



UFC

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

RODRIGO ALVES BEZERRA

**CARBONO OXIDÁVEL DE SOLOS SOB DIFERENTES GRAUS DE DEGRADAÇÃO
NO ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA

2023

RODRIGO ALVES BEZERRA

CARBONO OXIDÁVEL DE SOLOS SOB DIFERENTES GRAUS DE DEGRADAÇÃO
NO ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de
Agronomia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Eugênia Ortiz
Escobar.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B469c Bezerra, Rodrigo Alves.
Carbono oxidável de solos sob diferentes graus de degradação no estado do Ceará / Rodrigo Alves
Bezerra. – 2023.
45 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências
Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Maria Eugênia Ortiz Escobar..

1. Degradação do solo. 2. Qualidade do solo. 3. Estoque de carbono. I. Título.

CDD 630

RODRIGO ALVES BEZERRA

CARBONO OXIDÁVEL DE SOLOS SOB DIFERENTES GRAUS DE DEGRADAÇÃO
NO ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Agronomia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 08/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Eugênia Ortiz Escobar (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Diana Ferreira de Freitas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Thais da Silva Martins
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Francilene e Adilson.

AGRADECIMENTOS

Minha mãe, Francisca, por sempre me apoiar e ser minha maior motivadora a fazer o meu melhor em tudo que me proponho a participar.

Minhas irmãs Eduarda, Amanda, e meu Pai, Adilson, pelo amor, carinho, apoio e confiança durante todo o meu percurso como ser humano.

À Prof. Dra. Maria Eugenia Ortiz Escobar, pela excelente orientação, apoio, colaboração e exemplo de perseverança, pela oportunidade de ser bolsista de iniciação científica atuando no laboratório de química do solo e ser membro do grupo de estudos QSQA (Química do Solo e Química Ambiental), e ainda, por ter aceitado ser orientadora do meu trabalho.

Aos amigos que conheci durante a graduação, Ramony, Marcelo, Nicole, Raylane, Bruno, em especial: Valéria e Emilly, por sempre me apoiarem, rirem comigo, me ajudarem, por confiarem e torcerem por mim. Sem vocês, minha jornada na faculdade seria menos colorida e clara.

Aos professores Giovanni Cordeiro Barroso, Carmem Dolores Gonzaga Santos e Isabel Cristina da Silva Araújo, e em especial a professora Diana Ferreira de Freitas por impactarem minha jornada e serem exemplos para mim.

Ao laboratorista e amigo Crisanto Dias Teixeira Filho, por me ajudar, ensinar e pelas risadas.

Às doutorandas Sheilla Silva e Serpa e Thais da Silva Martins, por serem exemplos, pelo apoio, por acreditar e se preocupar comigo durante esse período de conclusão do trabalho.

Aos doutorandos Luís Felipe Rodrigues e Mateus Guimarães da Silva, por serem exemplos e pelo apoio, em especial ao Luís pelas conversas, orientações e motivação.

Ao bolsista Antônio Marcos da Costa Pinto e ao mestrando Juan Guillermo Cardena, pela convivência, amizade e auxílio durante as atividades do laboratório.

Ao Bruno Brigido, companheiro de jornada e amigo por acaso, pelo seu apoio, carinho e conselhos sinceros

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento - Brasil (FUNCAP).

A Deus, pela paciência que me foi dada.

“ Todos esses que aí estão atravancando meu caminho, eles passarão... Eu passarinho!”.

Mário Quintana

RESUMO

A complexa dinâmica do solo e sua integridade no contexto semiárido do Brasil está relacionada com vulnerabilidades socioambientais intrinsecamente relacionadas à degradação do solo. Essas vulnerabilidades têm o potencial de impactar diretamente a segurança da população local, especialmente diante das incertezas provenientes das mudanças climáticas globais. Diante desse cenário desafiador, surge a necessidade de reflexão sobre as trajetórias futuras de desenvolvimento regional. O monitoramento das flutuações nos teores de carbono orgânico do solo adquire uma importância crucial como indicador na prestação de serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono. Avaliar a qualidade desse carbono desempenha um papel fundamental na identificação de áreas suscetíveis à degradação, na implementação de práticas de manejo sustentável e na preservação dos serviços ecossistêmicos. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar o carbono oxidável como marcador representativo da qualidade do solo em áreas com diferentes graus de degradação na localidade de Mapuá, município de Jaguaribe, CE. Foram examinadas três áreas distintas (Degradada, Recuperação e Testemunha), subdivididas em cinco talhões cada. Esses talhões forneceram amostras compostas por cinco subamostras, coletadas na profundidade de 0 a 20 cm. Nesse contexto, foram determinados os teores de carbono orgânico total (COT), carbono lábil (Cl), carbono não lábil (CNL), bem como a labilidade de carbono (LC), o índice de compartimentação do carbono e o índice de labilidade (IL), além do índice de manejo de carbono (IMC) e atributos do solo. A área degradada ocasionou reduções significativas na maioria das variáveis analisadas, sendo notáveis as acentuadas diminuições nos teores de COT, principalmente nas frações recalcitrantes. A dinâmica do carbono oxidável emergiu como indicador de grande valor intrínseco para avaliar a qualidade do solo, ressaltando seu papel como elemento chave na compreensão da saúde e vitalidade dos ecossistemas.

Palavras-chave: Degradação do solo; Qualidade do solo; Estoque de carbono.

ABSTRACT

The complex dynamics of soil and its integrity in the semi-arid context of Brazil are related to socio-environmental vulnerabilities inherently linked to soil degradation. These vulnerabilities have the potential to directly impact the security of the local population, especially amid uncertainties arising from global climate change. In the face of this challenging scenario, there arises a need for reflection on future trajectories of regional development. Monitoring fluctuations in soil organic carbon content becomes crucial as an indicator in providing ecosystem services, such as carbon sequestration. Assessing the quality of this carbon plays a fundamental role in identifying areas susceptible to degradation, implementing sustainable management practices, and preserving ecosystem services. In this context, the objective of this study was to analyze oxidizable carbon as a representative marker of soil quality in areas with different degrees of degradation in the locality of Mapuá, municipality of Jaguaribe, CE. Three distinct areas (Degraded, Recovery, and Control) were examined, subdivided into five plots each. These plots provided samples composed of five subsamples, collected at a depth of 0 to 20 cm. In this context, total organic carbon (TOC), labile carbon (LC), non-labile carbon (NLC), as well as carbon lability (CL), carbon compartmentalization index, lability index (LI), and carbon management index (CMI) were determined, along with soil attributes. The degraded area caused significant reductions in most analyzed variables, with notable decreases in TOC, especially in recalcitrant fractions. The dynamics of oxidizable carbon emerged as an indicator of great intrinsic value for assessing soil quality, emphasizing its role as a key element in understanding the health and vitality of ecosystems.

