	6,34	5,57	34,64	6,39	0,35	14,60	17,40	2,60	7,11	24,71	29,71	83,17	
Média	5,43	4,27	19,07	2,39	0,26	6,37	5,46	0,72	5,90	12,10	18,00	66,04	
DP	0,23	0,30	6,54	1,25	0,05	2,33	3,47	0,60	0,75	3,75	3,71	7,26	
CV (%)	4,29	7,07	34,40	52,58	17,29	36,48	63,56	82,92	12,68	34,00	20,59	10,99	
S_C (Ilha do Combu)													
Mínimo	4,86	3,52	6,17	2,11	0,08	2,50	2,50	0,10	2,11	6,64	10,96	49,09	
Máximo	5,83	5,01	31,63	16,80	0,38	7,10	8,00	2,40	8,22	15,29	18,40	84,99	
Média	5,29	3,93	20,67	7,00	0,17	4,36	4,60	0,68	5,49	9,12	14,64	62,37	
DP	0,18	0,32	5,97	3,00	0,06	1,02	1,01	0,44	1,28	1,66	1,65	7,75	
CV (%)	3,40	8,21	28,89	42,89	32,50	23,36	21,92	65,23	23,41	18,15	11,28	12,43	
S_P (Comunidade Pacajá)													
Mínimo	4,87	3,80	8,96	0,62	0,02	1,50	0,20	0,10	0,11	2,58	9,13	28,31	
Máximo	8,35	7,81	59,19	3002,08	0,20	24,00	4,00	0,90	7,56	26,59	27,83	99,46	
Média	6,42	5,54	27,74	337,15	0,07	10,86	1,61	0,21	3,94	12,54	16,49	72,78	
DP	0,95	1,12	11,17	773,98	0,03	5,74	0,96	0,19	2,29	5,71	4,23	18,00	
CV (%)	14,81	20,12	40,28	229,56	53,07	52,81	59,81	88,02	58,05	45,43	25,68	24,73	

Onde, CO: carbono orgânico, H+Al: acidez potencial, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca de cátions, V%: saturação por bases, DP: desvio padrão, CV: coeficiente de variação.

Nos solos S_T, S_C e S_P, as componentes principais um e dois explicaram 55,72%, 62,37% e 73,74% da variância acumulada, respectivamente (Tabela 3). A CP1 do solo S_T apresentou a SB (0,91), CTC (0,85) e V% (0,91) como propriedades de maior contribuição e a CP2 o pH_{H2O} (-0,72), pH_{KCl} (-0,53) e CTC (0,48). No solo S_C a CP1 teve maiores contribuições do pH_{KCl} (0,71), Ca (0,83), Al (-0,74), SB (0,91) e V% (0,91) e CP2 do pH_{H2O} (-0,71), K (0,64), H+Al (0,58) e CTC (0,83). Para o S_P as variáveis químicas com maiores contribuições na CP1 foram pH_{H2O} (0,97), pH_{KCl} (0,97), Ca (0,97), SB (0,98) e V% (0,95), e na CP2, K (0,72) e Mg (0,78) (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise de componentes principais das propriedades químicas dos solos S_T, S_C e S_P sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará.

Áreas	S _T (Ilha do Tatuoca)		S _C (Ilha do Combu)		S _P (Com. Pacajá)	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
Estatística das variáveis	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
Autovalores	4,55	2,13	4,75	2,74	7,47	1,38
Porcentagem de variância	37,94	17,78	39,57	22,80	62,26	11,48
Porcentagem de variação acumulada	37,94	55,72	39,57	62,37	62,26	73,74
pH _{H₂O}	0,35	-0,72	0,12	-0,71	0,97	-0,05
pH _{KCl}	0,58	-0,53	0,71	-0,45	0,97	-0,08
CO	0,45	0,4	0,51	0,26	0,72	0,3
P	0,53	-0,19	0,25	-0,03	0,71	0,01
K	-0,04	0,27	0,02	0,64	0,13	0,72
Ca	0,58	-0,07	0,83	0,14	0,97	-0,07
Mg	0,6	0,43	0,66	0,45	0,04	0,78
Al	-0,66	0,39	-0,74	0,36	-0,53	0,31
H+Al	-0,33	0,6	-0,65	0,58	-0,86	0,11
SB	0,91	0,35	0,91	0,38	0,98	0,07
CTC	0,85	0,48	0,41	0,83	0,86	0,15
V	0,91	0,03	0,91	-0,21	0,95	-0,1

Onde, CO: carbono orgânico, H+Al: acidez potencial, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca de cátions, V%: saturação por bases, CP: Componente principal.

Os valores médios de pH em todos os solos estudados foram ácidos, sendo o pH (H₂O e KCl) mais elevado no solo S_P. A soma de bases teve alta contribuição na variância dos três solos (Tabela 3), os quais apresentaram elevadas concentrações de Ca²⁺, sendo o maior valor médio (10,86 cmol_c dm⁻³) e a maior dispersão encontrado no solo S_P (Tabela 2); a maior concentração média de Mg²⁺ foi no solo S_T (5,46 cmol_c dm⁻³) e a menor em S_P (1,61 cmol_c dm⁻³); o conteúdo de K⁺ apresentou a menor dispersão nos três solos em relação as outras variáveis químicas, e o menor valor de K⁺ (0,07 cmol_c dm⁻³) foi encontrado no solo S_P. As bases apresentaram alta contribuição no complexo de troca do solo S_T e S_C, mesmo o H⁺ ocupando 28,78% e 32,93% da CTC, respectivamente.

A matéria orgânica é a principal responsável pela fertilização de camadas superficiais dos solos de áreas nativas (DELARMELINDA et al., 2017). O Ca²⁺, é o nutriente constituinte da parede celular dos vegetais (THOR, 2019), o K⁺ é abundante nos tecidos vegetais com funções energéticas, abertura e fechamento estomático e absorção de água pelas células (FORSTER et al., 2019), e o Mg²⁺ é o elemento principal da molécula de clorofila (STREIT et al., 2005). Estes nutrientes retornam ao solo através de folhas e galhos, os quais sofrem a ação dos microrganismos para a mineralização e disponibilidade às plantas (DELARMELINDA et al., 2017). No solo S_T após o período de inundações o Ca²⁺ pode ser depositado através da água do rio Tocantins, que possui pH neutro e alto teor desse nutriente (JUNK; MELLO, 1990), o qual chega a água dos rios através da dissolução de rochas calcárias ou pelo lançamento de efluentes (MIRAYA et al., 2018; YOUNAS et al., 2017).

O valor de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ do solo S_P favoreceu os cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) no complexo de troca (MALAVOLTA, 1987), com elevada a SB, neste solo a alta concentração de Ca^{2+} está relacionado a presença de conchas em alguns pontos de coletas, porque as conchas apresentam até 98% carbonatos de cálcio – CaCO_3 , na forma de calcita ou aragonita em sua composição (VALENTE; COSTA, 2017; BEZERRA et al., 2011; YAO et al., 2014). O carbonato de cálcio é responsável por neutralizar o H^+ e aumentar as concentrações de Ca^{2+} e outras bases no complexo de troca, bem como diminui a influência do Al no solo (DE CARVALHO et al., 2018). O aparecimento de conchas é comum em áreas fluviais e estuários (LOPES et al., 2007). Corroborando com os estudos realizados por Teixeira et al. (2012) em área de sambaqui fluvial, onde encontraram alta concentração de Ca^{2+} ($19,68 \text{ cmol}_\text{c} \text{ dm}^{-3}$) na camada superficial do solo.

No solo S_P o baixo conteúdo de K^+ ocorre por causa da alta mobilidade deste nutriente no solo, o qual pode ser facilmente perdido por lixiviação e percolação, principalmente em ambientes com predomínio de Ca^{2+} e Mg^{2+} , pois os cátions bivalentes são atraídos com mais força pelo complexo de troca. A textura franca do solo S_P também favoreceu o baixo conteúdo de K^+ , devido a maior proporção da areia (49,85%). As partículas do solo com grande área de superfície específica aumentam a lixiviação de K^+ , principalmente em regiões com fortes chuvas, como na comunidade Pacajá (solo S_P), corroborando com Ye et al. (2019).

Os altos valores de SB indicam que os solos nativos são enriquecidos com cátions através da matéria orgânica na camada superficial do solo (DELARMELINDA et al., 2017), confirmado por correlação positiva entre CO e SB (0,55, $p < 0,05$), CO e CTC (0,613, $p < 0,001$), CO e V% (0,369, $p < 0,05$) no solo S_T .

No período de cheias dos rios os solos S_T e S_C são alagados, e por ocasião da vazante são depositados sedimentos orgânicos e minerais em superfície (DE ALMEIDA et al., 2004; CHEN et al., 2010). Quando o solo é reoxidado os microrganismos ficam mais eficientes na mineralização da matéria orgânica (DHALIWAL et al., 2019; KLEBER et al., 2015), assim, os cátions básicos são facilmente ligados aos colóides do solo, devido à baixa permeabilidade da água e maior capacidade tampão induzida pela saturação por cátions (MATSCHULLAT et al., 2018), o que aumenta a fertilidade do solo e o crescimento das plantas do ambiente (DAVIDSON; JANSSENS, 2006).

O pH mais ácido no solo S_C é decorrente do processo de ferrólise, comum em solos sujeitos ao hidromorfismo e ricos em ferro (VAN BREEMEN; BUURMAN, 2002). Nestas condições ocorre a segregação do Fe^{+3} (DELARMELINDA et al., 2017) e a alta concentração de Fe^{2+} dissolvido faz os cátions básicos sair do complexo de troca e ir para a solução do solo,

sendo facilmente perdidos (BARBIERO et al., 2010). Quando ocorre a aeração do solo, o Fe^{2+} é oxidado à Fe^{+3} insolúvel, nesta etapa acontece a produção de H^+ , o qual compete com as bases que restaram no solo por complexos de troca (VAN BREEMEN; BUURMAN, 2002; CORINGA et al., 2012).

Alguns estudos têm verificado elevada acidez em horizontes superficiais nos solos de várzea em decorrência da ferrólise (CORINGA et al., 2012; DA SILVA et al., 2019). Estudos em Gleissolo sob vegetação nativa as margens do rio Guamá, atestaram pH ácido em água e KCl associado ao movimento de enchente e vazante do rio (LOPES et al., 2006). Estes resultados corroboram com os resultados da ACP obtida neste estudo, a qual, mostra o antagonismo entre a soma de bases e CTC com Al e H+Al nos solos S_T e S_C (Tabela 3).

Outra fonte de H^+ em solos nativos é a produção de ácidos orgânicos proveniente da decomposição de matéria orgânica, exsudação das raízes e metabolismo dos microrganismos (SHARMA et al., 2013; KIMURA et al., 2017; BOLDT-BURISCH et al., 2019).

A concentração média de P disponível foi baixa nos solos da ilha do Tatuoca (S_T) e Combu (S_C), porém no solo S_P esta variável apresentou alta dispersão, variando de 0,62 a 3002,08 mg dm^{-3} (Tabela 1). Os baixos conteúdos de P em S_T e S_C estão associados a adsorção deste nutriente a superfície dos óxidos de Fe, Mn e Al (FERNANDES, 2006; IGWE et al., 2010).

A alta concentração de P no solo S_P tem grande contribuição da matéria orgânica, porque o P orgânico representa um quarto do P total (SOLTANGHEISI, et al., 2019), o que é confirmado pela correlação positiva entre P e CO em S_P (0,383, $p < 0,01$), e concorda com os resultados de Fonte et al. (2014). As cochas e os fragmentos cerâmicos também são responsáveis pela alta concentração de P neste solo, porque apresentam P_2O_5 e fosfatos de alumínio amorfos em sua composição (VALENTE; COSTA, 2017). Nas amostras de S_P não foi possível separar as conchas do solo no peneiramento. Em solos antropogênicos na Amazônia a microapatita biogênica na forma de ossos e espinhas de peixes é fonte primária de P e Ca (LIMA et al., 2009), além dos fragmentos de vasos cerâmicos, onde o P foi incorporado através dos alimentos ricos em gorduras preparados nestes recipientes (VALENTE; COSTA, 2017). Estudos de Da Silveira et al. (2011) em solo antropogênico na Amazônia revelam os principais minerais que compõe o solo, quartzo, matéria orgânica, e predomínio de SiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 e MnO_2 .

As características químicas dos três solos estudados estão fortemente associadas a relação solo-paisagem e os diferentes materiais que compõe a serapilheira em cada ambiente. A matéria orgânica constituir de 1% a 5% em volume de sólidos nos horizontes superiores do

solo, sendo responsável por melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (WOLINSKA; STEPNIEWSKA, 2013). Em nosso estudo a porcentagem de M.O é acima de 5% com base no valor de CO dos solos sob cacauzeiros nativos.

Comparando os resultados encontrados com a faixa de concentração de nutrientes listada por Cravo et al. (2007), para os solos do estado do Pará, é possível constatar a boa fertilidade dos três solos e a capacidade de fornecer nutrientes para o cacauzeiro nativo (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores médios de P, K, Ca, Mg e Al dos solos S_T, S_C e S_P comparados a classe de interpretação listada por Cravo et al., 2007.

Nutrientes	S _T (Ilha de Tatuoca)	S _C (Ilha do Combu)	S _P (Comunidade Pacajá)	Cravo et al., 2007
P (mg dm ⁻³)	2,39	7,00	337,15	≤8.00 (Baixo) / >20.00 (Alto)
K (cmol _c dm ⁻³)	0,26	0,17	0,07	≤0.10 (Baixo) / >0.23 (Alto)
Ca (cmol _c dm ⁻³)	6,37	4,36	10,86	≤1.00 (Baixo) / >3.50 (Alto)
Mg (cmol _c dm ⁻³)	5,46	4,60	1,61	≤0.50 (Baixo) / >1.5 (Alto)
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,72	0,68	0,21	≤0.30 (Baixo) / >1.0 (Alto)

A interpretação para os teores de P foi baseada na porcentagem de argila presente em cada solo (35,16%, 24,96%, 20,43% de argila em S_T, S_C e S_P, respectivamente), seguindo a recomendação do autor de referência.

2.3.2 Propriedades físicas

As classes texturais dos solos S_T, S_C e S_P, foram franco argilo siltosa, franco siltosa e franca, respectivamente. Os solos S_T e S_C apresentaram maior proporção de silte em relação as outras frações, com relação silte/argila 2,45 e 2,90 g kg⁻¹, respectivamente. No entanto, em S_P houve maior contribuição de areia e a relação silte/argila foi menor, 1,54 g kg⁻¹ (Tabela 5).

Tabela 5 - Classificação textural dos solos de áreas de cacauzeiros nativos localizadas em três municípios do estado do Pará (n = 58). Profundidade: 0-0,10 m.

Áreas	Areia	Argila	Silte	Silte/Argila	Classe textural
	-----g kg ⁻¹ -----				
S _T (Ilha de Tatuoca)	89,42	351,63	559,80	2,45	Franco argilo siltosa
S _C (Ilha do Combu)	73,21	249,66	677,12	2,90	Franco siltosa
S _P (Comunidade Pacajá)	498,48	204,39	297,11	1,54	Franca

Os solos S_T e S_C são inundados por ocasião das cheias, por isso, recebem partículas finas, que são deslocadas ao longo dos rios provenientes e erosões nas margens. Estas partículas são sedimentadas na parte mais baixa da paisagem, induzindo alterações na textura e culminando em solos mais siltosos (WANG et al., 2017). Outros estudos evidenciaram o

predomínio de silte e alta relação silte/argila em solos de várzea (DANIEL et al., 2017; DE FREITAS et al., 2015).

Esta distribuição de partículas revela a origem sedimentar recente das partículas minerais que compõe os solos de várzea, salientando um menor grau de desenvolvimento destes solos (GUIMARÃES et al., 2013), porque as variações periódicas do regime hídrico mantém a oscilação do lençol freático, o qual permanece próximo a superfície e assim impede o desenvolvimento do solo (SANTOS et al., 2018).

Os ajustes das curvas de retenção de água no solo (CRA) pelo modelo duplo exponencial (DEXTER et al., 2008a), apresentaram $R^2 \geq 0,88$ para S_T , S_C e S_P (Tabela 6). Os maiores conteúdos de água residual foram obtidos nos solos S_T e S_C (Figura 7A, 7C), como indicado pelo parâmetro C da tabela 6. Isto está relacionado ao maior conteúdo de silte e argila nestes solos, uma vez que em S_T o conteúdo de silte e a argila representam, 55,98% e 35,16%, respectivamente e em S_C , 67,71% e 24,97%, respectivamente. Comportamento distinto ocorreu na CRA de S_P (Figura 7E), a qual mostrou menor conteúdo de água residual, que está relacionado à maior contribuição da fração areia (49,85%). Estes resultados concordam com os obtidos por Dexter et al. (2012) que observaram conteúdos de água residual (parâmetro C) maiores para solos com predominância das frações argila e silte quando comparados à solos arenosos.