Keywords: Soil degradation; Soil quality; Carbon stock.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Níveis de ocorrência de desertificação e núcleos configurados.....	18
Figura 2 – Localização da área de estudo.....	23
Figura 3 – Mapa de solos do município de Jaguaribe, CE.	24
Figura 4 – Aspecto da área de estudo, antes da intervenção, comparando período seco e período chuvoso.....	25
Figura 5 – Áreas de estudo na comunidade de Mapuá: (A) degradada, (B) em recuperação e (C) controle, vegetação secundária sem intervenções	26
Figura 6 – Perfis de solo encontrados nas áreas de estudo (A) Neossolo litólico eutrófico fragmentário e (B) Luvissole crômico órtico típico (B).....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Histórico de uso das áreas da comunidade Mapuá no Município de Jaguaribe, CE.	27
Tabela 2 – Médias das características químicas dos solos com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe,CE.	30
Tabela 3 – Médias dos nutrientes do solo em áreas sob graus de degradação no Município de Jaguaribe, CE.	32
Tabela 4 – Médias de frações de carbono orgânico oxidável (F1, F2, F3 e F4) em áreas com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe, CE.	33
Tabela 5 – Índice de solo CL (carbono lábil), CNL (Carbono não lábil), ICC (Índice de compartilhamento docarbono), L (lábil) , IL (Índice de labilidade) e IMC (Índice de manejo do carbono) em áreas com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe , CE.	35
Tabela 6 – Granulometria de solos da comunidade Mapuá com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe, CE.	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BSh'w	Tropical quente
C	Carbono
CL	Carbono lábil
COS	Carbono Orgânico do Solo
CNL	Carbono não lábil
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de troca de cátions
ICC	Índice de compartilhamento do carbono
IL	Índice de labilidade
IMC	Índice de manejo do carbono
L	Labilidade
MOS	Matéria orgânica do solo
TFSA	Terra Fina seca ao ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Desertificação	17
2.2	A matéria orgânica do solo	19
2.3	Compartimentos da matéria orgânica do solo	20
2.4	Frações oxidáveis e lábeis de carbono do solo	21
3.	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	Localização e caracterização da área de estudo	23
3.2	Histórico da área e amostragem do solo	26
3.3	Análise química do solo	28
3.4	Frações do carbono oxidável do solo	28
3.5	Análise física	29
3.6	Análise estatística	29
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Atributos do solo	30
4.2	Micronutrientes	31
4.3	Frações de carbono orgânico oxidável	32
4.4	Índices de qualidade do solo	34
4.5	Granulometria	35
5	CONCLUSÃO	36

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
ANEXO A – INFORMAÇÕES SOBRE PERFIL DO SOLO LUVISSOLOS CRÔMICOS E NEOSSOLOS LITÓLICOS DISPONIBILIZADO PELA FUCEME	45
ANEXO B – TABELA COM INFORMAÇÕES SOBRE CARATERÍSTICA QUÍMICA DOS PONTOS DAS ÁREAS DA COMUNIDADE MAPUÁ DE JAGUARIBE, CE.	47

1 INTRODUÇÃO

As incertezas geradas pelas mudanças ambientais globais têm levado a reflexões sobre o desenvolvimento futuro. Os impactos antropogênicos, como desmatamento, queimadas e superpastoreio, ganham destaque devido à sua influência na redução da biodiversidade, aumento na degradação e contaminação dos recursos hídricos, esses impactos são especialmente visíveis em ambientes áridos, semiáridos e subúmidos, onde a degradação progressiva resulta em desertificação, sendo esse um fenômeno ambiental extremamente danoso em escala global, trazendo consigo maior vulnerabilidade social, econômica e desaparecimento de fauna nativa e mudanças na paisagem (REYNOLDS *et al.*, 2011; AQUINO; ALMEIDA; OLIVEIRA, 2012).

As alterações no uso e manejo do solo, ocasiona impactos negativos na sustentabilidade natural dos ecossistemas (TÓTOLA; CHAER, 2002) , uma vez que são ambientes complexos onde os fatores bióticos e abióticos estabelecem relações (ZANINETTI; MOREIRA; MORAES, 2017; PEREIRA, 2018).

Compreender e abordar os impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente é essencial, mas enfrenta desafios ao estudar a sustentabilidade, como o desenvolvimento de métodos para avaliar a qualidade do solo em ecossistemas influenciados pelo homem (MELLONI *et al.*, 2008), o reconhecimento da dificuldade do problema por falta de conhecimento abrangente (PACHECO *et al.*, 2018), e ausência da consolidação de um único método amplamente aceito para atribuir um índice de qualidade ao solo, dado à sua complexidade e variabilidade para analisar (CONCEIÇÃO *et al.*, 2005; KÄMPF; CURI, 2012).

Apesar desses desafios, estratégias voltadas à conservação da biodiversidade e a avaliação dos sistemas de uso da terra desempenham um papel importante no aumento da eficiência e compreensão do solo (VIAUD *et al.*, 2018), possibilitando minimizar os impactos negativos ao meio ambiente e promover estudos técnicos científicos para recuperação de áreas degradadas (ALVES *et al.*, 2014).

Ao avaliar os efeitos de sistemas de uso e manejo na qualidade do solo a matéria orgânica do solo (MOS) se destaca como um dos atributos mais utilizados (ARAÚJO *et al.*, 2012). Sua dinâmica no solo permite subsidiar o estabelecimento de estratégias de manejo que garantam o incremento ou a manutenção da qualidade do solo ao longo do tempo (GAZOLLA *et al.*, 2015), na qual é crucial para assegurar a sustentabilidade florestal e benefícios ambientais, como sequestradores e estocadores de carbono (BINKLEY; FISHER, 2019;

SILVA *et al.*, 2014).

A matéria orgânica do solo é constituída por cerca de 58% de carbono e a entrada desse elemento no solo está relacionada, principalmente, com o aporte de resíduos, nesse sentido surge como bom indicativo para compreender a qualidade de áreas degradadas, pois o carbono é o elemento mais presente, o que o torna fundamental nos compostos orgânicos presentes no solo, e é por meio dele que se estuda a caracterização, dinâmica e função da matéria orgânica (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o carbono oxidável como indicativo da qualidade do solo em áreas sob diferentes graus de degradação, partido da hipótese de que o teor de matéria orgânica do solo (MOS) é sensível ao tipo de uso, fazendo com que haja variabilidade e espacialização dos estoques de C no solo, os quais são indicadores-chave na prestação de benefícios ambientais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desertificação

O semiárido brasileiro é caracterizado por uma dinâmica atmosférica que condiciona a irregularidade de chuvas e a ocorrência de secas, fatores que criam ambiente propício para o desenvolvimento dos processos de desertificação (SIQUEIRA *et al.*, 1994). É um fenômeno amplamente presente nessa região do Brasil, e reconhecido oficialmente pela Convenção das Nações Unidas, sendo definida como a degradação de terras agricultáveis em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas do planeta. Esse processo resulta na destruição da base dos recursos naturais, como resultado da ação humana sobre o meio ambiente quanto de fenômenos naturais, como a variabilidade climática (BRASIL, 2004).

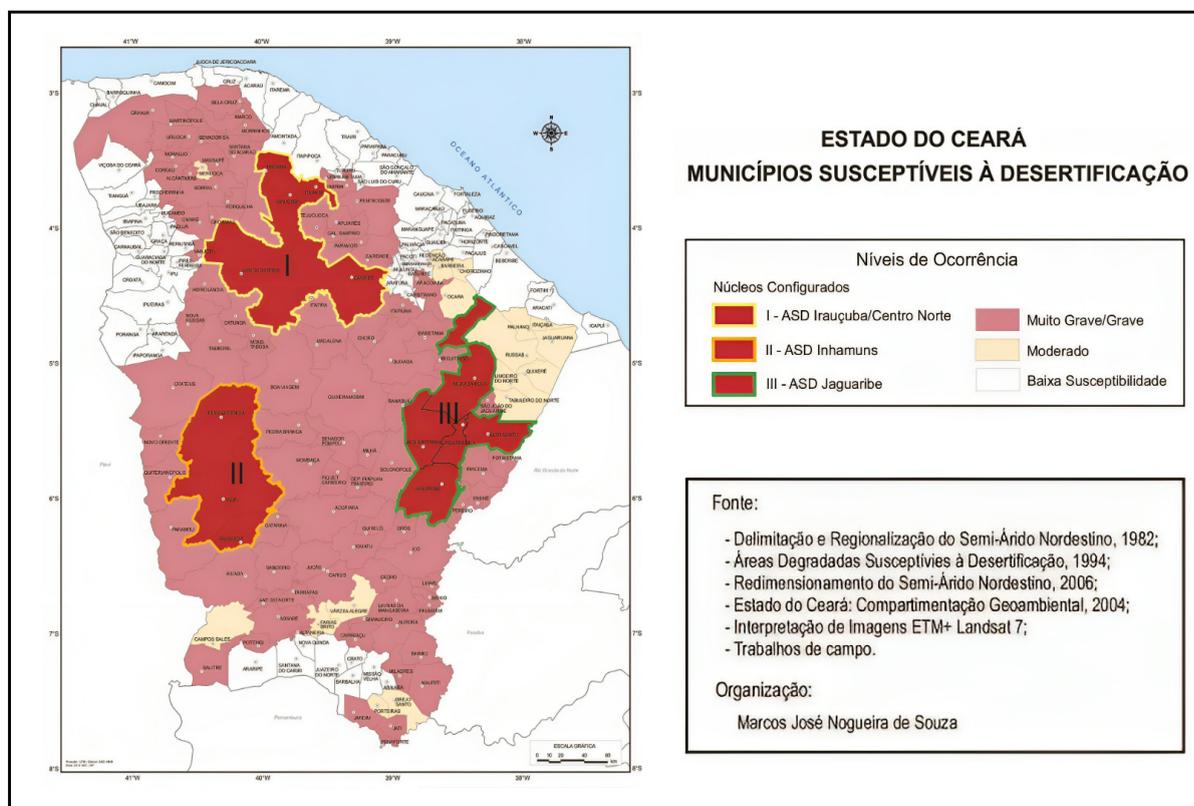
No Brasil os estados, Ceará e Pernambuco são os mais severamente afetados, enquanto, proporcionalmente, a Paraíba enfrenta a maior extensão de área comprometida, com 71% do seu território já sofrendo os efeitos da desertificação.

O Nordeste enfrenta o desafio da desertificação, com cerca de 200 mil km² de terras degradadas, algumas delas inadequadas para a prática agrícola. Além disso, há uma área adicional onde a desertificação ocorre moderadamente, elevando a extensão total afetada pelo fenômeno para aproximadamente 600 mil km², correspondendo a cerca de 1/3 de toda a extensão territorial do Nordeste, sendo uma das preocupações socioambientais, impactando a biodiversidade e ameaçando a segurança das populações locais (GUERRA; SOUZA; LUSTOZA, 2010) o que torna o município de Jaguaribe, um exemplo preocupante de desertificação (Figura 1) com seus 1.877 km² com cerca de 38% da área está sujeita a degradação.

Um dos processos centrais associados à desertificação tem início com o desmatamento e a substituição da vegetação nativa por culturas de porte e ciclo de vida rápido. Isso resulta na substituição da vegetação arbustiva e arbórea típica da caatinga por pastos herbáceos ou culturas de crescimento rápido. A exploração contínua dessas áreas, sem reposição adequada dos nutrientes retirados e com a colheita constante de produtos agrícolas, contribui para a perda de fertilidade do solo (DUBEUX JÚNIOR *et al.*, 2010; PEREZ-MARIN *et al.*, 2006). Um fator adicional na contribuição de desertificação é o uso de águas com altos níveis de sais e o manejo inadequado dos ciclos de irrigação levando à salinização do solo (LEAL *et al.*, 2008).

Entre os diversos processos impactantes no meio ambiente, destaca-se a erosão, considerada o principal agente de degradação do solo. Esse fenômeno gera desequilíbrio entre a vegetação, o solo e o clima, causando a perda gradual da fertilidade e contribuindo para os problemas associados à desertificação, deslocamento e a remoção de partículas finas e ativas do solo devido a fatores naturais ou ações humanas, como a água e o vento. Essa degradação do solo está diretamente associada à perda de qualidade e capacidade produtiva, sendo influenciada tanto por fatores naturais quanto por atividades antrópicas (LAL, 1990; GALINDO; SAMPAIO; MENEZES, 2005).

Figura 1 – Níveis de Ocorrência de desertificação e núcleos configurados.



Fonte: Programa de ação estadual de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca (PAECE, 2010).

Adaptado pelo autor.

2.2 A matéria orgânica do solo

A matéria orgânica exerce uma série de interações com os componentes do solo, atuando na regulação da disponibilidade de nutrientes, no controle da acidez e na redução da toxicidade de alumínio e metais pesados, também possui um papel fundamental na manutenção do teor de água no solo e no fornecimento de nutrientes através do aporte de palhas e resíduos orgânicos (FAGERIA, 2012). Pode representar, ainda, importante estratégia para o sequestro e estabilização do carbono (C) capturado da atmosfera pelas plantas, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas globais (LAL, 2007).

O termo MOS refere-se a todos os compostos que contêm carbono orgânico no solo, incluindo organismos vivos e mortos, resíduos de plantas e animais parcialmente decompostos, produtos de sua decomposição e substâncias orgânicas microbiologicamente e/ou quimicamente alteradas (MIELNICZUK, 2008). Os microrganismos, como elementos vivos da MO, são responsáveis pela decomposição de resíduos vegetais e animais, resultando na formação do húmus, que possui uma função primordial no solo, possibilitando melhorias na estrutura, aeração, retenção de umidade e incorporação de nutrientes (LEPSCH, 2002; SILVA; MENDONÇA, 2007) e a mudança de uso diminui o aporte de resíduo orgânico no solo, podendo ocasionar redução da MO (SOUZA, 2014).

A determinação das perdas pela mudança de uso da terra muitas vezes não é verificada em curto prazo (HAYNES, 1999), o motivo é pelo fato da MO ser formada por diferentes compartimentos com diferentes tempos de ciclagem, podendo ocasionar variações nos estoques de carbono orgânico, resultando na liberação de dióxido de carbono com reduções de até 50 % nos primeiros 20 cm de profundidade e de até 20 % na profundidade de um metro, potencializando o efeito estufa (MOREIRA, 2013).