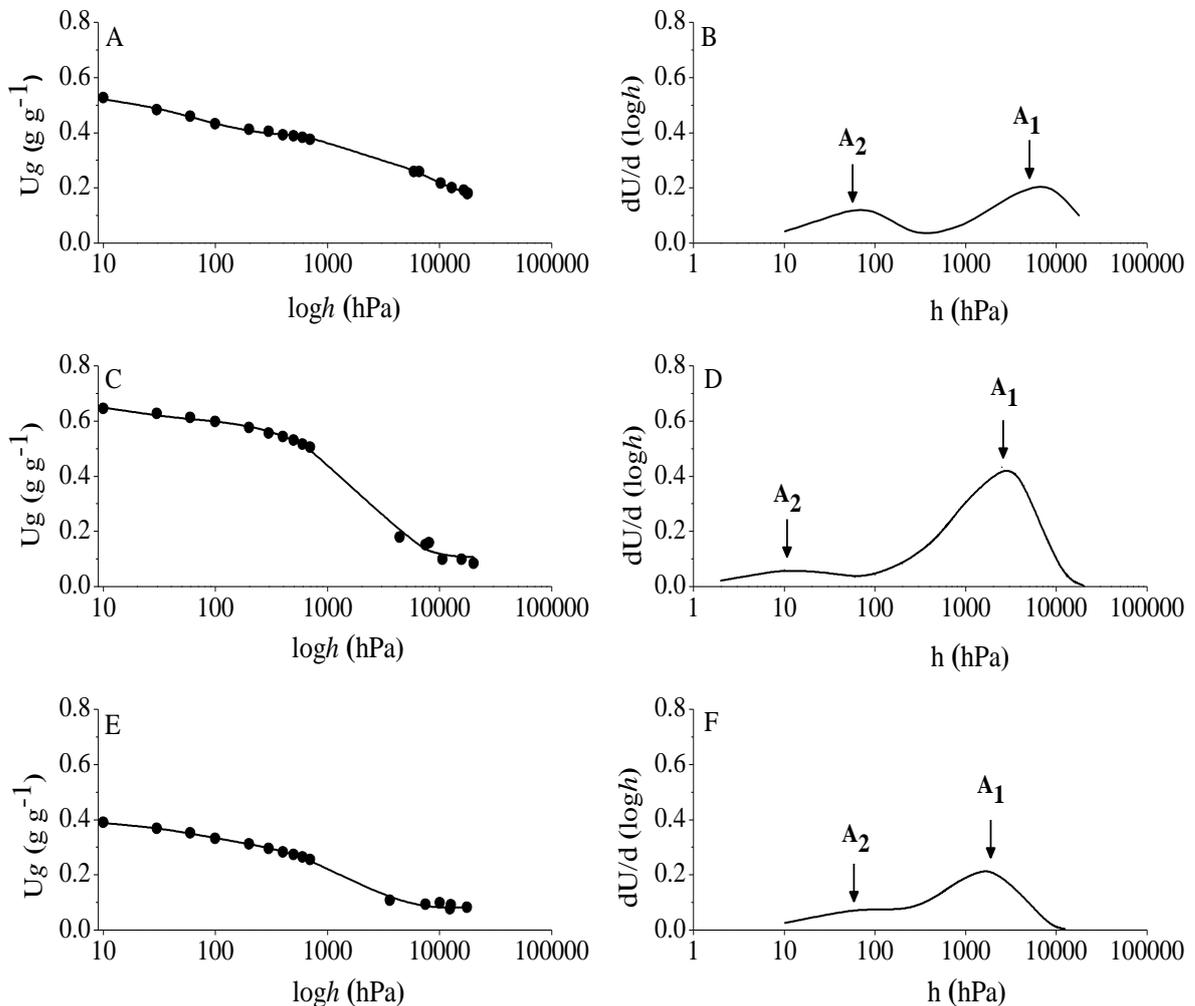
Tabela 6 - Valores de R^2 , parâmetros ajustados da equação duplo exponencial de retenção de água, obtidos dos solos sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará (n = 30). Profundidade: 0-0,10 m.

Solos	R^2	C	A_1	h_1	A_2	h_2
		$g\ g^{-1}$	$g\ g^{-1}$	hPa	$g\ g^{-1}$	hPa
S_T (Ilha do Tatuoca)	0,88	0,17	0,24	6536,00	0,13	65,22
S_C (Ilha do Combu)	0,99	0,11	0,51	2591,00	0,07	13,16
S_P (Comunidade Pacajá)	0,99	0,08	0,26	1714,00	0,06	54,56

Onde, C: conteúdo de água residual, A_1 e A_2 : porosidade textural e estrutural, respectivamente; h_1 e h_2 : potenciais matriciais responsáveis por esvaziar os poros texturais e estruturais, respectivamente.

Em baixos potenciais matriciais (< -10.000 hPa) a água no solo é retida principalmente por forças adsorptivas, permanecendo na forma de finos filmes de água adsorvidos a superfície das partículas do solo (TULLER; OR, 1999). Estudos de Schneider e Goss (2011) e Arthur et al. (2012) indicaram que os processos de adsorção da água no solo estão diretamente relacionados à superfície de contato das partículas do solo, assim, a predominância de partículas de menor tamanho e, conseqüentemente, com maiores áreas superficiais específicas, apresentam forte influência nos processos de adsorção, refletindo em maiores conteúdos de água residual.

Figura 7 - Curva de retenção de água no solo (CRA) e distribuição do tamanho dos poros ($d\delta/d(\log h)$) em função do potencial matricial dos solos S_T (A e B), S_C (C e D) e S_P (E e F), sob cacauzeiros nativos localizadas em três municípios do estado do Pará ($n = 30$). Profundidade: 0-0,10 m.



Onde, U_g : umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$), A_1 e A_2 : nos gráficos B, D e F mostram os picos referentes a porosidade textural e estrutural ($g\ g^{-1}$), respectivamente, S_T , S_C , S_P : solos da Ilha do Tatuoca, ilha do Combu, Comunidade Pacajá, respectivamente.

A CRA do solo S_P , que teve predomínio da fração areia, apresentou, em sua faixa mais seca, pouca variação no conteúdo de água (Figura 7E). Estas observações estão relacionadas à baixa condutividade hidráulica dos solos com predomínio da fração areia em baixos potenciais matriciais que resultam em processos de transporte de água menos significativos, mesmo que ocorra um incremento nas pressões aplicadas.

Os parâmetros h_1 e h_2 são modificados de acordo com a textura e tamanho dos poros do solo, por isso no solo S_C , com maior conteúdo de silte houve menor potencial h_2 , responsável pela sucção de poros estruturais, estes poros foram em pouca quantidade e apresentaram maior diâmetro efetivo estrutural ($\delta_2 = 227,96\ \mu m$), por isso a drenagem dos

mesmos ocorreu logo após o potencial 10 hPa, o qual foi considerado como ponto inicial de equilíbrio, em que todos os poros do solo estariam preenchidos com água.

A curva de distribuição do tamanho dos poros (DTP) apresentou a distribuição bimodal, com maiores picos referentes à porosidade textural (indicada pelo parâmetro A_1) (Figura 7B, 7D, 7F) nos três solos estudados, confirmado pelos parâmetros $h_1 \neq h_2$ (Tabela 7). A CRA do solo S_C apresentou maior inclinação, demonstrando acentuada distinção entre o espaço poroso textural e estrutural na DTP, observado na figura 7D.

A DTP é fortemente influenciada pela distribuição de partículas do solo. Assim assumindo que todas as partículas são esféricas e que o aumento do tamanho das mesmas é proporcional ao aumento do espaço poroso entre elas, solos com predomínio de partículas finas apresentaram poros de tamanho menor e, portanto, maior expressão do porosidade textural na DTP (DEXTER et al., 2008b).

Os parâmetros da equação duplo exponencial estão associados a distribuição de poros, sendo o parâmetro C equivalente a porosidade residual, que é influenciado pelo conteúdo de argila; A_1 equivale a porosidade textural, influenciada pelo silte e A_2 corresponde a porosidade estrutural, o qual é associado ao conteúdo de areia (DING et al., 2016), ou seja, em solos siltosos o parâmetro A_1 apresenta valor mais elevado, o que é consistente com os nossos resultados em S_C .

Para o solo S_P , a porosidade textural foi maior do que a estrutural mesmo a fração areia contribuindo com 49,85% das partículas. Isto está associado a contribuição das frações silte + argila, carbono orgânico (DEXTER et al., 2008a), capacidade de troca de cátions (DE FREITAS et al., 2014), e a densidade do solo (SEQUEIRA et al., 2014), porque a distribuição de tamanho dos poros no solo não é apenas influenciada pela distribuição do tamanho das partículas.

A razão de vazios equivalente aos poros texturais (e_{textural}) e residuais (e_{residual}) correspondem a microporosidade do solo e somadas foram maiores que a $e_{\text{estrutural}}$, evidenciando que a maior parte da porosidade total dos solos sob cacaueiros nativos é composta pela microporosidade. A razão de vazios total dos solos apresentou $e_{\text{total}} > 1,00 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que configura solos com maior quantidade de poros do que sólidos (Tabela 7), isso é inerente a estes solos que possuem baixa intervenção antrópica através do manejo.

Tabela 7 - Razões de vazios equivalentes aos poros residual (e_{residual}), textural (e_{textural}), estrutural ($e_{\text{estrutural}}$), totais (e_{total}), porosidade total (PT), diâmetro efetivo textural (δ_1) e estrutural (δ_2), densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp) e diâmetro médio ponderado (DMP) de solos sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará (n = 30). Profundidade: 0-0,10 m.

Solos	e_{residual}	e_{textural}	$e_{\text{estrutural}}$	e_{total}	PT	δ_1	δ_2	Ds	Dp	DMP
	-----cm ³ cm ⁻³ -----					-----µm-----		---g cm ⁻³ ---		mm
S _T (Ilha do Tatuoca)	0,40	0,48	0,32	1,32	0,56	0,46	46,00	1,07	2,45	5,12
S _C (Ilha do Combu)	0,27	1,28	0,17	1,73	0,61	1,16	227,96	0,99	2,51	4,93
S _P (Comunidade Pacajá)	0,21	0,65	0,16	1,02	0,53	1,75	54,99	1,21	2,55	5,26

Os três solos apresentaram diâmetro efetivo textural no tamanho de ultramicroporos (0,1 e 5 µm) (Tabela 7). O predomínio de ultramicroporos contribui para a manutenção de serviços ecossistêmicos através da mitigação da rotação do carbono, permitindo maior estoque de carbono no solo (SIMONETTI et al., 2017), porque os poros muito pequenos protegem um conjunto de carbonos específicos em diferentes frações de agregados, resultando em inacessibilidade dos microrganismos ao espaço poroso (VON LÜTZOW et al., 2006; BRADY; WEIL, 2013). Piccoli et al. (2017) verificaram em solos siltosos o acúmulo de carbono, e relacionaram isto a formação de poros <5 µm, confirmando pesquisas anteriores na mesma região (LUGATO et al., 2009; SIMONETTI et al., 2017).

Estudos em solos siltosos de área nativa, sujeitos a alagamento, na Planície de Veneto mostraram o maior predomínio da microporosidade (0,0074 a 30 µm), contribuindo com 82% da porosidade total (PICCOLI et al., 2017), reafirmando os resultados anteriores de Dal Ferro et al. (2012) na mesma região e corroborando com os resultados encontrados neste estudo para os solos das ilhas (S_T e S_C).

O valor do diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água dos solos S_T, S_C e S_P foi >4,76 mm (tabela 7), assim ocorreu maior frequência de agregados grandes estáveis em água, característico de áreas que não sofrem perturbação de manejo, apresentam vegetação diversa e cobertura morta (EWANE; LEE, 2016; HONDEBRINK et al., 2017), e que mesmo sofrendo inundação não apresentam elevada perda de solo por erosão. Além disso, esses solos apresentam densidade do solo – Ds média <1,22 g cm⁻³, a qual é inerente as classes texturais com maior contribuição de silte+argila e matéria orgânica. Além das práticas de manejo são reduzidas e realizadas manualmente, sendo a colheita a principal atividade que ocorre em área de cacauzeiro nativo.

As correlações positivas entre CO e argila (0,364; $p < 0,05$), CO e silte (0,376; $p < 0,05$) no solo S_T e CO e argila (0,403; $p < 0,05$) em S_P indicam que a interação das partículas do solo com a matéria orgânica contribui para a agregação. Os macroagregados são positivamente atrelados ao conteúdo de argila e negativamente ao conteúdo de areia (DE GRYZE et al., 2010). Porque as partículas coloidais se agregam com mais facilidade permitindo a drenagem

entre agregados, enquanto o espaço poroso intra-agregado permanece praticamente saturado (CHEN et al., 2017). Somado a isto os compostos cimentantes da M.O promovem a estabilização da estrutura do solo (MAIA et al., 2007).

Os solos com predomínio de silte apresentam baixa pegajosidade, plasticidade (BRADY; WEIL, 2013) e agregação (PICCOLI et al., 2017). Apesar disso, no solo S_C a porcentagem de argila (24,97%) e M.O (35,64%) favoreceram a estabilização da estrutura do solo, concordando com Piccoli et al. (2017). Xiang et al. (2015) estudando solos de florestas nativas comprovaram a influência do carbono orgânico total no predomínio de magroagregados >2 mm, bem como Liu et al. (2020) revelaram que a quantidade de macroagregados no solo está positivamente atrelado ao conteúdo de argila e CO.

Na análise de componentes principais do solo S_T, S_C e S_P, a porcentagem de variância acumulada pelas CP1 e CP2 explicaram 65,75%, 63,63% e 62,74% da variação, respectivamente. O solo S_T apresentou o conteúdo de argila (-0,82), silte (0,94), silte/argila (0,67) e PT (-0,58) como variáveis de maior contribuição e a CP2 explicou 26,93% da variação com a relação silte/argila (0,61), PT (0,74) e Ds (-0,73) com a maior contribuição (Tabela 8).

Tabela 8 - Análise de componentes principais das propriedades físicas dos solos S_T, S_C e S_P sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará.

Áreas	S _T (Ilha do Tatuoca)		S _C (Ilha do Combu)		S _P (Com. Pacajá)	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
Estatística das variáveis						
Autovalores	2,72	1,89	2,57	1,88	2,44	1,95
Porcentagem de variância	38,82	26,93	36,75	26,89	34,85	27,89
Porcentagem de variação acumulada	38,82	65,75	36,75	63,63	34,85	62,74
Areia	-0,32	0,29	0,11	0,92	-0,66	0,64
Argila	-0,82	-0,42	-0,82	-0,51	-0,21	-0,48
Silte	0,94	0,23	0,59	-0,58	0,87	-0,48
Silte/Argila	0,67	0,61	0,85	0,23	0,79	-0,01
DMP	0,19	-0,36	0,24	0,3	0,49	0,32
PT	-0,58	0,74	0,69	-0,28	-0,4	-0,69
Ds	0,5	-0,73	-0,54	0,47	0,42	0,72

Onde, DMP: Diâmetro médio ponderado, PT: Porosidade total, Ds: Densidade do solo, CP: Componente principal.

No solo S_C a CP1 apresentou argila (-0,82), silte (0,59), silte/argila (0,85), PT (0,69) e Ds (-0,54) como variáveis de maior contribuição, a CP2 contribuiu com 26,92% da variação total e apresentou a areia (0,92), argila (-0,51), silte (-0,58) e Ds (0,47) como variáveis de maior contribuição. E para o solo S_P a CP1 teve areia (-0,66), silte (0,87) e silte/argila (0,79) com as maiores contribuições e a CP2 areia (0,64), argila (-0,48), silte (-0,48), PT (-0,69) e Ds (0,72) com as maiores contribuições na variação do solo (Tabela 8).

A partir da análise multivariada é possível reafirmar a contribuição das partículas do solo para a estabilidade de agregados, menor Ds e aumento da PT dos solos estudados. Nos três solos o conteúdo de silte e silte/argila interagiram positivamente com a PT e indicavam a diminuição da Ds. Solos com predomínio de partículas menores apresentam menor Ds, porque as mesmas tendem a se organizar em unidades estruturais porosas, principalmente quando há adequado teor de matéria orgânica (BRADY; WEIL, 2013).

Os solos que são bem estruturados apresentam estruturas hierárquicas separadas, e seu espaço poroso é segregado entre os poros texturais, que existem entre as partículas do solo e os poros estruturais, que se encontram entre agregados (ZHOU et al., 2017), tendo em vista que os poros texturais atuam na maior retenção e disponibilidade de água às plantas, e em contrapartida, os poros estruturais abrigam os organismos do solo, que atuam na decomposição e ciclagem do material orgânico, operam na aeração, movimentação e drenagem da água no solo (DEXTER et al., 2008b).

2.3.3 Propriedades microbiológicas

A respiração basal (C-CO₂) apresentou menor coeficiente de variação em relação ao carbono da biomassa microbiana (CBM) nos três solos caracterizados e foi observado uma taxa de C-CO₂ muito superior ao CBM no solo S_C (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores médios de respiração basal (C-CO₂), carbono da biomassa microbiana (CBM), quociente metabólico (*q*CO₂) e quociente microbiano (*q*MIC) de solos S_T, S_C e S_P sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará (n = 5). Profundidade: 0-0,10 m.

	C-CO₂ mg CO ₂ kg ⁻¹	CBM mg kg ⁻¹	<i>q</i>CO₂ mg kg ⁻¹	<i>q</i>MIC %
S _T (Ilha de Tatuoca)				
Mínimo	85,03	61,82	0,32	0,46
Máximo	128,45	263,84	1,69	1,27
Média	107,71	141,45	0,97	0,75
Desvio padrão	16,68	69,00	0,45	0,32
CV (%)	15,48	48,78	46,07	42,90
S _C (Ilha do Combu)				
Mínimo	92,27	7,27	1,81	0,03
Máximo	121,22	50,91	13,68	0,44
Média	100,47	25,09	6,10	0,19
Desvio padrão	12,01	14,74	4,22	0,16
CV (%)	11,96	58,76	69,06	83,88
S _P (Comunidade Pacajá)				
Mínimo	79,15	76,36	0,54	0,22
Máximo	157,40	272,73	2,06	0,62
Média	116,53	121,45	1,17	0,36
Desvio padrão	34,05	75,87	0,50	0,16
CV (%)	29,22	62,47	42,76	43,68

Onde, S_T, S_C e S_P: solos da ilha do Tatuoca, ilha do Combu e Comunidade Pacajá, respectivamente, CV: Coeficiente de variação.