Para o incremento da qualidade do solo ao longo do tempo é fundamental compreender a dinâmica da matéria orgânica para que se possam estabelecer estratégias de manejo que garantam a preservação (GAZOLLA *et al.*, 2015) e adoção de práticas agrícolas sustentáveis, visando a conservação da qualidade do solo e a redução dos impactos ambientais negativos, especialmente relacionados ao efeito estufa e os essenciais para assegurar a saúde do solo e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas ao longo do tempo (BARROS, 2013)

2.3 Compartimentos da matéria orgânica do solo

A MOS apresenta uma ampla gama de compostos orgânicos com diferentes níveis de complexidade e estruturas diversas tornando seu estudo como um todo um desafio significativo. Com base em sua diversidade, a MOS pode ser categorizada em compartimentos distintos, abordados por diversos modelos conceituais que consideram fatores como localização, composição química ou estabilidade dos materiais orgânicos (DIEKOW, 2003).

O grau de estabilidade que essas frações orgânicas possuem ao ataque microbiano definem se a matéria orgânica no solo é considerada como lábil ou estável. Essa classificação é baseada na taxa de decomposição, o que proporciona uma melhor compreensão da dinâmica desse componente (STEVENSON, 1994; BALDOCK; NELSON, 2000; PASSOS *et al.*, 2007).

Os constituintes lábeis englobam os resíduos de plantas em decomposição, substâncias não húmicas não ligadas aos constituintes minerais, formas solúveis em água, macrorganismos (fauna) e biomassa microbiana, sendo às formas que são facilmente mineralizadas, servindo de fonte de nutrientes para as plantas e de energia para os microrganismos do solo (SILVA; MENDONÇA, 2007; PASSOS *et al.*, 2007). Possuem uma mineralização rápida, ocorrendo em questão de semanas ou meses e apresentam um carbono lábil que representa de 1/3 a 1/4 da matéria orgânica total do solo em regiões temperadas (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992), é menor em regiões tropicais (ZECH *et al.*, 1997).

A fração estável é composta por substâncias húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e húmica) e outras macromoléculas orgânicas intrinsecamente resistentes ao ataque microbiano (lignina), sendo protegidas pela associação com componentes minerais do solo ou podendo estar intragregadas de forma inacessível aos microrganismos devido à sua complexa estrutura molecular e à proteção física que apresentam diferentes elementos, mas predominam principalmente por carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e fósforo (P) (SILVA; MENDONÇA, 2007; PASSOS *et al.*, 2007)

Compreender a distinção entre os componentes lábeis e estáveis da matéria orgânica, bem como a importância crucial do carbono em sua dinâmica é essencial, permite uma melhor compreensão da complexidade e do papel fundamental desempenhado pela MO nos processos do solo e estratégia para o sequestro e estabilização do carbono (C) capturado da atmosfera pelas plantas, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas globais (LAL *et al.*, 2007).

2.4 Frações oxidáveis e lábeis de carbono do solo

O solo desempenha um papel fundamental no processo de emissão e sequestro de carbono (C), apresentando uma quantidade significativamente maior desse elemento em comparação com a vegetação e a atmosfera, porém, a transformação do uso dos ecossistemas naturais resulta na substituição de sistemas complexos e estáveis, por sistemas simples e instáveis, afeta assim os estoques dos componentes orgânicos do solo e altera o equilíbrio dos ciclos de carbono, levando à redução da quantidade e modificação da qualidade da matéria orgânica do solo (BERNOUX *et al.*, 2002; BARROS, 2011).

Compreender essa relação do reservatório de carbono no solo com as mudanças ambientais e de manejo é de suma importância para enfrentar as mudanças climáticas e promover um manejo sustentável do solo (LUO *et al.*, 2017).

O carbono orgânico do solo (COS) é importante na melhoria das propriedades do solo (IWATA *et al.*, 2010), sua dinâmica no solo é influenciada por três tipos de variáveis: ambientais ou condições edafoclimáticas, bióticas da fauna edáfica e antrópica, incluindo práticas agrícolas, bem como suas interações, no qual os processos de erosão, decomposição, volatilização e lixiviação responsável pelas variações no estoque de carbono no solo (MCSHERRY; RITCHIE, 2013). A compreensão dessas interações é fundamental para aprimorar as práticas de manejo agrícola, promover a conservação e contribuir para mitigar as emissões de CO₂ provenientes da agricultura, favorecendo, assim, a redução das emissões de gases de efeito estufa causadas pela atividade humana.

Apenas analisar as variações nos teores de carbono orgânico total (COT) não é suficiente para compreender completamente o impacto do manejo do solo em algumas situações. É imprescindível conhecer a distribuição dos diferentes compartimentos que compõem a MOS, incluindo o carbono das frações oxidáveis (ROSSET *et al.*, 2016).

Quanto ao grau de oxidação, o carbono pode ser dividido em quatro frações: fração 1 (F1), fração 2 (F2), fração (F3) e fração (F4). As duas primeiras (F1 e F2) estão relacionadas à disponibilidade de carbono a microorganismo e plantas, formação e estabilização dos agregados no solo (BLAIR; LEFROY; LISLEY, 1995; CHAN; BOWMAN; OATES, 2001). A Fração 1 (F1) apresenta uma alta correlação com a fração leve da MOS (MENDONÇA; MATOS, 2005; MAIA *et al.*, 2007). As frações F3 e F4, por outro lado, estão associadas a compostos de maior estabilidade química e massa molar, provenientes da decomposição e humificação da MOS (STEVENSON, 1994). A fração 4 (F4) é considerada a mais resistente do solo, sendo

identificada como o compartimento passivo nos modelos de simulação da MOS, com um tempo de reciclagem que pode chegar a até 2000 anos (CHAN; BOWMAN; OATES, 2001).

As diversas frações de carbono desempenham diferentes funções ecossistêmicas na reciclagem do carbono orgânico total, variando desde o auxílio no fornecimento de nutrientes até a estabilidade coloidal (OLIVEIRA *et al.*, 2018), um exemplo é o carbono lábil, que é um indicador químico usado para avaliar as mudanças no uso do solo ao longo de períodos curtos ou longos, sua labilidade do carbono é determinada pela facilidade com que certos compostos orgânicos são mineralizados por microrganismos no solo são fundamentais para compreender a dinâmica do carbono no solo, sua interação com o manejo agrícola e sua relevância para a estabilidade e sustentabilidade do ecossistema (RANGEL *et al.*, 2008; SILVA; MENDONÇA; 2007).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

A área que compreende o presente estudo fica na localidade do Brum, Distrito de Mapuá, situada no município de Jaguaribe (Figura 2), no estado do Ceará, a cerca de 345 km de Fortaleza, com acesso pela BR-116. A área se localiza entre os paralelos $06^{\circ} 11' 01''$ e $06^{\circ} 11' 15''$ de latitude sul e os meridianos $38^{\circ} 39' 39''$ e $38^{\circ} 39' 29''$ de longitude a oeste de Greenwich, estando a montante do açude Castanhão, fazendo parte da Bacia Hidrográfica do Médio Jaguaribe. Esta região é categorizada pelo clima semiárido típico do Brasil, conforme a classificação de Koppen, caracterizado como BSh'w' (semiárido quente). A temperatura média se mantém em torno de 28°C , variando entre mínimas de $22,4^{\circ}\text{C}$ e máximas de $33,5^{\circ}\text{C}$. No ano de 2022, a temperatura média registrou mínimas de 23°C e máximas de $29,9^{\circ}\text{C}$, um pico de temperatura máxima atingindo $49,2^{\circ}\text{C}$, conforme dados do (INMET, 2022).

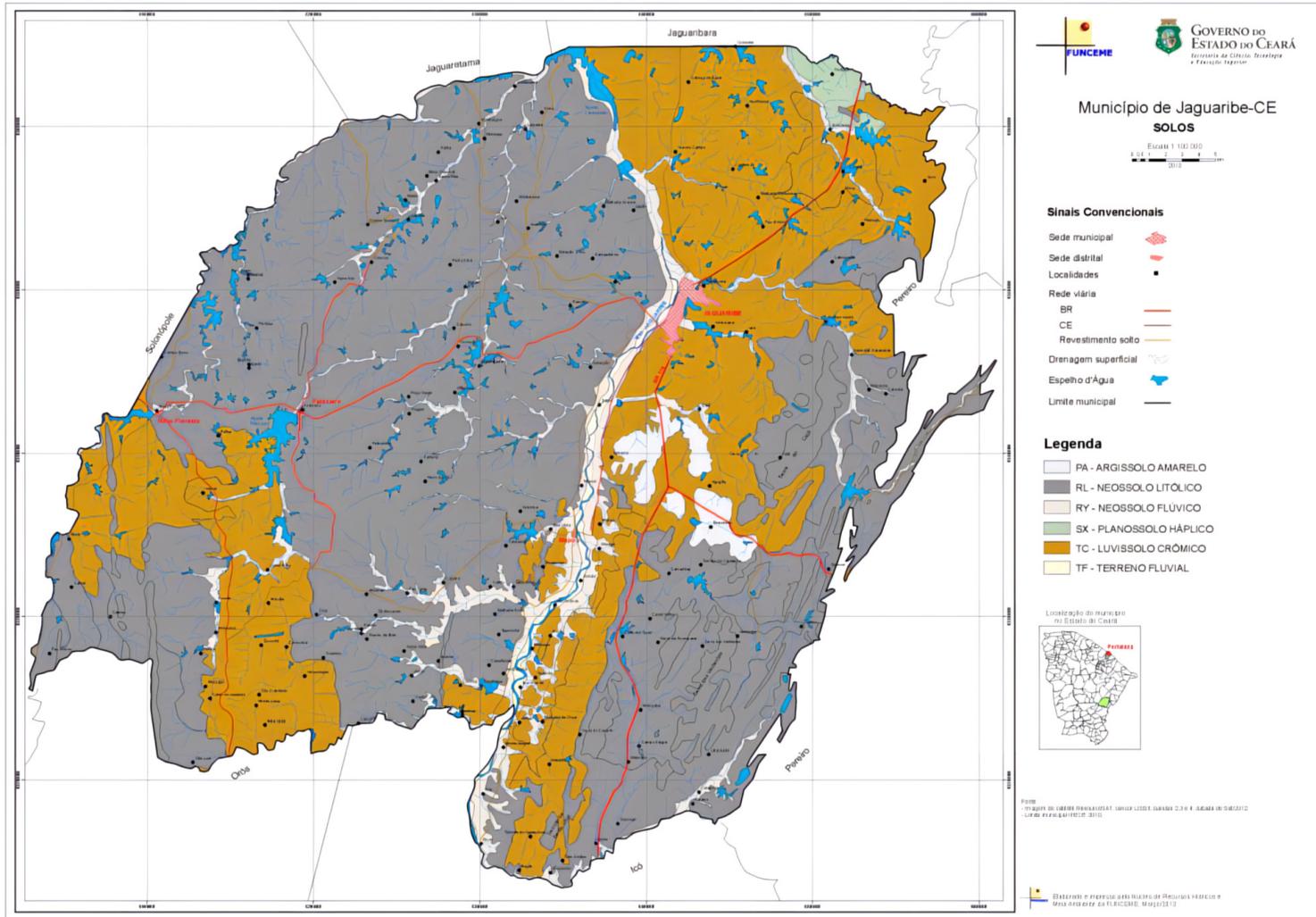
Figura 2 – Localização da área de estudo.



Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (2016 p.18). Adaptada pelo autor.

O Município Jaguaribe possui histórico de práticas de agropecuária e plantio de algodão (GUERRA; SOUZA; LUSTOSA, 2010) e apresenta perfil de solo do tipo Argissolo amarelo, Neossolo litólico, Neossolo flúvico, Planossolo háplico, Luvisolo crômico e Terreno fluvial (Figura 3).

Figura 3 - Mapa do Município de Jaguarib, CE. que apresenta os perfis de solos.



Fonte: Brasil (1973)

O local escolhido fica em um dos núcleos de maior suscetibilidade aos processos de desertificação no estado, de acordo com o (PAE-CE, 2010). O distrito do Brum está inserido no Núcleo III - Médio Jaguaribe. A área selecionada encontrava-se em condições bastante degradadas e já sem uso agrícola, apresentando elevado nível de erosão e intenso processo degenerativo dos recursos naturais: solo, cobertura vegetal e água (FUNCEME, 2016). Essas áreas são caracterizadas, em geral, pela degradação quase irreversível da cobertura vegetal, acentuada erosão dos solos, assoreamento de reservatórios e cursos d'água, além da baixa capacidade produtiva das terras e empobrecimento generalizado da biodiversidade.

Na área mesmo no período chuvoso quando a Caatinga tende a recuperar sua condição natural, em muitos locais a vegetação não regenera (Figura 4), deixando o solo exposto e agravando o processo de erosão que elimina a camada superficial agricultável e ainda contribui para o assoreamento dos corpos d'água (FUNCEME, 2016). Essa situação reflete a urgência de adotar medidas sustentáveis e políticas de manejo adequado para preservar e recuperar o ecossistema local, garantindo a proteção dos recursos naturais e a melhoria da qualidade de vida.

Figura 4 – Aspecto da área de estudo no início do projeto de recuperação, antes das intervenções, comparando período seco e período chuvoso.



Figura A - Aspectos da erosão e cobertura vegetal no período seco (nov./2012).



Figura B - Aspectos da erosão e da cobertura vegetal no período chuvoso (mai./2012).

Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (2016 p.34). Adaptada pelo autor.

3.2 Histórico da área e amostragem do solo

Na localidade do Brum, foram selecionadas três áreas que apresentam distintos históricos (Tabela 1) no que se refere à utilização do solo: Área A degradada, Área B em recuperação e Área C com vegetação secundária sem intervenções como controle (Figura 5). Para cada área, foram coletadas cinco amostras compostas na camada de 0-20 cm, posteriormente, as amostras foram expostas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de diâmetro e malha de 2 mm (terra fina seca ao ar).