As CP1 e CP2 dos solos S_T, S_C e S_P explicaram 88,66%, 87,74% e 96,36% da variação total, respectivamente (Tabela 10). As variáveis de maiores contribuições na CP1 e CP2 dos três solos foram C-CO₂ e CBM. Em todos os solos o autovetor do CBM foi positivo e a C-CO₂ foi negativo, exceto em S_P, indicando que quanto mais elevada a taxa de respiração microbiana, menor é CBM. Esse comportamento da microbiota do solo é comum em região quente e úmida, onde a umidade do solo é abundante e a decomposição da matéria orgânica e liberação de nutrientes é acelerada, condicionando maiores perdas de carbono (RAMÍREZ et al., 2019).

Tabela 10 - Análise de componentes principais das propriedades microbiológicas dos solos S_T, S_C e S_P sob cacauzeiros nativos localizados em três municípios do estado do Pará.

Áreas	S _T (Ilha do Tatuoca)		S _C (Ilha do Combu)		S _P (Com. Pacajá)	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
Estatística das variáveis						
Autovalores	2,74	0,8	2,82	0,69	2,54	1,32
Porcentagem de variância	68,62	20,05	70,59	17,15	63,48	32,88
Porcentagem de variação acumulada	68,62	88,66	70,59	87,74	63,48	96,36
C-CO ₂	-0,54	0,84	-0,67	0,73	0,19	0,98
CBM	0,98	0,11	0,91	0,17	0,94	0,3
qCO ₂	-0,9	-0,25	-0,89	-0,35	-0,84	0,51
qMIC	0,83	0,15	0,86	0,03	0,95	-0,04

Onde, C-CO₂: respiração basal, CBM: Carbono da biomassa microbiano, qCO₂: quociente metabólico, qMIC: quociente microbiano, CP: Componente principal.

Os três solos apresentaram respiração basal >100,00 mg CO₂ kg⁻¹ (Tabela 10). A alta taxa de respiração microbiana significa, em curto prazo, liberação de nutrientes para as plantas em detrimento da decomposição da matéria orgânica (DE SOUZA et al., 2010). Em ambiente nativo esse comportamento é comum por causa da diversidade do material que compõe a serapilheira, que estimula alta taxa de decomposição pela ação microbiana. Além disso, o clima tropical úmido da Amazônia contribui com a alta decomposição, pois a temperatura e a precipitação possuem grande influência na respiração microbiana e dinâmica de carbono (YINGQIU et al., 2019).

A respiração basal compreende a soma de todas as funções metabólicas nas quais o CO₂ é produzido (JIA; LIU, 2017). Os fungos e bactérias são os maiores responsáveis pela liberação de CO₂ no solo. Nos solos estudados a atividade microbiana é elevada, sendo influenciada principalmente pela umidade e baixo pH do solo (RAMÍREZ et al., 2020). A baixa densidade dos solos (S_T, S_C e S_P) também favorece a respiração basal, pois a boa estrutura do solo permite alta infiltração e baixo escoamento superficial e erosão, o que reduz a perda de microrganismos do sistema (CHAO et al., 2019).

Os maiores valores de CBM foram observados em S_T e S_P (Tabela 10). Elevados valores de CBM indicam que os nutrientes ficam imobilizados temporariamente na biomassa microbiana, o que resulta em menores perdas de nutriente no sistema solo-planta (ROSCOE et al., 2006). Nas áreas sob cacaueiros nativos estudados o aumento de CBM ocorre devido as alterações na biomassa radicular, diversidade da cobertura vegetal, e deposição de matéria orgânica (QIAN et al., 2018; BISSONNAIS et al., 2018). Em áreas de pousio por 30 anos o CBM aumentou 168%, evidenciando o papel da diversidade e deposição no incremento desta variável (LI et al., 2020).

O CBM é a parte viva da M.O, mas em condições limitadas de O_2 os microrganismos aeróbicos inicialmente aumentam a atividade consumindo mais carbono e emitindo mais CO_2 , tentando se manter. Isto acontece comumente em Gleissolos e pode explicar o menor valor de CBM e a maior taxa de respiração no solo S_C , culminando no aumento de quociente metabólico – qCO_2 (DINIZ et al., 2014), o que é evidenciado pela ACP (Tabela 11). Além disso, este solo apresentou o menor pH_{KCl} . O pH desempenha papel importante na estrutura e composição microbiana em ambientes úmidos (YANG et al., 2019; RAMÍREZ et al., 2020). A baixa densidade do solo, maior conteúdo de matéria orgânica e fósforo favoreceram o aumento de comunidades microbianas em solos de áreas nativas no Cerrado, relatado no estudo de Sarto et al., (2020).

O qCO_2 é um índice que indica a razão de respiração por unidade de carbono microbiano e quando elevado pode revelar fontes de estresse no solo, que podem induzir os microrganismos ao consumo de mais carbono para sua manutenção (PARTELLI et al., 2012). Nesse sentido, a oscilação periódica do lençol freático é considerada uma fonte de estresse para a microbiota (JIA; LIU, 2017), culminando em baixo CBM e maior qCO_2 . Por outro lado, o excesso hídrico prolongado estimula o predomínio da fração lábil da M.O, composta por materiais fragmentados, uma vez que os microrganismos aeróbicos ficam inativos e os anaeróbicos são menos eficientes na decomposição (DO NASCIMENTO et al., 2009). Estudos de Frazão et al. (2010) atestaram que o aumento da umidade do solo influenciou positivamente a incorporação do CBM.

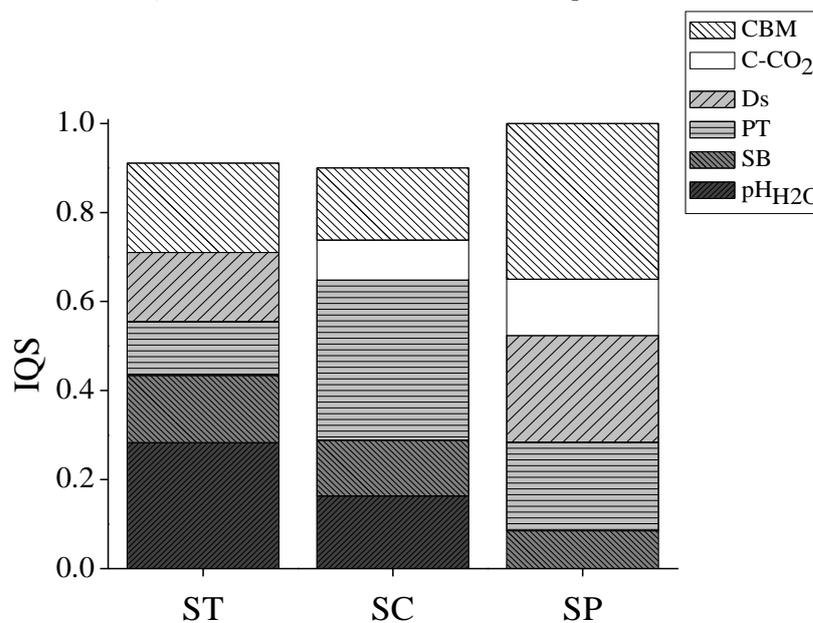
O quociente microbiano – $qMIC$ é um índice que revela a quantidade de carbono orgânico do solo imobilizado na biomassa microbiana (DUARTE et al., 2014). Os solos sob cacaueiros nativos, apresentaram valores de $qMIC < 1.00\%$, o que indica que nestes sistemas há maiores perdas de carbono. Isso é justificável devido a maior taxa de decomposição, que disponibiliza maiores quantidades de nutrientes para as plantas. Além disso, diversos fatores podem influenciar o valor de $qMIC$, como qualidade da matéria orgânica (DA SILVA et al.,

2010), umidade e temperatura. Lourente et al. (2011) associaram o valor de q_{MIC} (1,62%) em vegetação nativa aos maiores valores de carbono orgânico.

2.3.4 Indicadores e índices de qualidade do solo

A análise de componentes principais foi eficiente na redução dos indicadores em um conjunto mínimo de dados, que consistiu em pH_{H_2O} , SB, PT, Ds, CBM e C-CO₂, para integrar o índice de qualidade do solo – IQS (Figura 8). O pH_{H_2O} não integralizou o IQS em S_P e a C-CO₂ não integralizou em S_T. A variação na quantidade de indicadores integralizados foi influenciada pelas características de cada local, como a matéria orgânica, umidade e microbiota.

Figura 8 - Índice de qualidade do solo e contribuição individual dos indicadores do conjunto mínimo de dados (CMD) para os solos S_T, S_C e S_P, sob cacauzeiros nativos em três municípios do estado do Pará.



Onde, S_T, S_C, S_P: solos da ilha do Tatuoca, ilha do Combu, Comunidade Pacajá, respectivamente.

O pH_{H_2O} teve a maior contribuição no IQS do solo S_T (31,06%), seguido de CBM (22,05%). No solo S_C a maior contribuição foi da PT (39,95%), seguida de pH_{H_2O} (18,14%) e em S_P a maior contribuição foi da CBM (34,97%) acompanhada da Ds (23,98%).

A expressiva contribuição do pH_{H_2O} e SB no IQS dos solos está relacionada ao papel do pH de regular a ação dos nutrientes no complexo de troca. As bases do solo são influentes na nutrição mineral de plantas, pois o Ca²⁺ influencia na integridade da membrana plasmática e desenvolvimento da parede celular vegetal; o Mg²⁺ atua na fotossíntese, pois é o átomo central da molécula de clorofila e o K⁺ atua na ativação enzimática, abertura e fechamento dos

estômatos e controle osmótico dos tecidos, sendo crucial para a qualidade dos frutos (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

No solo Sc a microporosidade apresentou grande influência na PT. A Ds afeta a aeração e depende principalmente da estrutura do solo e classe textural, assim solos com baixa Ds estão associados a estrutura granular. A boa estruturação do solo depende da quantidade e qualidade do carbono orgânico (VAN LIER, 2010). Os valores de Ds indicam maior quantitativo de poros, o que culmina em adequado desenvolvimento radicular. Os indicadores Ds e PT revela as boas condições dos solos sob cacauzeiros nativos para aeração, fornecimento de água e crescimento vegetal. Estas variáveis são dinâmicas e podem ser alteradas pelo uso e manejo do solo.

Em ecossistemas nativos é comum a influência do CBM devido ao alto aporte de matéria orgânica (QIAN et al., 2018). O CBM revela a quantidade de carbono imobilizado na microbiota temporariamente (ROSCOE et al., 2006), desta forma cultivos convencionais podem buscar o aumento do CBM através do manejo da matéria orgânica.

O índice de qualidade do solo – IQS em cultivos de cacau é empregado para apoiar decisões fitotécnicas. Em áreas de cacauzeiros em sistemas agroflorestais os altos valores de IQS são atrelados a fertirrigação e maior CTC em solos da Bahia (ARAÚJO et al., 2018). A qualidade de solos úmidos costeiros foi influenciada pelo conteúdo de sal, carbono total e magnésio (ZHANG et al., 2016). Os limites críticos de indicadores de qualidade do solo são importantes para conservação do solo e produtividade das culturas, assim um conjunto mínimo de indicadores integralizaram o IQS em diferentes classes de solos sujeitos a inundações e evidenciaram a maior qualidade do Cambissolo (BISWAS et al., 2017).

CONCLUSÃO

Os indicadores de qualidade de solos sob cacauzeiro nativo na Amazônia são pH_{H_2O} , SB, PT, Ds, C-CO₂ e CBM e os valores de IQS destes solos foram próximo à 1. Estes índices são parâmetros bases para pesquisas futuras sobre gestão sustentável de cacauzeiros ou solos de várzea.

A matéria orgânica do solo é a principal responsável pelo fornecimento de bases na camada superficial dos solos sob cacauzeiros nativos. Os três solos apresentaram maior frequência de agregados grandes, DMP >4,76 mm, predomínio de microporos e baixa Ds. A alta respiração basal e o baixo quociente microbiano sugerem que grande parte do carbono orgânico estava sendo mineralizado em solos sob cacauzeiros nativos.

REFERÊNCIAS

- ADENIYI S. A. *et al.* Assessing the relationship between soil quality parameters of Nigerian Alfisols and cocoa yield, **Agroforestry Systems**, 2018.
- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic, 1995. 576 p.
- ANDREWS, S. S. *et al.* A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 90, n. 1, p. 25–45, 2002.
- ANDREWS, S.S.; CARROLL, C.R. Designing a decision tool for sustainable agroecosystem management: soil quality assessment of a poultry litter management case study. **Ecological Applications**, v. 11, n. 6, in press. 2001.
- ARAÚJO, Q. *et al.* Soil quality index for cacao cropping systems. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 13, p. 1892-1909, 2018.
- ARTHUR, E. *et al.* Soil specific surface area and non-singularity of soil water retention at low saturations. **Soil Science Society of American Journal**, v. 77, p. 43-53, 2012.
- BARBIERO *et al.* Ferrollysis induced soil transformation by natural drainage in Vertisols of sub-humid South India. **Geoderma**, v. 150, p. 173-188, 2010.
- BEZERRA, U. T. A. *et al.* Production of Filler Aggregate from Waste of Bivalves Molluscs Shells. **Jornal of Civil Engineering and Architecture**, v. 5, p. 363-367, 2011.
- BISSONNAIS, Y. L. *et al.* Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro ecosystems: effect of plant roots and soil characteristics. **Plant Soil**, v. 424, p. 303–317, 2018.
- BISWAS, S.*et al.* Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. **Geoderma**, v. 292, p. 34-48, 2017.
- BLAKE, G.R., HARTAGE, K.H. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), **Method of Soil Analysis**, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9, second ed., pp. 363–375, 1986.
- BOLDT-BURISCH, K. *et al.* Root Exudation of Organic Acids of Herbaceous Pioneer Plants and Their Growth in Sterile and Non-Sterile Nutrient-Poor, Sandy Soils from Post-Mining Sites. **Pedosphere**, v. 29, n. 1, p. 34–44, 2019.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. 3 ed. Trad. LEPSCH, I. F. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- CHAO, Y. *et al.* Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration. **Geoderma**, v. 337, p. 444–452, 2019.
- CHEN, S.N. *et al.* Sediment transport and deposition on a river- dominated tidal flat: An idealized model study. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. C10040, 2010.

- CHEN, C. *et al.* A Simple Method for Determining the Critical Point of the Soil Water Retention Curve. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 250–258, 2017.
- CORINGA, E. *et al.* Atributos de solos hidromórficos no pantanal norte matogrossense. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 1, p. 19–28, 2012.
- CRAVO, M. da S *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Pará**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 262p.
- DHALIWAL, S. S. *et al.* Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. **Environmental and Sustainability Indicators**, p. 1-2, 2019.
- DA SILVA, E. E. *et al.* Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2). **Embrapa**, Comunicado técnico 99, 2007. 4 p.
- DA SILVA, *et al.* Genesis, morphology and mineralogy of Planosols developed from different parent materials in southern Brazil. **Geoderma**, 341, 46–58, 2019.
- DA SILVA, R. R. *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, p. 1585-1592, 2010.
- DA SILVEIRA, M. I. *et al.* Site Jabuti, in Bragança, State of Pará, in the archaeological scenario of the Amazonian coastal landscape. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Hum.**, v. 6, n. 2, p. 335-345, 2011.
- DAL FERRO N. *et al.* Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments. **Soil and Tillage Research**, v. 119, p. 13–21, 2012.
- DANIEL, S. *et al.* Spatial Distribution of Soil Hydrological Properties in the Kilombero Floodplain, Tanzania. **Hydrology**, v. 4, n. 57, 2017.
- DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbono decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, p. 514-522, 2006.
- DE ALMEIDA, S. S. *et al.* Análise florística e estrutura de florestas de Várzea no estuário amazônico. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 4, p. 513 – 524, 2004.
- DE CARVALHO M. A. C. *et al.* Multivariate approach of soil attributes on the characterization of land use in the southern Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, v. 184, 207–215, 2018.
- DE FREITAS, D. F. *et al.* Planossolos e Gleissolos Utilizados na Fabricação de Cerâmica artesanal no Semiárido de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 654-667, 2015.
- DE FREITAS, L. *et al.* Avaliação de atributos químicos e físicos de solos com diferentes texturas sob vegetação nativa. **Enciclopédia Biosfera**, v.10, n.18; p. 523-534, 2014.

DE GRYZE, S. *et al.* Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 2, p. 235–246, 2010.

DE MERONA, B. Aspectos ecológicos da ictiofauna no Baixo Tocantins. *Acta Amazônica*, v. 16/17, n° único, p. 109-124, 1987.

DE SOUZA, E. D. *et al.* Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.79 88, 2010.

DELARMELINDA, E. A. *et al.* Soil-landscape relationship in a chronosequence of the middle Madeira River in southwestern Amazon, Brazil. **Catena**, v. 149, p. 199–208, 2017.

DEXTER, A. R. *et al.* Equilibrium, non-equilibrium and residual water: Consequences for soil water retention. **Geoderma**, v. 177–178, p. 63–71, 2012.

DEXTER, A. R. *et al.* Complexed organic matter controls soil physical properties. **Geoderma**, v. 144, n. 3–4, p. 620–627, 2008a.

DEXTER, A. R. *et al.* A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, v. 143, n. 3–4, p. 243–253, 2008b.

DING, D. *et al.* Using the double-exponential water retention equation to determine how soil pore-size distribution is linked to soil texture. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 119–130, 2016.

DINIZ, L. T. *et al.* Microbial and chemical changes in Gleysol under native macauba palms by the spatial and seasonal variations. **Bioscience journal**, v. 30, n. 3, p. 750-762, 2014.

DO NASCIMENTO, P. C. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1821-1827, 2009.

DUARTE, I. B. *et al.* Plantas de cobertura e seus efeitos na biomassa microbiana do solo. **Acta Iguazu**, v.3, n.2, p. 150-165, 2014.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mapas de solos e de aptidão agrícola das áreas alteradas do Estado do Pará**. Embrapa Solos, 2016.

EPSTEIN E.; BLOOM A. **Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas**. Trad. Maria Edna Tenório Nunes – Londrina: Editora Planta, 2006.

EWANE, E. B.; LEE, H-H. Effects of vegetation cover on sediment particle size distribution and transport processes in natural rainfall conditions on post-fire hillslope plots in South Korea. **Soil Research**, v. 54, p. 937–948, 2016.

FERNANDES C. A. F. *et al.* Avaliação da qualidade do solo em áreas de cacau cabruca, mata e policultivo no sul da Bahia. **Agrotrópica**, v. 25, n. 3, p. 137-148, 2013.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2006. 432 p.

FONTE, S. J. *et al.* Pasture degradation impacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organic matter in highly weathered tropical soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 68, 150-157, 2014.

FORSTER, S. *et al.* Wounding-Induced Stomatal Closure Requires Jasmonate-Mediated Activation of GORK K⁺ Channels by a Ca²⁺ Sensor-Kinase CBL1-CIPK5 Complex. **Developmental Cell**, v. 48, p. 87–99, 2019.

FRAZÃO, L. A. *et al.* Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a Sandy Brazilian Cerrado soil under different land uses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 135, p. 161–167, 2010.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size Analysis. *In*. KLUTE, C. A (Ed.). **Methods of soil Analysis**. Medison, 2^o ed. Wisconsin, 1986. p. 383-411.

GUIMARÃES, S. T. *et al.* Caracterização e classificação de Gleissolos da várzea do Rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 317-326, 2013.

HONDEBRINK, M. A. *et al.* The impact of agricultural management on selected soil properties in citrus orchards in Eastern Spain: A comparison between conventional and organic citrus orchards with drip and flood irrigation, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.087>.

IGWE, C. A. *et al.* Fe and Al oxides distribution in some ultisols and inceptisols of southeastern Nigeria in relation to soil total phosphorus. **Environmental Earth Sciences**, v. 60, p.1103–1111, 2010.

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

JARDIM, M.A.G. e VIEIRA, I.C.G. Composição florística e estrutura de uma floresta da Várzea do estuário amazônico, Ilha do Combu, Estado do Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, série Botânica n. 17, p. 333-354, 2001.

JIA, G.; LIU, X. Soil microbial biomass and metabolic quotient across a gradient of the duration of annually cyclic drainage of hillslope riparian zone in the three gorges reservoir área. **Ecological Engineering**, v. 99, p. 366-373, 2017.

JUNK, W.J. **As águas da região Amazônica**. *In*: E. SALATI, et al (eds). **Amazônia: Desenvolvimento, integração e ecologia**. Editora Brasiliense/CNPq. p. 45-100, 1983.

KIMURA, A. *et al.* Soil humic acid and aggregation as restoration indicators of a seasonally flooded riparian forest under buffer zone system. **Ecological Engineering**, v. 98 146–156, 2017.

KLEBER, M. *et al.* Mineral–Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. **Advances in Agronomy**, v. 130, 2015.

KLEIN, V. A. *et al.* Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciencia Rural**, v. 40, n. 7, p. 1550–1556, 2010.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. **Methods of soil analysis: part 1- physical and mineralogical methods**, n. methodssoilanl, p. 635-662, 1986.

KONGOR, J. E. *et al.* Assessment of soil fertility and quality for improved cocoa production in six cocoa growing regions in Ghana. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 1455–1467, 2019.

LI J. *et al.* Dynamics of soil microbial metabolic activity during grassland succession after farmland abandonment. **Geoderma**, v. 363, p. 114167, 2020.

LIMA, H. N. *et al.* **Características químicas e mineralógicas e a distribuição de fontes de fósforo em terras pretas de índio da Amazônia Ocidental**. In.: Teixeira, W. G. *et al.* As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. Embrapa Amazônia Ocidental, 2009.

LIU, H. *et al.* Glomalin-related soil protein affects soil aggregation and recovery of soil nutrient following natural revegetation on the Loess Plateau. **Geoderma**, v. 357, 2020.

LOPES, C. F. *et al.* (Coord.). **Ambientes costeiros contaminados por óleo: procedimentos de limpeza – manual de orientação**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2007. 120 p.

LOPES, E. L. N. *et al.* Características químicas de um Gleissolo sob diferentes sistemas de uso, nas margens do rio Guamá, Belém, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais**, v. 1, n. 1, p. 127–137, 2006.

LOURENTE, E. R. P. *et al.* Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 20-28, 2011.

LUGATO, E. *et al.* Relationship between aggregate pore size distribution and organic–humic carbon in contrasting soils. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p. 153–157, 2009.

MAFRA, A. L. *et al.* Humic acids from hydromorphic soils of the upper Negro river basin, Amazonas: Chemical and spectroscopic characterisation. **Geoderma**, v. 138, p. 170-176, 2007.

MAGNAGO, L. F. S. *et al.* Gradiente fitofisionômico-edáfico em formações florestais de Restinga no Sudeste do Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, n. 3, p. 734-746, 2010.

MAIA, S. M. F. *et al.* Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, p. 127–138, 2007.

MALAVOLTA, E. **Manual de calagem e adubação das principais culturas**. São Paulo Editora Agronômica Ceres, 1987. 496 p.

MATSCHULLAT, J. *et al.* What influences Amazon basin upland soil chemistry? Major, minor and trace elements in the upper rhizosphere. **Journal of Geochemical Exploration**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106433>.

MICHELI, F. *et al.* **Functional genomics of cacao**. **Advances in Botanical Research**, v. 55, n. C, p. 119–177, 2010.

MIRAYA, B. B. *et al.* Novas ocorrências de tufas no Vale do Ribeira (SP). **Geociências**, v. 37, n. 2, p. 299 - 313, 2018.

MOÇO, M. K. S. *et al.* Relationships between invertebrate communities, litter quality and soil attributes under different cacao agroforestry systems in the south of Bahia, Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 46, p. 347–354, 2010.

MONROE, P. H. M. *et al.* Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 221, p. 99 108, 2016.

NGO-MBOGBA, M. *et al.* Assessing soil quality under different land cover types within shifting agriculture in South Cameroon. **Soil and Tillage Research**, v. 150, p. 124–131, 2015.

PARTELLI, F. L. *et al.* Chemical and microbiological soil characteristics under conventional and organic coffee production systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, n. 2, p. 847-864, 2012.

PEREIRA, M. E.; PASQUALETO, A. Desenvolvimento sustentável com ênfase em frutíferas do Cerrado. **Estudos**, v. 38, n. 2, p. 333-363, 2011.

PICCOLI, I. *et al.* Conservation agriculture had a poor impact on the soil porosity of veneto low-lying plain silty soils after a 5-year transition period. **Land degradation & development**, v. 28, p. 2039-2050, 2017.

QIAN, J. *et al.* Effects of riparian land use changes on soil aggregates and organic carbon. **Ecological Engineering**, v. 112, p. 82–88, 2018.

RAMÍREZ, P. B. *et al.* Soil microbial community responses to labile organic carbon fractions in relation to soil type and land use along a climate gradient. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 141, p. 107692, 2020.

RAMÍREZ, P. B. *et al.* Environmental controls and longterm changes on carbon stocks under agricultural lands. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 310–321, 2019.

RODRIGUES, L. do M. B. Floristic composition and vegetable species uses in two environmental of floodplain forest. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 87, n. 2, p. 45-48, 2006.

- ROSCOE, R. *et al.* **Biomassa microbiana do solo: fração mais ativa da matéria orgânica.** In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M. e SALTON, J.C. (Eds.) – Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados, Embrapa, p. 163-198, 2006.
- SALTON, J. C. *et al.* Determinação da agregação do solo - Metodologia em uso na Embrapa Agropecuária Oeste. **Comunicado técnico**, n. 3, 2012.
- SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.
- SARTO, M. V. M. *et al.* Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v. 145, p. 103350, 2020.
- SCANLON, B.R. *et al.* Water potential: Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J.H; TOPP, C. (Eds.) **Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods.** Madison: Soil Science Society of America, 2002. p.643-670.
- SCHNEIDER, M.; GOSS, K. U. The temperature dependence of the water retention curve for dry soils. **Water Resources Research**, v. 47, W.03506, 2011.
- SEDAP – SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO E DA PESCA. Pará 2030 – **Cadeia Produtiva do cacau no Estado do Pará.** 2016. Disponível em: <http://www.sedap.pa.gov.br/sites/default/files/Prodecacau.pdf>. Acesso em: 04 de nov de 2019.
- SEQUEIRA, C. H. *et al.* Predicting soil bulk density for incomplete databases. **Geoderma**, v. 213, p. 64-73, 2014.
- SHANLEY, P. (Coord.). **Frutíferas e Plantas Úteis na Vida Amazônica.** Belém: CIFOR, Imazon, 2005.
- SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **Springer Plus**, v. 2, 2013.
- SIMONETTI, G. *et al.* Soil porosity in physically separated fractions and its role in SOC protection. **Journal of Soils and Sediments**, p. 1–15, 2016.
- SINGH, K. *et al.* Near infrared diffuse reflectance spectroscopy for rapid and comprehensive soil condition assessment in smallholder cacao farming systems of Papua New Guinea. **Catena**, v.183, p. 104185, 2019.
- SMITH, M. *et al.* Spatial patterns of, and environmental controls on, soil properties at a riparian–paddock interface. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 49, p. 38-45, 2012.
- SOLTANGHEISI, A. *et al.* Forest conversion to pasture affects soil phosphorus dynamics and nutritional status in Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, v. 194, p. 104330, 2019.
- SOUZA Jr, J. O. *et al.* Produtividade do cacauzeiro em função de características do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 23, p. 863-872, 1999.

STREIT, N. M. *et al.* The Chlorophylls. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p. p.748-755, 2005.

TEIXEIRA *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3° ed. Manual de métodos de análise de solo – Parte II: Análises químicas – p. 198-343, 2017a.

TEIXEIRA *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3° ed. Manual de métodos de análise de solo – Parte I: Capítulo 9 - Porosidade, p. 82-94, 2017b.

TEIXEIRA, W. G *et al.* Caracterização de um perfil de solo desenvolvido no sambaqui fluvial Moraes, município de Miracatu – SP. **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia.**, n. 22, p. 181-194, 2012.

THOR, K. Calcium – nutrient and messenger. **Frontiers in Plant science**, p. 10:440, 2019.

TULLER; OR. Adsorption and capillary condensation in porous media: liquid retention and interfacial configurations in angular pores. **Water Resource Research**, v. 35, n. 7, p. 1949-1964, 1999.

VALENTE, G. J. S. S.; COSTA, M. L. Fertility and desorption capacity of Anthrosols (Archaeological Dark Earth - ADE) in the Amazon: The role of the ceramic fragments (sherds). **Applied Clay Science**, v. 138, p. 131–138, 2017.

VAN BREEMEN, N. e BUURMAN, P. **Hydromorphic soils**. In: Soil Formation. Second Edition. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.

VANCE, E. D. *et al.* An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 19, n. 6. p. 703-707, 1987.

VAN LIER, Q. de J. **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

VON LÜTZOW, M. *et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. **European Journal of Soil Science**, 57: 426–445, 2006.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v.37, p.29-38, 1934.

WANG, Y. *et al.* The effects of the reverse seasonal flooding on soil texture within the hydro fluctuation belt in the Three Gorges reservoir, China. **Journal of Soils and Sediments**, 2017.

WOLINSKA, A.; STEPNIEWSKA, Z. Soil Aeration Variability as Affected by Reoxidation. **Pedosphere**, v. 23, n. 2, p. 236-242, 2013.

XIANG, H.; ZHANG, L.; WEN, D Change of Soil Carbon Fractions and Water-Stable Aggregates in a Forest Ecosystem Succession in South China. **Forests**, v. 6, p. 2703-2718, 2015.

YANG, Z. *et al.* Loss of soil organic carbon following natural forest conversion to Chinese fir plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 449, n. July, p. 117476, 2019.

YAO, Z. *et al.* Bivalve Shell: Not an Abundant Useless Waste but a Functional and Versatile Biomaterial. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 44, p. 2502–2530, 2014.

YE, C. *et al.* Spatial and temporal dynamics of nutrients in riparian soils after nine years of operation of the Three Gorges Reservoir, China. **Science of the Total Environment**, v. 664, p. 841–850, 2019.

YINGQIU, C. *et al.* Soil Microbial Metabolic Quotient in Inner Mongolian Grasslands: Patterns and Influence Factors. **Chinese Geographical Science**, v. 29, n. 6 p. 1001–1010, 2019.

YOUNAS, U. *et al.* Fertilizer industrial effluents: Physico-chemical characterization and water quality parameters evaluation. **Acta Ecologica Sinica**, v. 37, p. 236–239, 2017.

ZHANG, G. *et al.* Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 458–466, 2016.

ZHOU, H.; MOONEY, S. J. PENG X. Bimodal Soil Pore Structure Investigated by a Combined Soil Water Retention Curve and X-Ray Computed Tomography Approach. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 1270–1278, 2017.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MICRORGANISMOS E CONTEÚDO DE GLOMALINA DE SOLO SOB CACAUEIRO NATIVO EM MOCAJUBA, BAIXO TOCANTINS

RESUMO

O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) é uma frutífera nativa da Amazônia, encontrada em ecossistema de várzea, sob solos hidromórficos. Muitos microrganismos de vida livre estão em sinergia com as plantas, prestando serviços importantes para o crescimento e sanidade vegetal. O sucesso do manejo de frutíferas nativas depende dos serviços ecossistêmicos prestados pela comunidade microbiana do solo. Por isso, o objetivo deste estudo foi caracterizar qualitativamente os isolados microbianos de solo sob cacauzeiro nativo e verificar a relação da glomalina com as propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo. O estudo foi realizado na ilha do Tatuoca (S_T), em Mocajuba, Pará. Foram coletadas 5 amostras deformadas e indeformadas na profundidade de 0-0,10 m, para as análises químicas (pH, estoque de carbono – SOC, P, K, Ca), físicas (macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo – D_s, diâmetro médio ponderado – DMP), microbiológicas (carbono da biomassa microbiana – CBM, respiração basal – C-CO₂, densidade de microrganismos), bioquímicas (solubilização de P, produção de sideróforos, ácido indol acético 3 – AIA, catalase, glomalina facilmente extraível – FE-PRGS e glomalina total – T-PRGS), biológica (massa de raízes). Houve maior número de unidades formadoras de colônias bacterianas ($8,84 \times 10^4$). 13 isolados solubilizaram P em meio NBRIP, 4 produziram sideróforos, 3 produziram AIA e 23 foram positivos para catalase. A glomalina não foi o principal agente de ligação dos agregados, mas houve correlação positiva entre a FE-PRGS e a massa de agregados com diâmetro <2 mm. A T-PRGS interagiu positivamente com o conteúdo de P, e a massa de raízes aumentou com o aumento do conteúdo de P no solo. Os grupos 1 e 2 da análise de cluster apresentaram os microrganismos com maior potencial para a promoção do crescimento de plantas.

Palavras-chave: Frutífera nativa. *Theobroma cacao* L. comunidade microbiana. agregados.

ABSTRACT

Cacao tree (*Theobroma cacao* L.) is a native fruit to Amazon, found in lowland ecosystems under hydromorphic soils. Many free-living microorganisms are in synergy with plants, providing important services for plant growth and health. Success of management of native fruits depends on the ecosystem services provided by soil microbial community. Therefore, the objective this study was to qualitatively characterize microbial isolates of soil under native cacao and to verify relationship of glomaline with chemical, physical and microbiological properties of soil. The study was carried out on island of Tatuoca (S_T), in Mocajuba, Pará. Five deformed and unformed samples were collected at a depth of 0-0.10 m, for chemical analysis (pH, carbon stock – SOC, P, K, Ca) , physical (macroporosity, microporosity, total porosity, bulk density – D_s, weighted medium diameter – DMP), microbiological (carbon of microbial biomass – CBM, basal respiration – C-CO₂, density of microorganisms), biochemical (solubilization of P, production of siderophores, indole acetic acid 3 – EIA, catalase, easily extractable glomaline - FE-PRGS and total glomalin - T-PRGS), biological (root mass). high number of colonies forming units bacterial ($8.84 \times 10^{+4}$). 13 isolates solubilized P in NBRIP medium, 4 produced siderophores, 3 produced AIA and 23 were positive for catalase. Glomalin was not the main link agent for aggregates, but there was a positive correlation between FE-PRGS and the aggregate mass with diameter <2 mm. T-PRGS interacted positively with the P content, and root mass increased with the increase in P content in soil. Groups 1 and 2 of cluster analysis showed microorganisms with high potential for promoting plant growth.

Keywords: Native fruits. *Theobroma cacao* L. microbial community. aggregates.

3.1 Introdução

As frutíferas nativas da Amazônia movimentam a economia regional e apresentam potencial para abastecer outros nichos de mercado, porque são produtos de origem orgânica e agradam consumidores preocupados com a conservação do Bioma (SHANLEY, 2005). O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.), é encontrado às margens de rios e lagos na Amazônia (MICHELI et al., 2010), principalmente em ecossistema de várzea, estabelecido sob solos hidromórficos.

Nestes agroecossistemas as únicas fontes de fertilização do solo são os nutrientes depositados após a cheia dos rios, e a decomposição da matéria orgânica. As condições climáticas e regime hídrico, afetam diretamente a interação planta-microrganismos, e a produção de compostos microbianos na rizosfera. A diversidade vegetal e microbiológica e a densidade populacional das espécies determinam a qualidade da matéria orgânica, uma vez que o carbono orgânico é mais acumulado em ambientes nativos, porque não há perturbações no solo, e isso favorece a atividade microbiana (CARD; QUIDEAU, 2010).