Figura 5 – Áreas de estudo na comunidade de Mapuá: (A) degradada, (B) em recuperação e (C) controle, vegetação secundária sem intervenções.



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Histórico de uso das áreas da comunidade Mapuá no Município de Jaguaribe, CE.

Área	Histórico
Degradada	Prática da pecuária extensiva, cultivo do algodão e da agricultura de subsistência em períodos anteriores. Houve também extrativismo vegetal indiscriminado, a agricultura praticada com tecnologias muito rudimentares e queimadas, atualmente a área está abandonada a cerca de duas décadas.
Em recuperação	O processo de recuperação envolveu escarificação e sulcamento, montagem de barramentos de pedras para contenção de sedimentos, terraceamento para o controle de erosão e acúmulo de umidade, além da aplicação de serapilheira e esterco de curral.
Controle	Não passou por intervenções, consiste em vegetação secundária com cerca de duas décadas sem desenvolvimento, com ocasionais práticas de pastoreio.

Os solos na região de estudo podem ser classificados como Neossolo Litólico eutrófico fragmentário e Luvisolo crômico órtico típico (Apêndice A), conforme relatado pelo FUNCEME em 2016 (Figura 6).

Figura 6 – Perfis de solos encontrados nas áreas de estudo (A) Neossolo litólico eutrófico fragmentário e (B) Luvisolo crômico órtico típico.

Fonte: (FUNCEME, 2016).

3.3 Análise química do solo

A caracterização química dos elementos seguiu as metodologias detalhadas por (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Com o pH avaliado em água (1:2,5). As bases trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+) sendo extraídas utilizando uma solução de acetato de amônio a pH 7,0 e sua quantificação foi realizada através de fotometria de chama para K^+ e Na^+ , e espectrometria de absorção atômica, para Ca^{2+} e Mg^{2+} e a acidez potencial (H^+Al^{3+}) foi obtida pela extração com solução de acetato de cálcio e titulada com NaOH. Com os resultados obtidos, foi possível calcular a soma de bases (SB) e a capacidade de troca de cátions (CTC).

Os micronutrientes (Cu, Zn, Fe e Mn) foram extraídos utilizando Mehlich⁻¹, e quantificados por espectrometria de absorção atômica. O fósforo (P) foi extraído com Mehlich⁻¹ e sua concentração foi determinada por meio da técnica colorimétrica, com leitura no comprimento de onda de 660 nm. O carbono orgânico total (COT), determinado por oxidação com dicromato de potássio a uma concentração de 0,5 mol L⁻¹ em ambiente ácido, com aquecimento externo (YEOMANS; BREOMAN, 1988). Dados da Caracterização químicas dos pontos em Anexo B.

3.4 Frações do carbono oxidável do solo

As frações de carbono orgânico oxidável foram quantificadas pesando três sub-amostras de 0,5 g de solo em Erlenmeyer de 250 mL e adicionados 10 mL de dicromato de potássio 0,167 mol L⁻¹. A primeira sub-amostra recebeu a adição de 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado, resultando em uma proporção ácido-aquosa de 0,25:1. Na segunda sub-amostra, foram adicionados 5,0 mL de ácido sulfúrico concentrado, resultando em uma proporção ácido-aquosa de 0,5:1. Já na terceira sub-amostra, adicionou-se 10 mL de ácido sulfúrico concentrado, atingindo uma proporção ácido-aquosa de 1:1. Isso resultou em concentrações finais de 3 mol L⁻¹, 6 mol L⁻¹, e 9 mol L⁻¹ de ácido sulfúrico, respectivamente (MENDONÇA; MATOS; 2005).

As frações resultantes foram definidas da seguinte maneira: A fração 1 (F1) correspondeu ao teor de carbono obtido na concentração de 3 mol L⁻¹ de ácido sulfúrico. A fração 2 (F2) foi calculada pela diferença entre as concentrações de 6 mol L⁻¹ e 3 mol L⁻¹. A fração 3 (F3) obtida pela diferença entre as concentrações de 9 mol L⁻¹ e 6 mol L⁻¹. A fração 4 (F4) é calculada subtraindo o carbono orgânico total do carbono oxidável extraído por uma solução de ácido sulfúrico 9 mol L⁻¹ (MENDONÇA; MATOS; 2005).

Com base nas análises realizadas e considerando que a fração 1 representa o carbono lábil do solo (CL) , foram determinados diversos parâmetros. O Índice de Compartimento de Carbono (ICC) expressa as mudanças no Carbono Orgânico Total (COT) entre um sistema de uso e um sistema de referência ($ICC = COT \text{ uso} / COT \text{ referência}$). O carbono não lábil (CNL) foi definido como a diferença entre o COT e o CL. A labilidade do carbono (L) foi calculada como a razão entre CL e CNL. O Índice de Labilidade (IL) foi obtido pela relação entre L no sistema de cultivo e L no sistema de referência. O Índice de Manejo de Carbono (IMC) foi calculado pela fórmula $IMC = ICC \times IL \times 100$ (PESSOA, 2011). Esses índices que incorporam a variável do carbono (C) têm sido empregados em estudos que monitoram a degradação do solo em relação ao seu uso (COLLAR; ZAMMIT, 2006; WENDKING *et al.*, 2008)

3.5 Análise física

A análise granulométrica foi o método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986). Para essa análise, o NaOH 0,5 mol/L foi o dispersante. A fração de areia foi separada por meio de peneiramento(EMBRAPA, 1997).

3.6 Análise estatística

A avaliação estatística dos dados foi executada utilizando o software estatístico SPEED stat 2.5. Foi realizada uma análise de variância, seguida pela comparação das médias por meio do teste de Dunnett ao nível de significância de 1 %.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos do solo

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram considerados elevados em todas as áreas, o que pode ser explicado pela origem calcária desses solos (BRASIL, 1981). Na profundidade de 0-20 cm, a área degradada e de recuperação não apresentaram valores significância estatística para Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (Tabela 2), mesmo os valores sendo maiores que o de controle.

O COT foi mais proeminente na área de controle e não diferiu da área em processo de recuperação, essa melhoria no teor está relacionado com aporte de serrapilheira em sulcos no terreno e aplicação do esterco de curral, contribuindo para aumentos na fertilidade do solo, tornando a área em recuperação próxima das condições naturais (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Na área degradada o COT apresentou diferença negativa em relação a área de controle, havendo uma perda desse carbono por causa da degradação impactando a saúde do solo, tornando ele mais suscetível a processo de degradação. O sódio também diferiu na área degradada isso pode estar relacionado com o tipo de perfil de solo já que na área apresenta um Neossolo litólico (Anexo A), em regiões áridas, a evaporação da água do solo pode levar ao acúmulo de sais na superfície afetando a capacidade do solo de sustentar a vegetação.

Tabela 2. Médias das características químicas dos solos com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe, CE.