Muitos microrganismos de vida livre estão em sinergia com as plantas, prestando serviços importantes para o crescimento e sanidade vegetal, sendo as bactérias mais abundantes comparadas aos fungos na rizosfera (SIVASAKTHI et al., 2014). A inoculação das culturas com microrganismos promotores de crescimento é uma alternativa ao uso de agroquímicos, porque os mesmos são comprovadamente biofertilizantes, bioestimulantes e bioprotetores (ALOO et al., 2018; SCHWARTZ et al., 2013; ZHAO et al., 2018). Os ácidos orgânicos produzidos por bactérias ajudam na solubilização de P adsorvido, tornando-o prontamente disponível para as plantas (KUMAR; RAI, 2017). O ferro atua como catalizador na síntese de clorofila (HU et al., 2017), e as *Pseudomonas* sp. são eficientes na produção de sideróforos, o qual é quelante do Fe^{3+} (DAVID et al., 2019). A produção do ácido indol acético 3 - AIA por parte dos microrganismos fomenta o desenvolvimento de raízes e brotações (SYAMSIA et al., 2015), comprovada no estudo de Jiang et al. (2020), com *Bacillus amyloliquefaciens* associado maior crescimento de raízes de *Arabidopsis thaliana*.

A qualidade do solo é beneficiada pelos fungos micorrízicos arbusculares (FMA), os quais interagem com as raízes de algumas espécies e após a sua morte liberam hifas e esporos para a produção de glomalina, a qual funciona como ligante dos agregados do solo (WU et al., 2008; FOLLI-PEREIRA et al., 2012; WANG et al., 2018). O carbono representa 37% da composição da glomalina, o que a torna passível de enriquecer o estoque de carbono no solo (ZOU et al., 2016). Alguns estudos associam o conteúdo de glomalina com a estabilidade de agregados em solos cultivados e de floresta úmida, principalmente relacionados com

agregados com frequência de diâmetro entre 0,5 a 1,00 mm (WANG; WU, 2015) e 1,00 a 2,00 mm (FOKOM et al., 2012).

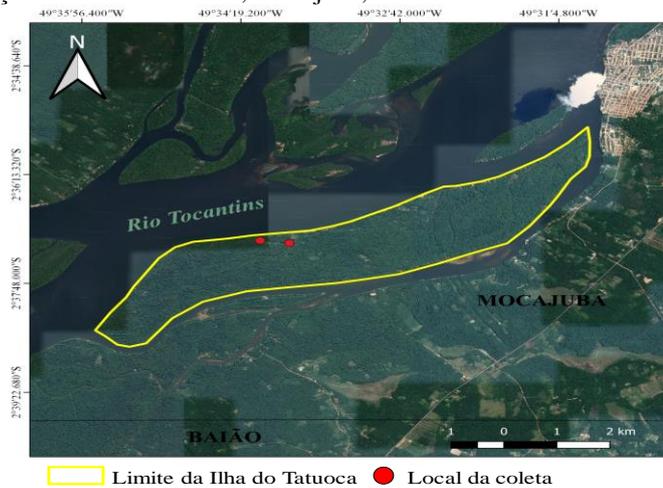
O sucesso do manejo de frutíferas nativas depende dos serviços ecossistêmicos prestados pela comunidade microbiana do solo. Estudos sobre a densidade de microrganismos e suas funções em cacauero nativo podem revelar a riqueza genética e a capacidade de sustentação desses agroecossistemas. Além disso, a relação entre glomalina e outras propriedades do solo ainda não foi amplamente investigada em ecossistemas de várzea. Contudo postulou-se duas hipóteses: (i) os isolados microbianos de solo sob cacauero nativo podem apresentar características para a promoção de crescimento de plantas, e o (ii) conteúdo de glomalina está diretamente relacionado à estabilidade de agregados. O objetivo deste estudo foi caracterizar qualitativamente os isolados microbianos de solos sob cacauero nativo e verificar a relação da glomalina com as propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Características gerais das áreas de estudo

O estudo foi desenvolvido em área de cacauzeiro nativo, na ilha do Tatuoca, pertencente ao município de Mocajuba (2°37'12" W; 49°34'7" S), Região do Baixo Tocantins, estado do Pará, Brasil. A localização da área está representada na figura 9. O clima de Mocajuba é classificado como “Ami” segundo a classificação de Köppen, temperatura média anual de 25,6°C e precipitação média anual de 2.225 mm (PACHECO et al., 2011). O solo da Ilha de Tatuoca é classificado como Gleissolos Háptico (EMBRAPA, 2016).

Figura 9 - Mapa de localização da ilha do Tatuoca, Mocajuba, estado do Pará. Altitude: 20 m.



Fonte: Peola Souza.

3.2.2 Amostragem

A amostragem do solo ocorreu em novembro de 2018, período de menor pluviosidade. As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-0,10 m, na projeção da copa do cacauzeiro.

Em cada área foram coletadas 5 amostras deformadas de solo, para a determinação das propriedades químicas do solo, densidade de partícula (Dp), conteúdo de glomalina. Também foram coletadas 5 amostras indeformadas, na mesma profundidade, utilizando anéis cilíndricos de 0,05 m de diâmetro e altura, para a determinação da densidade do solo (Ds). Para a determinação da estabilidade de agregados foram coletadas 5 amostras com estrutura preservada em anéis cilíndricos com 0,05 m de diâmetro e altura.

As 5 amostras coletadas para a avaliação das propriedades microbiológicas foram armazenadas em caixas térmicas e encaminhadas ao laboratório para a determinação do carbono da biomassa microbiana (CBM) e respiração basal (C-CO₂). Estas mesmas amostras foram utilizadas para avaliar a densidade dos microrganismos. E os microrganismos foram

isolados para a classificação bioquímica quanto a coloração Gram, solubilização de fosfato, produção de catalase, sideróforos e ácido indol acético 3 (AIA).

Nesta pesquisa o solo da ilha do Tatuoca foi denominado pela sigla S_T, baseadas no local de coleta e os isolados bacterianos receberam denominação baseada no local de coleta e gênero.

3.2.3 Propriedades químicas

As propriedades químicas do solo foram determinadas seguindo os procedimentos descritos por Teixeira et al. (2017a) e consistiram na avaliação do: pH em água na proporção solo:solução (1:2,5). P e K, extraídos por Mehlich-1 (0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄ + 0,05 mol L⁻¹ de HCl), sendo o P disponível determinado por colorimetria e o K por fotometria de chama. Ca foi determinado por complexometria com EDTA. O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley e Black (1934) modificado, baseado no princípio da oxidação da matéria orgânica, com dicromato de potássio em meio sulfúrico.

O estoque de carbono no solo (Mg ha⁻¹) foi calculado a partir da expressão proposta por Veldkamp (1994) que relaciona os valores de carbono orgânico (g kg⁻¹), densidade do solo (g cm⁻³) e espessura da camada de coleta do solo (10 cm).

$$\text{SOC} = \text{CO} * \text{D}_s * h \quad (1)$$

Onde, SOC: estoque de carbono no solo expresso em Mg ha⁻¹.

3.2.4 Propriedades físicas

A porosidade total (PT) foi calculada a partir da densidade do solo e da densidade das partículas. A microporosidade foi determinada considerando o potencial de -60 hPa em mesa de tensão e a macroporosidade pela diferença entre a PT e a microporosidade (TEIXEIRA et al., 2017b).

O solo foi mantido em estufa de circulação forçada a 105°C até atingir peso constante para a obtenção da densidade do solo (D_s) (BLAKE; HARTGE, 1986). A densidade das partículas (D_p) foi determinada pelo método do picnômetro (BLAKE; HARTGE, 1986).

A estabilidade dos agregados do solo foi determinada via peneiramento úmido. O procedimento consistiu na pesagem de 50 g de agregados seco ao ar (tamanho entre 8,00 a 4,76 mm) que foram umedecidos por capilaridade, por 16 h. As amostras foram colocadas em um conjunto de peneiras com aberturas de 0,053 mm; 0,105 mm; 0,25 mm; 0,50 mm; 1,00 mm; 2,00 mm e 4,76 mm para agitação mecânica em agitador vibratório, do tipo Yoder, durante 10 minutos com potencial de 30 rpm. Em seguida o material retido em cada peneira

foi transferido para béqueres de 50 ml e levados para a estufa 105°C até atingir peso constante. Para correção da areia foi utilizado solução de NaOH a 1 M nas amostras de cada peneira, esperamos agir por 1 h, depois ocorreu a lavagem e as amostras foram para a estufa até atingir peso constante (SALTON et al., 2012).

O diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados foi obtido pela equação 2:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi * wi) / mi \quad (2)$$

Onde, wi : massa de cada classe (g), xi : diâmetro médio das classes (mm), mi : massa total de agregados retida no conjunto de peneiras (g). O DMP mostra a frequência de diâmetro de agregados que mais predomina no solo e é utilizado como uma medida da estabilidade de agregados.

3.2.5 Propriedades microbiológicas

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado pelo método de irradiação por microondas (ISLAM; WEIL, 1998). As análises irradiadas foram submetidas à radiação eletromagnética. O tempo de exposição das amostras irradiadas com base na potência do forno microondas foi de 45 segundos. Após a radiação foram adicionados 40 ml de solução extratora, K_2SO_4 0,5 M (VANCE et al., 1987), e posterior filtragem. Após a extração as amostras ficaram em repouso por 30 minutos e foram filtradas em filtro de papel. O carbono orgânico foi determinado com $K_2Cr_2O_7$ 0,066M em meio sulfúrico. Foram feitas seis provas em branco, três contendo K_2SO_4 0,5 M e todos os demais reagentes e três apenas com o K_2SO_4 . O CBM foi obtido a partir das equações seguintes:

$$CiNi = \frac{(Vb - Vam) * (Molaridade\ do\ sulfato\ ferroso) * (3) * (1000) * (Vex)}{(Vex) * (Peso\ do\ solo)} \quad (3)$$

Onde: $CiNi$: representa as amostras irradiadas e não irradiadas, Vb : volume da prova em branco em ml, Vam : volume de sulfato ferroso consumido na amostra em ml, 3: relação entre o número de mols, 1000: fator de correção da umidade, Vex : volume do extrator, $Psolo$: Peso do solo.

$$CBM = (Ci - Cni) / RC \quad (4)$$

Onde, CBM: Carbono da biomassa microbiana, Ci : amostras irradiadas, Cin : amostras não irradiadas, RC: valor de referência (0,33).

A atividade microbiana foi avaliada pela determinação da respiração basal ($C-CO_2$), pelo método descrito por Alef e Nannipieri (1995), a partir da quantificação do CO_2 liberado

no processo de respiração microbiana durante dez dias de incubação (28° C). O cálculo para a determinação da respiração basal foi feito com base na equação 5:

$$C - CO_2 = \left(\frac{V_b}{V_a}\right) * N * f * V / At \quad (5)$$

Onde, C-CO₂: carbono oriundo da respiração basal do solo (mg de C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹), V_b: volume de HCl gasto na titulação da prova em branco (ml), V_a: volume gasto na titulação da amostra (ml), N: normalidade do HCl (0,5), f: corresponde ao fator de correção do HCl 0,5 M, V: volume de NaOH 0,5 M usado na captura de CO₂ (ml), At: alíquota que foi titulada (ml).

A densidade de bactérias e fungos total foi determinada pela contagem manual em placas, utilizando a técnica de *spread-plate*, nos meios de cultura 523 (KADO; HESKETT, 1970), KingB (KING et al., 1954) e BDA (RIKER; RIKER, 1936, adaptado). Foi realizada diluição seriada até 10⁻⁵, inoculada em triplicata. A contagem das colônias foi expresso em unidade formadora de colônias por miligrama (UFC ml⁻¹). Aos meios cultura específico foi aplicado uma alíquota de 50 µl por placa de petri. Depois da inoculação as placas foram incubadas por 48 horas em temperatura ambiente. As UFC's foram purificadas e isoladas na coleção de microrganismos do solo da ilha do Tatuoca sob cacauero nativo.

3.2.6 Propriedades bioquímicas

Os testes bioquímicos foram aplicados em 35 isolados bacterianos do gênero *Bacilos* spp. e *Pseudomonas* spp. Foi realizada análise morfológica e teste de fluorescência para a identificação dos gêneros bacterianos.

A coloração de Gram foi pelo método de coloração de bactérias, onde as bactérias Gram positivas retêm o corante cristal violeta no citoplasma durante um tratamento com etanol. As bactérias Gram positivas assumiram coloração violeta e as Gram negativas avermelhadas (MARIANO et al., 2016).

Os isolados bacterianos foram colocados no meio de crescimento NBRIP (National Botanical Research Institute's phosphate growth medium) e incubados a 28°C por oito dias. O meio NBRIP é composto por glicose 10 g, Ca₃(PO₄) 2,5 g; MgSO₄·7H₂O, 0,25 g; MCl₂·6H₂O 5g; KCl 0,2 g; (NH₄)₂SO₄ 0,1g; 1,5% de ágar. A formação de halo transparente em torno da colônia indicou o potencial do isolado para a solubilização de fosfato (NAUTIYAL, 1999).

Os isolados foram cultivados em tubos de 10 ml contendo o meio TLS (Tryptic Soy) para a determinação qualitativa dos sideróforos. Estes foram incubadas por 24h em

temperatura controlada, 28 a 30°C, sob agitação constante. Após, a suspensão de células foi centrifugada por 10 minutos a 10.000 rpm e foi transferido 1 ml do sobrenadante para o microtubo e adicionado 1 ml de solução CAS. Os isolados que converterem a cor azul da solução CAS para o amarelo, em 15 minutos foram considerados produtores de sideróforos (CATTELAN, 1999).

Para a determinação do Ácido Indol Acético 3 (AIA) os isolados foram colocados no meio LB (Lúria Bertani) na presença de L-triptofano por 72 horas a 28 °C. Após esse período foram submetidos à centrifugação durante 10 minutos, 4.000 rpm. Então foi retirado 90 µl do sobrenadante, colocado em microtubo e adicionado solução Salkowski. Os microtubos foram incubados por 30 minutos no escuro para o desenvolvimento da coloração rósea, que é indicativo da produção de AIA, segundo metodologia de Cattelan (1999); Sarker e Al-Rashid (2013), adaptada.

Para a determinação da catalase as bactérias foram cultivadas em meio 523 por 24 horas à 28 °C. Após esse período foi retirada três porções de cada isolado e foi adicionado 3% de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), em lâmina de vidro e observado o desenvolvimento do oxigênio. As culturas catalase positiva desenvolveram espuma (NAVPRABHJOT; POONAM, 2013).

As concentrações de proteína facilmente extraível (FE-PRGS) e proteína total (T-PRGS) do solo relacionada à glomalina foram determinadas conforme metodologia descrita por Wright e Upadhyaya (1998). Para a obtenção da FE-PRGS utilizando 8 ml de solução de citrato de sódio (20 mM à pH 7.0) como solução extratora, e um ciclo de autoclavagem a 121 °C e 0,11 MPa durante 30 minutos. Para a extração T- PRGS utilizou-se 8 ml de citrato de sódio (50 mM à pH 8,0), e ciclo de autoclavagem a 121 °C e 0,11 MPa durante 60 minutos. Depois de cada ciclo de autoclavagem, o sobrenadante foi removido por centrifugação, 15 e 10 minutos para FE-PRGS e T- PRGS, respectivamente. Para a extração da T-PRGS foi realizado sete ciclos de centrifugação, precisamente até que o sobrenadante assumiu a cor amarelo claro. A proteína do solo relacionada à glomalina foi determinada a partir do método de Bradford utilizando albumina de soro bovino (BSA) como padrão.

3.2.7 Propriedade biológica

A quantificação da massa de raízes foi realizada com base na massa das raízes presentes no solo coletado em anéis cilíndricos com 0,05 m de diâmetro e altura. No laboratório o solo foi destorroado e as raízes foram retiradas com a pinça. As raízes menores que 2 mm, consideradas muito finas, ficaram retidas na peneira de 0,053 mm. As raízes foram

secas em estufa a 60 °C até atingir peso constante (BÖHM, 1979). A massa de raízes foi obtida com base no volume do anel coletado e extrapolado para o volume em 1 ha (Equação 6).

$$\text{Massa de raízes} = \frac{V_{ha} * M_{anel}}{V_{anel}} \quad (6)$$

Onde, Massa de raízes (g ha⁻¹), V_{ha}: volume de solo em um hectare, profundidade de 0,10 m (cm⁻³), M_{anel}: massa de raízes encontradas no anel de volume conhecido (g), V_{anel}: volume do anel de diâmetro e altura 0,05 m (cm⁻³).

3.2.8 Análise estatística

Foi realizada a estatística descritiva das variáveis abordadas neste estudo. A análise de correlação de Pearson foi realizada a fim de identificar a interação entre as variáveis químicas, físicas e bioquímicas.

Uma análise de agrupamento foi realizada com o objetivo de separar os isolados bacterianos analisados qualitativamente, quanto a solubilização de fosfato, produção de sideróforos, AIA e catalase. Os testes bioquímicos qualitativos são variáveis categóricas binárias, por isso para o agrupamento foi atribuído dois valores, 1 para os isolados positivo e 0 para os negativos aos testes bioquímicos.

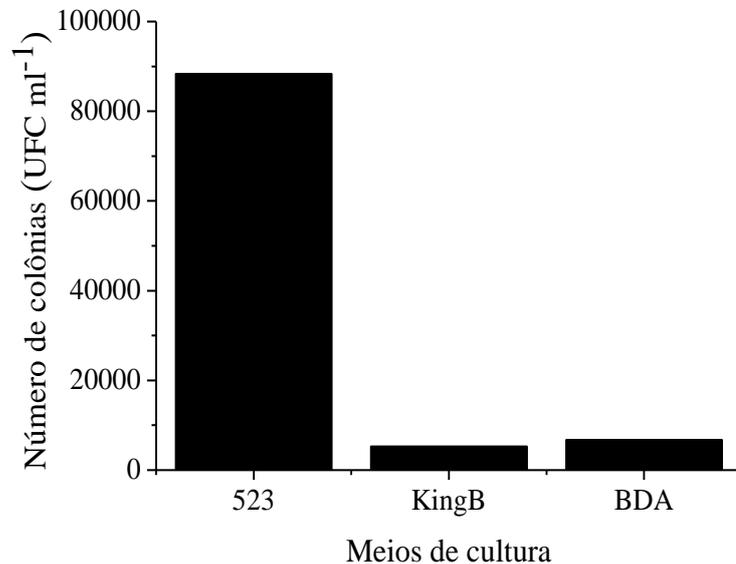
As análises de correlações de Pearson e o agrupamento dos isolados foram realizadas utilizando o software R 3.6.0. A confecção dos gráficos das correlações foi realizada no software Origin 8.0.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Densidade de microrganismos e caracterização bioquímica

A densidade dos microrganismos cultiváveis no solo da ilha do Tatuoca (S_T) está na figura 10. Houve maior número de colônias bacterianas (8.84x10⁺⁴ meio 523) em relação a colônias fúngicas (6.76x10⁺³ meio BDA) (Figura 10).

Figura 10 - Número de colônias bacterianas e fúngicas (UFC ml⁻¹) cultiváveis nos meios 523, KingB e BDA do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacauzeiro nativo em Mocajuba, Pará.

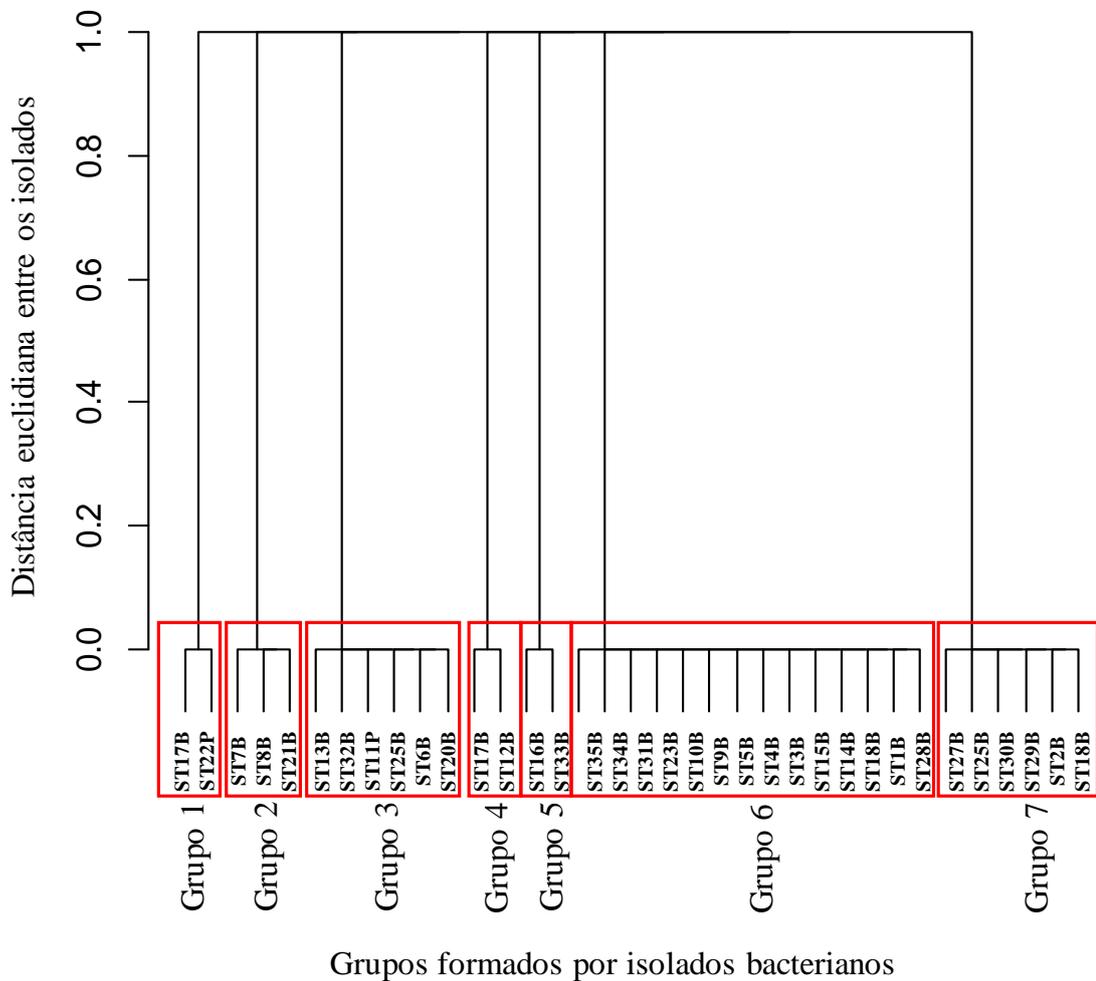


A umidade regula a composição da comunidade microbiana, pois impacta processos aeróbicos e anaeróbicos do solo. O solo da ilha do Tatuoca é inundado durante as cheias do rio Tocantins e está sujeito a condições hidromórficas ao longo do ano. As bactérias são dominantes na comunidade microbiana de solos úmidos (BOON et al., 1996) em relação aos fungos (MENTZER et al., 2006; WANG et al., 2010), porque determinadas características fisiológicas da célula bacteriana são ativadas por processos enzimáticos recorrentes nestes solos (DE MOURA et al., 2015). Em ambientes nativos o carbono orgânico é mais acumulado, pois não há perturbações no solo, e isso favorece o desenvolvimento de bactérias e a atividade microbiana em geral (CARD; QUIDEAU, 2010).

Foi observado maior número de *Bacillus* spp. nas colônias estudadas, porque estas bactérias são mais abundantes na rizosfera (SIVASAKTHI et al., 2014), representando até 95% da taxa de Gram positivas. Algumas espécies deste gênero bacteriano são exploradas na produção agrícola como biofertilizantes (ZHAO et al., 2018), bioestimulantes, promoção de crescimento de plantas (ALOO et al., 2018) e bioprotetores, porque desempenham antagonismo contra patógenos vegetais (SCHWARTZ et al., 2013).

O agrupamento dos isolados microbianos é apresentado na figura 11. O cluster foi aplicado em um grupo de 35 isolados bacterianos, sendo 33 *Bacillus* spp. e 2 *Pseudomonas* spp., e gerou sete grupos de acordo com a características qualitativas dos isolados para a produção de catalase, sideróforos, AIA e solubilização de fosfato.

Figura 11 - Análise de agrupamento dos isolados microbianos em função dos testes bioquímicos, coloração Gram, catalase, solubilizador de P, AIA e sideróforos do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacauero nativo em Mocajuba, Pará.

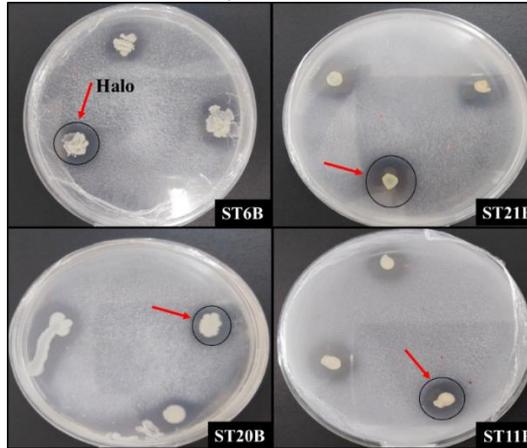


O grupo 1 foi composto por duas bactérias solubilizadoras de P e produtoras de sideróforos, sendo a ST22P uma bactéria fluorescente Gram negativa; o grupo 2 apresentou três bactérias catalase positiva, solubilizadoras de P e produtoras de AIA; o grupo 3 foi composto por seis bactérias catalase positiva e solubilizadoras de P, sendo ST11P uma bactéria fluorescente Gram negativa; o grupo 4 apresentou duas bactérias produtoras de sideróforos; no grupo 5 entrou apenas bactérias solubilizadoras de P sem outra função qualitativa; o grupo 6 foi composto por bactérias Gram positivas e catalase positiva; e o grupo 7 foi composto de bactérias que independente da coloração de Gram, foram negativas para produção de catalase, AIA, sideróforos e solubilização de P (Figura 11).

Dos isolados bacterianos selecionados do solo da ilha do Tatuoca sob cacauero nativo, 13 produziram halo característico da solubilização de fosfato em meio NBRIP, são

eles: ST16B, ST6B, ST7B, ST8B, ST11P, ST13B, ST19B, ST20B, ST21B, ST22B, ST25B, ST32B, ST33B (Figura 12).

Figura 12 - Isolados bacterianos (ST6B, ST21B, SR20B, SR11P) mostrando halo característico da solubilização de P, indicados pela seta, do solo da ilha do Tatuoca, sob cacauero nativo.



Fonte: Peola Souza.

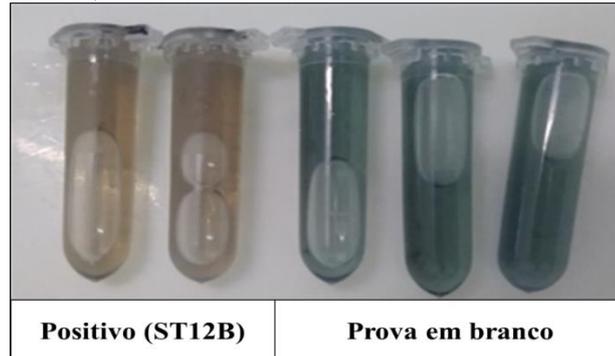
O fósforo é o segundo nutriente mais requerido pelas plantas, pois, é responsável por armazenar e transferir energia, e no interior da célula integra vias biossintéticas de P-lipídio, DNA e RNA, tornando-se um componente estrutural da célula, essencial no crescimento vegetal e formação das raízes (FERNANDES, 2006). Porém, é bastante limitante nos solos tropicais, porque grande parte do P está adsorvido aos óxidos e hidróxidos de Fe e Al. As bactérias solubilizadoras de P ocorrem naturalmente no solo e produzem diferentes ácidos orgânicos que ajudam a liberar formas de P solúvel para a solução do solo (RODRÍGUEZ; FRAGA, 1999).

Os ácidos glucônico, cetoglucônico, láctico, pirúvico, oxálico são produzidos por diferentes isolados bacterianos na presença de P insolúvel (KUMAR; RAI., 2017). Em meio de cultura a produção de ácidos orgânicos por bactérias acidifica o meio concomitante ao desenvolvimento do halo (LIU et al., 2015). E em condições de campo o comportamento dos microrganismos para a solubilização de P é o mesmo, por isso em solos com pH ácido a solubilização é mais expressiva devido a ação de ácidos orgânicos de origem microbiana ou exsudados radiculares. Segundo Kumar e Rai (2015) a abundância de bactérias solubilizadoras de P aumentou em detrimento do aumento da concentração de carbono orgânico e P insolúvel em solo de planície cultivado com arroz.

Quatro isolados bacterianos foram positivos para a produção de sideróforos (ST12B, ST17B, ST19B e ST22P) (Figura 13). Os sideróforos são moléculas de baixo peso molecular que atuam como quelantes específicos de Fe^{3+} (FERREIRA et al., 2019). Estes compostos

transportam o ferro para a célula das plantas mediante interação com a os receptores da membrana (JOHNSTONE; NOLAN, 2015; SAHA et al., 2016). Os sideróforos produzidos por bactérias são atribuídos à três grupos: hidroxamatos, catecolatos e carboxilatos (SCHALK; MISLIN, 2017).

Figura 13 - Isolado bacteriano ST12B, produtor de sideróforos, que converteu a cor azul da solução CAS para o amarelo, do solo da ilha do Tatuoca, sob cacauero nativo.



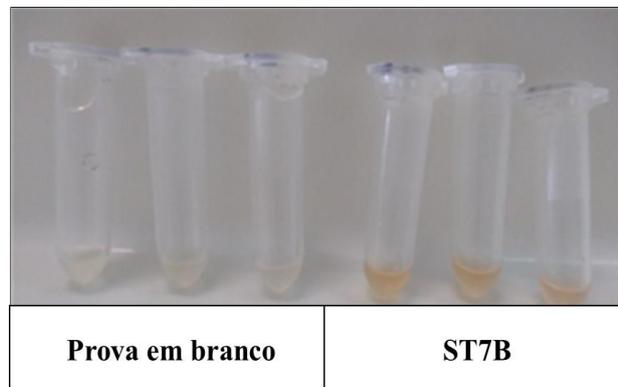
Fonte: Peola Souza.

Quando o solo é aerado o Fe^{2+} é oxidado a Fe^{3+} insolúvel, limitando a disponibilidade de Fe para os vegetais. O Fe é um micronutriente essencial para quase todos os organismos vivos e na planta atua como catalizador na síntese de clorofila (HU et al., 2017), sendo fundamental para a ativação de processos enzimáticos, reações de oxirredução em proteínas (peroxidase, catalase) e transferência de elétrons nos processos de respiração e fotossíntese (FERNANDES, 2006). Por isso, em condições limitantes de Fe, os microrganismos produtores de sideróforos são promotores de crescimento de plantas, e se apresentam como uma alternativa sustentável para o manejo nutricional das culturas em substituição à fertilizantes químicos (KOUR et al., 2020; GHOSH et al., 2020).

Diversos estudos tem relatado a inoculação do solo com *Pseudomonas* para a produção de sideróforos, como o de David et al. (2019), que comprovaram a produção dos sideróforos, pioverdine e piochiline, os quais foram mais eficientes na extração de Fe de minerais do solo, comparado ao quelante químico, EDTA. Os sideróforos também atuam no controle biológico de patógenos de plantas, porque se ligam ao Fe^{3+} e reduzem a disponibilidade deste nutriente aos patógenos, facilitando a morte dos mesmos (BENEDUZI et al., 2012; AHMED; HOLMSTROM, 2014). Bem como são utilizados como agentes de biorremediação, pois formam complexos com metais pesados (Cd^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+}) (JOHNSTONE; NOLAN, 2015).

Três isolados bacterianos do solo da ilha do Tatuoca foram positivos para a produção de ácido indol acético 3 - AIA (ST7B, ST8B, ST21B) (Figura 14). O AIA é um hormônio essencial para o crescimento de raízes e brotações vegetais. Diversos microrganismos, como as Rhizobacterias produzem AIA, com ou sem a presença do precursor L-Triptofano (KIZHAKEDATHIL; DEVI C, 2018). A produção de AIA por bactéria endofítica fomentou o crescimento da parte aérea e raiz no arroz, amendoim, grama preta e nabo (PANIGRAH et al., 2019). Na pesquisa de Jiang et al. (2020) o *Bacillus amyloliquefaciens* produtor de AIA foi associado ao aumento de nitrogênio no solo e conseqüentemente maior crescimento de raízes de *Arabidopsis thaliana*.

Figura 14 - Isolado bacteriano ST7B produtor de ácido indol acético 3 – AIA, do solo da ilha do Tatuoca, sob cacaueteiro nativo.



Fonte: Peola Souza.

Os microrganismos produtores de catalase estão presentes nos grupos 2, 3 e 6 (Figura 11). A catalase é uma enzima produzida por diversos organismos vivos, incluído os seres humanos (WU et al., 2020). Esta enzima tem papel importante na eliminação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), uma espécie reativa de oxigênio (ERO), que é produzida pelas plantas em condições de estresse, a qual causa perturbações fisiológicas e limita o crescimento vegetal (SLESÁK et al., 2007). Os microrganismos produtores de catalase na presença de H_2O_2 produzem bolhas, característica da separação do H_2O_2 em duas moléculas de água e uma de oxigênio (KAUSHAL et al., 2018). A catalase microbiana do solo atua na atenuação de estresses nos vegetais.

3.3.2 Caracterização quantitativa das propriedades do solo

A tabela 11 mostra a caracterização do solo da ilha de Tatuoca. A alta dispersão das variáveis químicas (P e Ca) e microbiológicas são inerentes as condições de solo sob vegetação nativa. Já para as variáveis físicas (pH, Ds, microporosidade, macroporosidade, PT)

e conteúdo de FE-PRGS, T-PRGS a baixa dispersão, está relacionada a ausência de atividades antrópicas intensas, que contribuem com alterações nas propriedades do solo.

Tabela 11 - Caracterização químicas, físicas, microbiológica e biológica do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacauzeiros nativos (n = 5). Profundidade de coleta: 0-0,10 m.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV%
pH em água	4,94	5,59	5,35	0,24	4,43
P (mg dm ⁻³)	0,81	3,64	2,16	0,94	43,16
K (cmol _c dm ⁻³)	0,21	0,29	0,26	0,03	12,30
Ca (cmol _c dm ⁻³)	4,60	10,20	7,34	2,22	30,31
SOC (Mg ha ⁻¹)	163,01	337,99	260,15	69,42	26,68
Ds g dm ⁻³	1,04	1,11	1,08	0,03	2,47
Macroporosidade (cm ³ cm ⁻³)	0,13	0,19	0,15	0,02	14,41
Microporosidade (cm ³ cm ⁻³)	0,41	0,45	0,42	0,02	4,12
PT (cm ³ cm ⁻³)	0,54	0,60	0,58	0,02	3,48
DMP (mm)	3,99	5,63	5,07	0,56	11,09
CBM (mg kg ⁻¹)	61,82	263,65	141,45	69,00	48,78
C-CO ₂ (mg CO ₂ kg ⁻¹)	85,03	128,45	107,70	14,91	13,84
Massa de raízes (g ha ⁻¹)	1003,59	2561,28	1885,20	591,81	31,39
FE- PRGS	0,025	0,029	0,027	0,002	5,87
T- PRGS	0,119	0,125	0,122	0,002	1,52

Onde, SOC: Estoque de carbono do solo, Ds: Densidade do solo, PT: Porosidade total, DMP: Diâmetro médio ponderado, CBM: Carbono da biomassa microbiana, C-CO₂: Respiração basal, FE- PRGS: Proteína do solo relacionada a glomalina facilmente extraível, T- PRGS: Proteína do solo relacionada a glomalina total, DP: Desvio padrão, CV: coeficiente de variação.