Área	COT	pH	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H + Al	CTC
	g kg^{-1}	(H ₂ O)	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$					
Degradada	3,08	6,35	0,31	0,59**	4,56	1,52	0,71	7,68**
Recuperação	5,74	6,37	0,46	0,25	4,64	1,56	0,83**	7,74**
Controle	6,10**	6,28	0,32	0,11	3,17	0,81	0,60	5,00

Médias seguidas de (**) diferem do grupo de controle pelo teste de Dunnett *et al* a 1 % de significância.

Os solos das áreas degradadas e dá controle apresentam uma baixa acidez ativa, com valores de pH entre 6,07 e 6,46 e na área em recuperação, observou-se um valor mais elevado de 6,10, já em relação a acidez potencial (H + Al) possui uma diferença estatística na área de recuperação, relacionado com a entrada de matéria orgânica na área.

Houve diferença da área degradada e controle na CTC, a área degradada ocorre a presença de maior intensidade de erosão, havendo perdas das camadas superficiais do solo,

que frequentemente são ricas em argila e nutrientes, deixando camadas mais ricas em minerais, como cálcio e magnésio, apresentando maior quantidade deste elemento na caracterização. Esse processo se relaciona com a natureza do material original do solo (BRASIL, 1981) fazendo que haja maior soma de bases. Já a área de recuperação apresenta essa CTC se diferenciando pela a entrada dessas bases trocáveis na área, por meio da incorporação de resíduos vegetais e esterco de curral, contribui para aumentos na fertilidade do solo (FUCEME, 2016).

4.2 Micronutrientes

Em relação aos micronutrientes a área degradada e em recuperação têm teores de Fe (Tabela 3) menor que a área de controle, portanto houve perdas desse elemento por causa de seu histórico de uso, e mesmo com aporte de resíduos feitos na área de recuperação não foram suficientes para tornar os valores próximos. O Cu e Zn não teve diferença nas áreas de estudo, mas a área em recuperação apresentou valores mais próximos do controle, chegando até ser superior no Zn, mostrando assim que práticas de recuperação trazem benefício aos atributos do solo melhorando sua característica química. O Zn na área degradada apresentou valor 30 % menor que a área de controle, como é um elemento que no solo fica adsorvido aos colóides do solo o processo de erosão está sendo responsável pela diminuição do teor do elemento, o mesmo acontece com Cu sendo um perda de 20 %.

O Mn apresentou um valor negativo significativo na área degradada, com perda de quase 50 % em relação a área de controle, sua perda representa dificuldade para manutenção da saúde das plantas na área, pois é um micronutriente essencial relacionado ao crescimento, além disso, se a lixiviação de Mn atingir corpos hídricos, pode haver preocupações ambientais por concentrações afetando a qualidade de água. Na área de recuperação não houve diferença nos teores, indica a retomada do elemento para ciclagem de elementos. A influência das práticas de manejo adotadas na área de recuperação, como a incorporação de resíduos vegetais contribui para aumentos na fertilidade do solo, isso aproxima a área das condições naturais (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Tabela 3. Médias dos nutrientes do solo em áreas sob graus de degradação no Município de Jaguaribe-CE.

Área	Fe	Cu	Mn	Zn
Degradada	37,62**	0,48	30,60**	0,93
Recuperação	25,97**	0,59	64,71	1,72
Controle	60,14	0,62	69,79	1,34

Médias seguidas de (**) diferem do grupo de controle pelo teste de Dunnett *et al* a 1 % de significância.

4.3 Frações do carbono oxidável

Ao analisar o comportamento das frações de carbono oxidável, os teores de estoques de carbono lábil (F1 e F2) foram afetados de forma distinta pelos graus de degradação presente nas áreas, valores mais elevados de carbono lábil na área em processo de recuperação é atribuída às práticas de manejo sustentável (Tabela 1). O carbono lábil é uma forma mais prontamente disponível para os microrganismos, com o aumento de seu teor promove a atividade biológica e, assim auxilia no ciclo de nutrientes e tornando esse solo mais resiliente a mudanças ambientais e estresses, proporcionando base para um ecossistema saudável.

A área degradada (Tabela 4) não destoa do controle na fração F1 e F2, os valores são próximos mostrando nenhuma alteração, a presença da erosão na área degradada está remove a camada superficial, expondo camadas menos decompostas e tornando o carbono menos complexo na área, sendo um problema ao afeta o estoque do elemento na área, impactando na biodiversidade, por apresentar valores iguais ao controle por causa da diminuição de frações mais recalcitrantes de carbono.

Análises referentes às frações oxidáveis do carbono orgânico do solo revelam que os maiores teores de carbono na fração F1 costumam ocorrer em regiões onde há a entrada de matéria orgânica por meio de resíduos vegetais (BLAIR; LEFROY; LISLEY, 1995; CHAN *et al.*, 2001; RANGEL *et al.*, 2008; PESSOA, 2012), como ocorre na área de recuperação pela incorporação de material vegetal (serrapilheira) atuando como condicionador de solo, melhorando a estrutura e liberação de nutrientes.

Tabela 4. Médias de frações de carbono orgânico oxidável (F1, F2, F3 e F4) em áreas com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe, CE.

Área	F1	F2	F3	F4	F1+F2	F3+F4
	dag kg ⁻¹					
Degradada	0,28	0,07	0,05	2,90**	0,35	2,95**
Recuperação	0,38	0,10	0,19 **	5,64	0,48	5,64
Controle	0,29	0,07	0,06	5,92	0,36	5,92

Médias seguidas de (**) diferem do grupo de controle pelo teste de Dunnett *et al* a 1 % de significância.

A fração F3 apresenta diferença positiva na área de recuperação, mostrando que se tem um aumento no estoque de carbono do solo, indica que o solo está se recuperando e tornando mais resiliente a mudanças externas, crucial para garantir resiliência do ecossistema. Representa também ganhos na estrutura do solo por essa fração está relacionada à porosidade e a capacidade de retenção de água no solo, mostrando que a prática adotada na área B (Tabela 1) está contribuindo para a qualidade do solo.

A área degradada apresenta perda de mais de 50 % da fração F4, baixo valor de carbono oxidável nessa fração, sugere uma diminuição na quantidade de substâncias húmicas estáveis e a capacidade do solo em fornecer nutrientes ao longo do tempo, comprometendo a saúde e a fertilidade do solo, afeta também a estrutura do solo tornando mais propenso a compactação, erosão e redução da permeabilidade. O baixo valor de F4 no solo, indica uma redução em reter água, tornando o solo suscetível à seca e a falta de água para plantas, acúmulo de sódio na superfície e a capacidade de resistir ao impacto das gotas de chuvas.

O ideal é que possua um equilíbrio nos teores de carbono dessas frações (F1, F2, F3 e F4), no entanto, o que se constatou na área degradada é um desequilíbrio, tornando esta área menos resiliente a mudanças climáticas ambientais, mais suscetível a processo de degradação, isso inclui a perda de solo fértil e diminuição da capacidade do solo em sustentar vegetação, além de impactar a atividade da microbiota havendo variação na decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, comprovando a vulnerabilidade dela frente aos efeitos da degradação.