O fornecimento de nutrientes em ecossistemas nativos ocorre principalmente pela deposição de material orgânico (DELARMELINDA et al., 2017). Essa deposição não ocorre de forma homogênea devido a diversidade de material vegetal e animal. Além disso, a ação microbiana na decomposição também implica em variação na disponibilidade de nutrientes, pois esta é afetada pelo pH, umidade e temperatura do solo.

O conteúdo de P neste solo é baixo (CRAVO et al., 2007), mas pode ser incrementado pelo pH ácido que ajuda o P adsorvido aos coloides do solo ir para a solução, bem como pela ação microbiana na mineralização do P orgânico (WEI et al., 2019). O P orgânico representa um quarto do total de P no solo (FONTE et al., 2014; SOLTANGHEISI, et al., 2019). O conteúdo médio de Ca está acima do valor de referência sugerido por Cravo et al. (2007). Neste solo o Ca tem origem orgânica de natureza sedimentar, uma vez que não é realizada calagem nesta área, sendo este nutriente um componente da parede celular vegetal (THOR, 2019).

A baixa variação das propriedades físicas deste solo reflete a ausência de manejo intenso, o qual é responsável por alterações no solo que comprometem a qualidade. A microporosidade ocupa mais de 50% da porosidade total do solo, isso é uma característica de solos de várzea devido a deposição de partículas finas (silte e argila), que apresentam

diâmetro menor e ao se agregarem formam pequenos espaços porosos (GUIMARÃES et al., 2013; PICCOLI et al., 2017). A maior proporção de poros em relação a sólidos é inerente ao ambiente nativo, onde não ocorre adensamento das partículas por ocasião de manejo mecanizado. Desta forma, o diâmetro médio ponderado apresenta frequência de agregados estáveis em água $>4,76$ mm, o que determina a boa agregação e indica a presença de material muito estável às perdas por erosão.

O valor de D_s é inerente à ausência de atividades que promovam o adensamento das partículas do solo, bem como, a classe textural (fraco argilo siltosa) e o conteúdo de matéria orgânica (40,79%) do solo da ilha do Tatuoca contribuem com a menor D_s , uma vez que a matéria orgânica atua na maior expressão da estrutura grumosa da camada superficial do solo. Este tipo de estrutura caracteriza-se pela alta porosidade (VAN LIER, 2010).

Em área nativa a alta variação do CBM está relacionada diversidade de espécies vegetais, animais e ação da comunidade microbiana (QIAN et al., 2018; BISSONNAIS et al., 2018), que é condicionada por fatores abióticos como pH, umidade e temperatura (RAMÍREZ et al., 2020).

O valor médio da massa de raízes ($1.885,20 \text{ g ha}^{-1}$) com alta variação, que pode ser explicada pela diversidade de espécies, topografia do terreno e fatores edáficos (NESPOULOUS et al., 2019; FU et al., 2015). No entanto, segundo Xu et al. (2020) em ambiente florestal as características funcionais de dominância das espécies vegetais têm maior influência na biomassa radicular, uma vez que algumas espécies predominam e podem usar melhor os recursos do local. Em nossa área de estudo o *Theobroma cacao* L. é a espécie predominante, porque algumas espécies madeireiras foram retiradas.

3.3.3 Agregação e proteínas do solo relacionadas a glomalina (PRGS)

A tabela 12 mostra a distribuição de tamanho dos agregados estáveis em água. Os agregados do solo foram divididos em sete classes de peneiras e 59,98% da amostra inicial de agregados (50g) ficou retida entre as peneiras 8,00 e 4,76 mm. A perda de solo em detrimento do peneiramento úmido foi de 15,43%.

Tabela 12 - Classificação dos agregados do solo da Ilha do Tatuoca determinada por peneiramento via úmido, considerando o intervalo entre peneiras (mm) e a massa de agregados retidos (g) (n = 5). Profundidade de coleta: 0-0,10 m.

Classe de Peneiras (mm)	Massa de agregados (g)				
	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV%
4,76-8,00	18,89	32,89	29,49	5,32	3,61
4,76-2,00	2,37	10,17	6,50	2,84	8,75
2,00-1,00	1,46	5,50	2,90	1,37	9,46
1,00-0,50	0,47	3,14	1,51	0,90	11,99
0,50-0,25	0,31	1,92	1,00	0,52	10,47
0,25-0,10	0,18	0,62	0,35	0,15	8,53
0,10-0,05	0,23	0,98	0,55	0,24	8,77
Perda de solo (%)	6,56	20,22	15,43	4,78	31,00

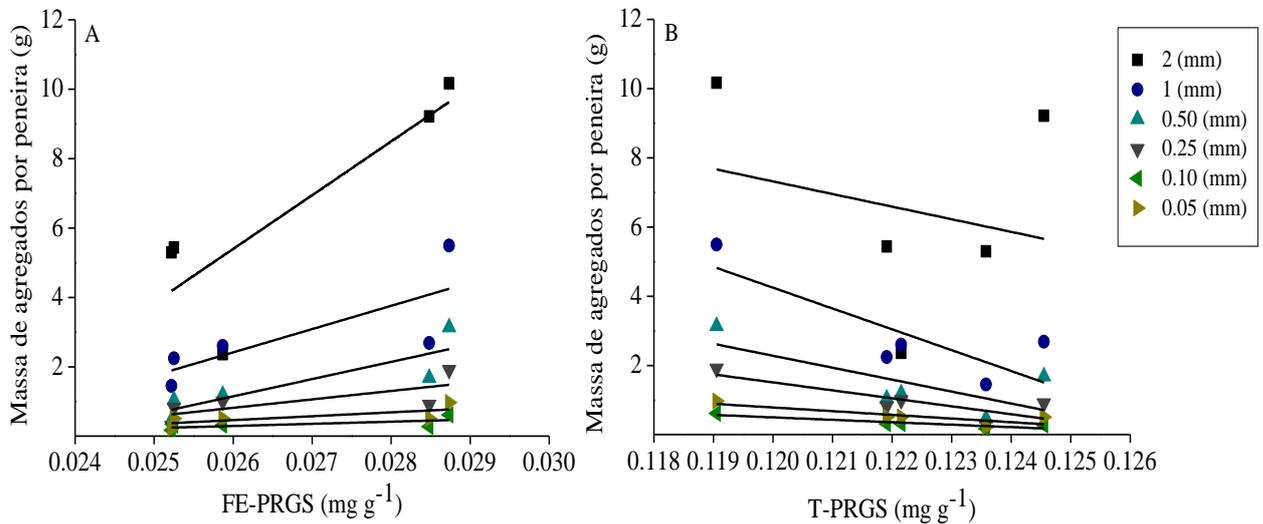
A permanência dos agregados estáveis em água indica a alta estabilidade do solo da Ilha do Tatuoca, isto é característico de solo que não sofre perturbação de manejo, no qual, embora ocorra atividade exploratória, a única prática realizada é a colheita do cacau. Além disso, a baixa perda de solo destaca a conservação do ecossistema de várzea, que apesar de ser inundado por ocasião das cheias do rio Tocantins apresenta baixa erosão.

As concentrações de proteínas do solo relacionadas a glomalina facilmente extraível (FE-PRGS) e total (T-PRGS) estão representadas na tabela 11. A glomalina é produzida após a morte dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) com consequente liberação de hifas e esporos, favorecida por condições de estresse hídrico ou altas temperaturas no solo (WU et al., 2008; FOLLI-PEREIRA et al., 2012; WANG et al., 2018). O excesso de umidade no solo condiciona concentrações mais baixas de glomalina em épocas do ano com maior pluviosidade (WU et al., 2014; JI et al., 2019).

Alguns fungos micorrízicos são sensíveis a umidade, culminando em diminuição da colonização de micorrizas, e redução da produção de esporos e hifas (FUSCONI; MUCCIARELLI, 2018), favorecendo baixos conteúdos de glomalina. O aumento da umidade também favorece a atividade dos microrganismos que atuam na decomposição de glomalina (MAIA et al., 2015). A concentração de glomalina é aumentada em condições de estresse hídrico, o que não é comum em ecossistemas de várzea (WANG et al., 2018). Além disso, os ciclos de inundação deste solo sessam a produção de glomalina, bem como favorecem a lixiviação da mesma (SHARIFI et al., 2018), por isso no solo da Ilha do Tatuoca as concentrações de glomalina são baixas.

A figura 15A apresenta as correlações positivas entre o conteúdo de FE-PRGS e a massa de agregados retida nas peneiras de 2, 1, 0,50, 0,25, 0,10 e 0,05 mm e a figura 15B apresenta a correlação negativa entre a T-PRGS e a massa de agregados retida nas peneiras.

Figura 15 - Correlação entre as proteínas do solo relacionadas à glomalina facilmente extraível e total (FE-PRGS e T-PRGS) e a massa de agregados retida por peneira (2, 1, 0,50, 0,25, 0,10, 0,05 mm) do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacauzeiro nativo.



A FE-PRGS foi mais estreitamente correlacionada com a agregação do solo no estudo Wright e Upadhyaya (1998), comparada a T-PRGS, porque as condições extremas para a extração de T-PRGS acabam extraindo mais frações de glomalina não imunorreativas, sendo a fração de FE-PRGS pouco expressiva no total. Estes autores também comentam que a FE-PRGS por ser a mais recente produzida no solo tem mais influência na agregação, pois os agregados estáveis em água apresentaram maiores conteúdo da mesma. Wang e Wu (2015) estudando a rizosfera de citros encontraram maiores quantidades de glomalina nos agregados de 0,5 a 1,00 mm em comparação aos agregados >1 mm. No estudo de Fokom et al. (2012) em solo de floresta úmida as maiores concentrações de glomalina estavam em agregados de diâmetro entre 1 e 2 mm, sendo consistente com os nossos resultados.

O carbono orgânico tem maior participação na construção da estrutura do solo do que as glomalina (SHARIFI et al., 2018). Embora a glomalina seja composta por 37% de carbono, podendo enriquecer o estoque no solo (ZHANG et al., 2016). O estudo de Wu et al. (2014a) mostrou que não houve correlação positiva entre a glomalina total e o diâmetro médio dos agregados, evidenciando que a glomalina não é o principal agente de ligação entre os agregados do solo.

As correlações entre variáveis químicas, físicas, microbiológicas, biológicas e bioquímicas do solo da ilha do Tatuoca estão na tabela 13. Correlações positivas e significativas ocorreram entre pH e T-PRGS (0,98; $p < 0,01$), SOC e Ds (0,87; $p < 0,05$), Ds e

massa de raízes (0,94; $p < 0,01$), DMP e C-CO₂ (0,88; $p < 0,05$), microporosidade e massa de raízes (-0,89; $p < 0,05$), C-CO₂ e FE-PRGS (0,91; $p < 0,05$).

O pH oscilou 11,63% (pH máximo = 5,59), por isso a correlação com a glomalina total sugere que o aumento do pH pode fomentar a produção de glomalina até certo ponto, uma vez que outras pesquisas comprovaram que o pH >8,00 favorece a lixiviação de glomalina no solo (WRIGHT; UPADHYAYA, 1996; SINGH et al., 2017; SHARIFI et al., 2018).

O máximo valor de Ds, 1,11 g cm⁻³, está dentro de uma faixa de densidade adequada para solos não cultivados (BRADY; WEIL, 2013), assim as correlações positivas entre Ds e SOC, massa de raízes, indicam que Ds é positivamente influenciada pelo estoque de carbono até o valor máximo encontrado neste solo, e isso favorece o crescimento de raízes das plantas deste ecossistema de cacauero nativo.

O comportamento da respiração basal (C-CO₂) em ecossistemas nativos ocorre em detrimento do alto aporte de material depositado, que também melhora a agregação do solo. Na Amazônia a atividade microbiana é altamente impulsionada pelo clima tropical úmido. No entanto, em área de cultivo convencional a baixa entrada de material no sistema e o solo descoberto favorecem o aumento da respiração basal e prejudicam a agregação do solo (BELMONTE et al., 2018).

A correlação negativa entre a microporosidade e a massa de raízes é explicada pelo fato dos microporos não serem responsáveis por abrigar raízes, embora a maior parte das raízes sejam finas. Os microporos são responsáveis pela retenção de água e abrigo dos microrganismos (BRADY; WEIL, 2013). As raízes crescem em espaços porosos maiores e quando morrem favorecem a macroporosidade, isso é evidenciado por uma correlação positiva fraca entre massa de raízes e macroporosidade (0,17).

A umidade do solo ocasiona o aumento da biomassa microbiana e respiração basal em solo sob floresta subtropical (ZHANG et al., 2015). A glomalina representa de 4 a 5% do carbono do solo, sendo a FE-PRSG uma fonte de carbono para a microbiota. Nas condições climáticas do solo da ilha do Tatuoca, os microrganismos consomem mais carbono e emitem CO₂ tentando se manter, indicando que quanto mais glomalina presente no solo, maior é a atividade microbiana.

Correlação positiva, porém, não significativa foi obtida entre conteúdo de P e a T-PRGS (0,82) (Figura 16). O fornecimento de P pode aumentar o conteúdo glomalina no solo dependendo da espécie de FMA (WU et al., 2014b). Entretanto, alguns estudos discorrem que o alto fornecimento de P interfere negativamente no

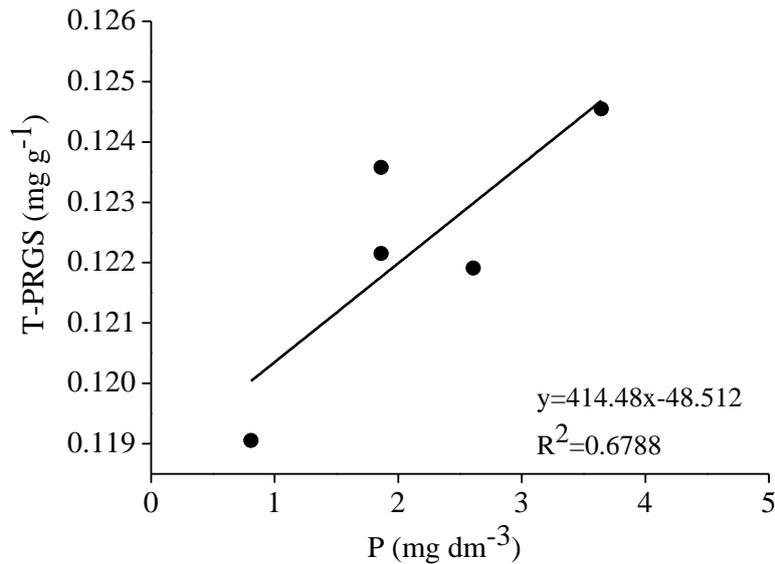
Tabela 13 - Correlação de Pearson entre variáveis químicas, físicas, microbiológicas e biológicas do solo da Ilha do Tatuoca, sob cacaueteiro nativo (n = 5).

Propriedades	P	K	Ca	SOC	Macro	Micro	PT	Ds	DMP	CBM	C-CO ₂	FE-PRGS	T-PRGS	Raízes
pH	0,74	-0,37	0,60	-0,04	0,38	-0,16	0,29	-0,20	-0,67	0,48	-0,62	-0,49	0,98**	0,08
P		-0,77	0,36	0,54	0,36	-0,64	-0,14	0,50	-0,02	-0,07	-0,06	-0,16	0,82	0,71
K			-0,53	-0,68	0,10	0,71	0,71	-0,71	-0,17	0,43	0,07	0,38	-0,42	-0,83
Ca				0,12	-0,44	0,10	-0,37	-0,14	-0,67	0,37	-0,74	-0,78	0,55	-0,02
SOC					-0,34	-0,37	-0,68	0,87*	0,52	-0,30	0,55	0,33	0,09	0,75
Macro						-0,49	0,65	-0,06	0,06	-0,13	0,01	0,10	0,38	0,17
Micro							0,33	-0,71	-0,52	0,78	-0,19	0,12	-0,20	-0,89*
PT								-0,68	-0,40	0,54	-0,17	0,19	0,26	-0,56
Ds									0,79	-0,71	0,64	0,32	-0,07	0,94**
DMP										-0,81	0,88*	0,63	-0,56	0,63
CBM											-0,44	-0,08	0,45	-0,70
C-CO ₂												0,91*	-0,48	0,41
FE- PRGS													-0,47	0,10
T- PRGS														0,18

Onde, FE-PRGS e T- PRGS, são proteínas do solo relacionadas a glomalina facilmente extraível e total, respectivamente; DMP é o diâmetro médio ponderado dos agregados; Macro e micro, correspondem a macroporosidade e microporosidade, respectivamente; SOC é o estoque de carbono no solo; Raízes corresponde a massa de raízes. Coeficientes de correlação de Pearson significativos: P<0.05(*); P<0.01(**); P<0.001(***)

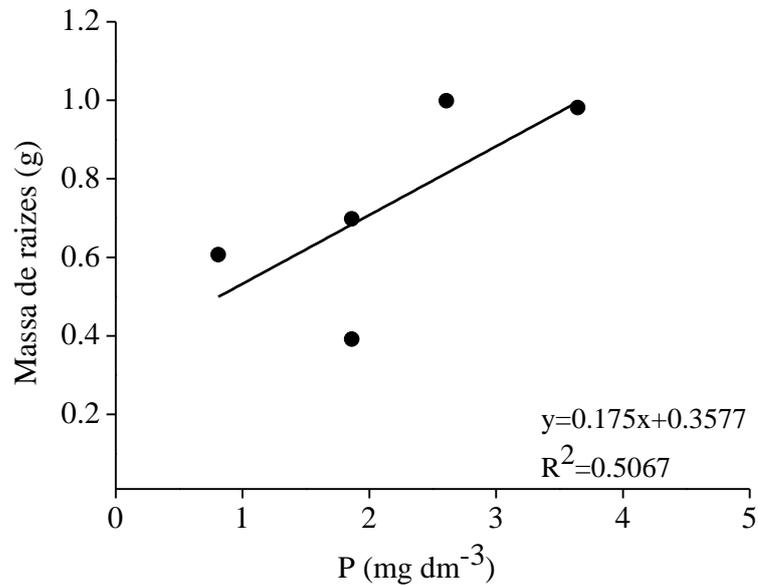
crescimento hifal e na produção de esporos, diminuindo os benefícios das micorrizas para as plantas (SCHMIDT et al., 2010; GABRIEL-NEUMANN et al., 2011; VAN GEEL et al., 2017).

Figura 16 - Correlação entre o conteúdo de P e as proteínas do solo relacionadas a glomalina total (T- PRGS) do solo S_T sob cacauzeiro nativo.



O crescimento das raízes é favorecido pelo fornecimento de P às culturas (XIA, et al., 2020), evidenciado pela correlação positiva entre P e massa de raízes (0,71) no solo da ilha do Tatuoca (Figura 17). Este nutriente é o precursor do trifosfato de adenosina (ATP) e outros compostos fosforilados (EPSTEIN; BLOOM, 2006), atua em diversos mecanismos na célula, como a divisão celular, por isso contribui para o aumento do crescimento de raízes e desenvolvimento vegetal (YU et al., 2019).

Figura 17 - Correlação entre o conteúdo de P e a massa de raízes do solo S_T sob cacauero nativo.



O maior espaço poroso entre agregados favorece o crescimento radicular, comprovado pela correlação positiva entre o DMP e a massa de raízes (0,63). A alta frequência de agregados estáveis em água >4,26 mm reflete uma condição de solo bem estruturado, que não oferece impedimento ao crescimento radicular, e assim atua no crescimento das plantas do ambiente nativo e na qualidade dos frutos de cacau.

CONCLUSÃO

Houve maior número de colônias bacterianas e entre estas 13 isolados foram positivos para a solubilização de P, 4 isolados foram considerados produtores de sideróforos, 3 produtores de AIA e 23 produziram catalase.

A glomalina não foi o principal agente de ligação entre os agregados. Mas, a FE-PRGS foi correlacionada positivamente à massa de agregados com diâmetro < 2 mm.

Os isolados do grupo 1 e 2 podem apresentar resultados promissores em pesquisas futuras sobre promoção de crescimento em condições controladas e em campo.

REFERÊNCIAS

- AHMED, E.; HOLMSTRÖM, S. J. Siderophores in environmental research: roles and applications. **Microbial biotechnology**, v. 7, p. 196-208, 2014.
- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic, 1995. 576 p.
- ALOO, B. N. *et al.* The Potential of Bacilli Rhizobacteria for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability. **Microbiological Research**. 2018. doi:10.1016/j.micres.2018.10.011.
- BELMONTE, S. A. *et al.* Effect of Long-Term Soil Management on the Mutual Interaction Among Soil Organic Matter, Microbial Activity and Aggregate Stability in a Vineyard. **Pedosphere**, v. 28, n. 2, p. 288–298, 2018.
- BENEDUZI, A. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. **Genetics and Molecular Biology**, v. 35, p. 1044-1051, 2012.
- BISSONNAIS, Y. L. *et al.* Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro ecosystems: effect of plant roots and soil characteristics. **Plant Soil**, v. 424, p. 303–317, 2018.
- BLAKE, G.R., HARTAGE, K.H. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), **Method of Soil Analysis**, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9, second ed., pp. 363–375, 1986.
- BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Springer-Verlag, Berlin, 1979.
- BOON, P. I. *et al.* Microbial consortia in wetland sediments: A biomarker analysis of the effects of hydrological regime, vegetation and season on benthic microorganisms. **Marine and Freshwater Research**, v. 47, p. 27–41, 1996.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. 3 ed. Trad. LEPSCH, I. F. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- CARD, S. M.; QUIDEAU, S. A. Microbial community structure in restored riparian soils of the Canadian prairie pothole region. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, p. 1463-1471, 2010.
- CATTELAN, A. J. **Métodos quantitativos para a determinação de características bioquímicas e fisiológicas associadas com bactérias promotoras de crescimento vegetal**. Londrina: Embrapa Soja, 1999.
- CRAVO, M. da S *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Pará**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 262p.
- DAVID, S. R. *et al.* Iron removal from raw asbestos by siderophores-producing *Pseudomonas*. **Journal of Hazardous Materials**, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121563>.

DELARMELINDA, E. A. *et al.* Soil-landscape relationship in a chronosequence of the middle Madeira River in southwestern Amazon, Brazil. **Catena**, v. 149, p. 199–208, 2017.

DE MOURA, Q. L. *et al.* Variação sazonal da população de bactérias e fungos e dos teores de nitrato e amônio do solo nos sítios do LBA e PPBIO, na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 3, 265-274, 2015.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mapas de solos e de aptidão agrícola das áreas alteradas do Estado do Pará**. Embrapa Solos, 2016.

EPSTEIN E.; BLOOM A. **Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas**. Trad. Maria Edna Tenório Nunes – Londrina: Editora Planta, 2006.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2006. 432 p.

FERREIRA, M. J. *et al.* Siderophore-Producing Rhizobacteria as a Promising Tool for Empowering Plants to Cope with Iron Limitation in Saline Soils: A Review. **Pedosphere**, v. 29, n. 4, p. 409-420, 2019.

FOKOM, R. *et al.* Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 69-75, 2012.

FOLLI-PEREIRA, M. da S. *et al.* Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 36, p. 1663-1679, 2012.

FONTE, S. J. *et al.* Pasture degradation impacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organic matter in highly weathered tropical soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 68, 150-157, 2014.

FU, X. *et al.* Response of the fine root production, phenology, and turnover rate of six shrub species from a subtropical forest to a soil moisture gradient and shading. **Plant Soil**, 2015. DOI:10.1007/s11104-015-2686-z.

FUSCONI, A.; MUCCIARELLI, M. How important is arbuscular mycorrhizal colonization in wetland and aquatic habitats?. **Environmental and Experimental Botany**, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.06.016>.

GABRIEL-NEUMANN, E. *et al.* Constitutive overexpression of the sucrose transporter SoSUT1 in potato plants increases arbuscular mycorrhiza fungal root colonization under high, but not under low, soil phosphorus availability. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, p. 911–919, 2011.

GHOSH, S. K. *et al.* Microbial siderophore- a boon to agricultural sciences. **Biological Control**, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104214>.

GUIMARÃES, S. T. *et al.* Caracterização e classificação de Gleissolos da várzea do Rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 317-326, 2013.

- HU X Y. *et al.* The iron-sulfur cluster biosynthesis protein *sufB* is required for chlorophyll synthesis, but not phytochrome signaling. **Plant Journal**, v. 89, p. 1184-1194, 2017.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, n. 4, p. 408–416, 1998.
- JIANG, Y. *et al.* Interactions of bacterial-feeding nematodes and indole-3-acetic acid (IAA)-producing bacteria promotes growth of *Arabidopsis thaliana* by regulating soil auxin status. **Applied Soil Ecology**, v. 147, p. 103447, 2020.
- JI, L. *et al.* Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin-related soil protein increase soil aggregation in Calcaric Regosol under well-watered and drought stress conditions. **Soil & Tillage Research**, v. 185, p. 1–8, 2019.
- JOHNSTONE, T. C.; NOLAN, E. M. Beyond iron: Non-classical biological functions of bacterial siderophores. **Dalton Transactions**, v. 44, p. 6320-6339, 2015.
- KADO, C. I.; HESKETT, M. G. Selective media for isolation of *Agrobacterium*, *Corynebacterium*, *Erwinia*, *Pseudomonas* and *Xanthomonas*. **Phytopathology**, v. 60, p. 969-979, 1970.
- KAUSHAL, J. *et al.* Catalase enzyme: Application in bioremediation and food industry. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 16, p. 192–199, 2018.
- KING, E.O.; WARD, M.K. & RANEY, D.E. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescin. **J. Lab. Clin. Med.**, v. 44, p. 301-307, 1954.
- KIZHAKEDATHIL, M. P. J.; DEVI C, S. Rhizospheric bacteria isolated from the agricultural fields of Kolathur, Tamilnadu promotes plant growth in mustard plants. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 16, p. 293-302, 2018.
- KOUR, D. *et al.* Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 23, p. 101487, 2020.
- KUMAR, A.; RAI, L. C. Proteomic and biochemical basis for enhanced growth yield of *Enterobacter* sp. LCR1 on insoluble phosphate medium. **Research in Microbiology**, v. 170, p. 195-204, 2015.
- KUMAR, A.; RAI, L. C. Soil Organic Carbon and Availability of Soil Phosphorus Regulate Abundance of Culturable Phosphate Solubilizing Bacteria in Paddy Fields of the Indo Gangetic Plain. **Pedosphere**, 2017. DOI: 10.1016/S1002-0160(17)60403-X.
- LIU, Z. *et al.* Characterization of phosphate-solubilizing bacteria isolated from calcareous soils. **Applied Soil Ecology**, v. 96, p. 217–224, 2015.
- MAIA, R. da S. Frações de fósforo e simbiose micorrízica em floresta secundária em resposta a disponibilidade de água e nutrientes na Amazônia oriental. **Acta Amazonica**, v. 45, n. 3, 255-264, 2015.

- MARIANO, R. de L.R. *et al.* **Métodos de coloração de bactérias fitopatogênicas**. In: Mariano, R. de L.R, Souza, E.B de (Coord.). Manual de práticas em fitobacteriologia. Recife: EDUFRPE, 2016. 234 p.
- MENTZER, J. L. *et al.* Microbial response over time to hydrologic and fertilization treatments in a simulated wet prairie. **Plant and Soil**, v. 284, p. 85–100, 2006.
- MICHELI, F. *et al.* Functional genomics of cacao. **Advances in Botanical Research**, v. 55, n. C, p. 119–177, 2010.
- NAUTIYAL, C. S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. **FEMS Microbiology Letters**, v. 170, n. 1, p. 265–270, 1999.
- NAVPRABHJOT, K.; POONAM, S. Screening and characterization of native *Pseudomonas* sp. as plant growth promoting rhizobacteria in chickpea (*Cicer arietinum* L.) rhizosphere. **African Journal of Microbiology Research**, v. 7, n. 16, p. 1465–1474, 2013.
- NESPOULOUS, J. *et al.* Tropical forest structure and understorey determine subsurface flow through biopores formed by plant roots. **Catena**, v. 181, p. 104061, 2019).
- PACHECO, J. J. *et al.*, (Coord.). **Mocajuba**. Governo do Estado do Pará, 2011.
- PANIGRAH, S. *et al.* Characterization of endophytic bacteria *Enterobacter cloacae* MG00145 isolated from *Ocimum sanctum* with Indole Acetic Acid (IAA) production and plant growth promoting capabilities against selected crops. South African **Journal of Botany**, v. 000, p. 1-10, 2019.
- PICCOLI, I. *et al.* Conservation agriculture had a poor impact on the soil porosity of veneto low-lying plain silty soils after a 5-year transition period. **Land degradation & development**, v. 28, p. 2039-2050, 2017.
- QIAN, J. *et al.* Effects of riparian land use changes on soil aggregates and organic carbon. **Ecological Engineering**, v. 112, p. 82–88, 2018.
- RAMÍREZ, P. B. *et al.* Soil microbial community responses to labile organic carbon fractions in relation to soil type and land use along a climate gradient. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 141, p. 107692, 2020.
- RIKER, A. J.; RIKER, R. S. **Introduction to research on plant disease**. St. Louis: Jonh S. Swift, 1936. 334p.
- RODRÍGUEZ, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**, v. 17, p. 319-339, 1999.
- SAHA M. *et al.* Microbial siderophores and their potential applications: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 3984-3999, 2016.
- SALTON, J. C. *et al.* Determinação da agregação do solo - Metodologia em uso na Embrapa Agropecuária Oeste. **Comunicado técnico**, n. 3, 2012.

SARKER, A.; AL-RASHID, J. **Analytical Protocol for determination of Indole 3 acetic acid (IAA) production by Plant Growth Promoting Bacteria (PGPB)**. n. September, p. 3-5, 2013.

SCHALK, I. J.; MISLIN, G L. A. Bacterial Iron Uptake Pathways: Gates for the Import of Bactericide Compounds. **Journal of medicinal chemistry**, 2017. DOI: 10.1021/acs.jmedchem.7b00554.

SCHMIDT, B. *et al.* Suppression of arbuscular mycorrhiza's development by high concentrations of Phosphorous at *Tagetes patula* L. **Research Journal of Agricultural Science**, v. 42, n. 4, 2010.

SCHWARTZ, A.R. *et al.* *Bacillus simplex*—a little known PGPB with anti-fungal activity—alters pea legume root architecture and nodule morphology when coinoculated with *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*. **Agronomy**, v. 3, p. 595-620, 2013.

SHANLEY, P. (Coord.). **Frutíferas e Plantas Úteis na Vida Amazônica**. Belém: CIFOR, Imazon, 2005.

SHARIFI, Z. *et al.* The response of glomalin-related soil proteins to fire or tillage. **Geoderma**, v. 329, p. 65-72, 2018.

SINGH, A. K. *et al.* Contribution of glomalin to dissolve organic carbon under different land uses and seasonality in dry tropics. **Journal of Environmental Management**, v. 192, p. 142–149, 2017.

SIVASAKTHI, S. *et al.* Biocontrol potentiality of plant growth promoting bacteria (PGPR)-*Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis*: a review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 16, p. 1265-1277, 2014.

SLESIAK, I. *et al.* The role of hydrogen peroxide in regulation of plant metabolism and cellular signaling in response to environmental stress. **Acta Biochimica Polonia**, v. 54, p. 39–50, 2007.

SOLTANGHEISI, A. *et al.* Forest conversion to pasture affects soil phosphorus dynamics and nutritional status in Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, v. 194, p. 104330, 2019.

SYAMSIA. *et al.* The Potency of Endophytic Fungal Isolates Collected from Local Aromatic Rice as Indole Acetic Acid (IAA) Producer. **Procedia Food Science**, v. 3, p. 96-103, 2015.

TEIXEIRA *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3^o ed. Manual de métodos de análise de solo – Parte II: Análises químicas – p. 198-343, 2017a.

TEIXEIRA *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3^o ed. Manual de métodos de análise de solo – Parte I: Capítulo 9 - Porosidade, p. 82-94, 2017b.

THOR, K. Calcium – nutrient and messenger. **Frontiers in Plant science**, p. 10:440, 2019.

VAN GEEL, M. *et al.* High soil phosphorus levels overrule the potential benefits of organic farming on arbuscular mycorrhizal diversity in northern vineyards. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 248, p. 144–152, 2017.

VAN LIER, Q. de J. **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

VANCE, E. D. *et al.* An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 19, n. 6. p. 703-707, 1987.

VELDKAMP E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 175-180, 1994.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the degtyareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the cromic acid titration method. **Soil Science**, v.37, p. 29-38, 1934.

WANG, S., WU, Q.S. Distribution of glomalin-related soil protein and soil organic carbon in water-stable aggregate fractions of citrus rhizosphere. **BioTechnology: An Indian Journal**, v. 11, p. 14–17, 2015.

WANG, W. Glomalin changes in urban-rural gradients and their possible associations with forest characteristics and soil properties in Harbin City, Northeastern China. **Journal of Environmental Management**, v. 224, p. 225–234, 2018.

WANG, Y. *et al.* Tillage, residue burning and crop rotation alter soil fungal community and water-stable aggregation in arable fields. **Soil & Tillage Research**, v. 107, p. 71–79, 2010.

WEI, X. *et al.* Rare taxa of alkaline phosphomonoesterase-harboring microorganisms mediate soil phosphorus mineralization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 131, p. 62–70, 2019.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, v.198 p. 97-107, 1998.

WRIGHT, S.F.; UPADHYAYA, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Science**, v.161, p. 575–586, 1996.

WU, Q. S. *et al.* Tempo-spatial distribution and related functionings of root glomalin and glomalin-related soil protein in a citrus rhizosphere. **The Journal of Animal & Plant Sciences**, v. 24, n. 1, p.245-251, 2014a.

WU, Q. S. *et al.* Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliolate orange grown under different P levels. **Mycorrhiza**, 2014b. DOI: 10.1007/s00572-014-0594-3.

WU, Q. S. *et al.* Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. **European Journal of Soil Biology**, v. 44, p. 122-128, 2008.

- WU, Y. *et al.* Employment of teicoplanin-coated magnetic particles for quantifying gram-positive bacteria via catalase-catalyzed hydrolysis reaction of H₂O₂. **Talanta**, v. 211, p. 120728, 2020.
- XIA, Z. *et al.* Root traits and rhizosphere processes reflect differential phosphorus acquisition strategies in contrasting *Populus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 457, p. 117750, 2020.
- XU, Y. *et al.* Influence of tree functional diversity and stand environment on fine root biomass and necromass in four types of evergreen broad-leaved forests. **Global Ecology and Conservation**, v. 21, p. 00832, 2020.
- YU, L. *et al.* Plant-plant interactions and resource dynamics of *Abies fabri* and *Picea brachytyla* as affected by phosphorus fertilization. **Environmental and Experimental Botany**, v. 168, p. 103893, 2019.
- ZHANG, J. *et al.* Glomalin-related soil protein responses to elevated CO₂ and nitrogen addition in a subtropical forest: Potential consequences for soil carbon accumulation. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 83, p. 142-149, 2015.
- ZHAO, L. *et al.* Antagonistic endophytic bacteria associated with nodules of soybean (*Glycine max* L.) and plant growth-promoting properties. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, p. 269–278, 2018.
- ZOU, Y. N. Glomalin: A Potential Soil Conditioner for Perennial Fruits. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 18, p. 293–297, 2016.