4.4 Índices de qualidade do solo

O alto índice CL (carbono lábil) na área de recuperação é positivo, indica que o carbono no solo está mais propenso a ser decomposto, indica alta atividade microbiana, fundamental para a decomposição da matéria orgânica e a liberação de nutrientes, favorecendo a ciclagem de nutrientes e o desenvolvimento vegetal. Já na área degradada não difere do controle, pode indicar uma falta de estabilidade ao longo prazo, a rápida decomposição de MO diminui a cobertura do solo, aumentando a perda de solo em eventos de chuvas.

No que diz respeito ao teor de carbono nas formas não lábeis (CNL) nos distintos graus de degradação, percebe-se que o controle exibiu um valor médio superior ($5,78 \text{ dag kg}^{-1}$), seguida pela área de recuperação ($5,57 \text{ dag kg}^{-1}$) sendo iguais. A área degradada se destaca pela perda de mais de 50 % ao se considerar o índice de carbono não lábil, aponta exaustão do recurso através de processos degradativos, resulta em menor capacidade de recuperação rápida do solo a distúrbios, além de que essa perda de carbono não lábil tem implicações para o ciclo global do carbono e podem influenciar as emissões de gases do efeito estufa.

Ao analisar o comportamento das áreas, a área em processo de recuperação apresentou um Índice de Carbono Conservado (ICC) muito próximo ao do controle. Em contrapartida, a área degradada demonstrou um ICC inferior ao do grupo de controle, e essa diferença se revelou significativa, representando ineficiência de 50 % na promoção da ciclagem e retenção de carbono no solo e potencial para o sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

A labilidade (L), que relaciona o carbono considerado lábil ao COT, revelou que o solo da área degradada apresenta valores em torno de 0,1 (Tabela 5), indicando cerca de 10% de carbono lábil, essa porcentagem supera os valores alcançados na área de controle, se alinha com o Índice de Labilidade (IL) das áreas, que ultrapassam o valor 1, aponta uma concentração mais expressiva de carbono lábil menos complexo e mais disponível, sendo esse mais suscetível a perda, o que pode resultar em maior disponibilidade do carbono a atmosfera por causa de efeitos de degradação.

Os resultados com base do Índice de Manejo de Carbono (IMC), mostra uma redução nos teores de carbono no solo em valores de IMC abaixo de 100 %, como na área degradada possuindo 84,41 %, área de recuperação apresenta um acréscimo 35,26 %, indicando que as práticas conservacionistas usadas (Tabela 1) apresentaram impacto no manejo do carbono da

área, sugerindo uma retomada da sustentabilidade do sistema, eficiência na promoção da ciclagem e retenção de carbono no solo e maior potencial para o sequestro de carbono, contribuindo para mitigação das mudanças climáticas.

Tabela 5. Índice de solo CL (carbono lábil), CNL (Carbono não lábil), ICC (Índice de compartilhamento do carbono), L (lábil), IL (Índice de labilidade) e IMC (Índice de manejo do carbono) em áreas com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe-CE.

Área	CL	CNL	ICC	L	IL	IMC
	___ dag kg ⁻¹ ___					----%----
Degradada	0,25	2,60**	0,47**	0,10**	1,80**	84,41
Recuperação	0,41**	5,57	0,98	0,07	1,37	135,26**
Controle	0,31	5,78	1,00	0,05	1,00	100,00

Médias seguidas de (**) diferem do grupo de controle pelo teste de Dunnett *et al* a 1 % de significância.

4.5 Granulometria

Os resultados revelaram que o solo exibe uma textura predominantemente média, sendo classificado como franco-arenoso, como indicado na (Tabela 6). Apresenta proporções equilibradas de areia, silte e argila, mas com uma presença perceptível de partículas de areia, o que atribui característica de ter uma boa drenagem, potencial moderado de retenção de água

Tabela 6. Granulometria de solos da comunidade Mapuá com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe, CE.

Área	Areia	Silte	Argila	Sil/Arg	Textura
	_____ g kg ⁻¹ _____				
Degradada	666	197	137	0,07	Franco-arenoso
Em recuperação	658	221	121	0,06	Franco-arenoso
Controle	771	147	82	0,04	Franco-arenoso

5 CONCLUSÕES

As intervenções, em forma de práticas de manejo adequadas, exerceram um impacto positivo na distribuição das frações oxidáveis do carbono orgânico do solo. Essa ação trouxe à retomada a um equilíbrio entre a matéria orgânica mais suscetível (F1 e F2) e a matéria orgânica mais resistente (F3 e F4).

A área degradada ocasionou uma redução em grande parte das variáveis analisadas, evidenciando as mais expressivas diminuições nos teores de COT, incluindo nas frações mais recalcitrantes, como F3 e F4.

A dinâmica do carbono oxidável emergiu como um indicador de grande valor intrínseco para discernir a qualidade do solo.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. F. A. et al. Técnicas sustentáveis de convivência com a seca no semiárido: estudo de caso no município de São Bentinho-PB. **Informativo Técnico do Semiárido**, v. 8, n. 2, p. 01-03, dez.2014.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012.
- BALDOCK, J. A.; NELSON, P. N. Soil organic matter. In: SUMMER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Georgia, USA: University of Georgia, 2000. p.B25-B84.
- BARROS, J. D. S. Contribuições da matéria orgânica do solo para mitigar as emissões agrícolas de gases de efeito estufa. **Polêmica**, v. 12, n. 2, p. 341-351, 2013.
- BARROS, J. D. de S. **Estoques de carbono em solos dos Tabuleiros Costeiros Paraibanos: diferenças entre ambientes**. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 106 f, 2011.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. D. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil soil carbon stocks. **Soil Science Society of América Journal**, v. 66, n. 3, p. 888-896, 2002.
- BINKLEY, D.; FISHER, R. F. **Ecology and management of forest soils**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2019. 440 p.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B. , Lisle, L., 1995. **Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index**. Aust. J. Agric. Res. 46, 1459–1466.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisas Agropecuária. Divisão de Pesquisas Agropecuárias. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento exploratório - reconhecimento dos solos do Estado do Ceará**. v. 2. Boletim Técnico, 28, Brasil, SUDENE - DRN. Divisão de Agroecologia - Série Pedologia, 16. Recife, 1973.

BRASIL. Ministério das Minas e Energias. Secretaria-Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folhas SB. 24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1981. 744p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretária de Recursos Hídricos. **Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca: PAN-BRASIL**. Brasília, DF, 2004. 213 p.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p.777-783, 1992.

COLLARD, S. J.; ZAMMIT, C. Effects of land-use intensification on soil carbon and ecosystem services in Brigalow (*Acacia harpophylla*) landscapes of southeast Queensland, Australia. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 117: 185-194, 2006.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; SAPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 05, p. 777-788, 2005.

CHAN, K. Y.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture ley. **Soil Science** 166: 61-67, 2001.

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto** 2003. 164p. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997.212p.

FAGERIA, N. K. Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 43, n. 16, p. 2063-2113, 2012.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos; MMA, Ministério do Meio Ambiente/FNMC. **Recuperação de área degradada em processo de desertificação na sub-bacia hidrográfica do riacho do Brum no município de Jaguaribe-CE**. Resumo Técnico. Fortaleza. 2016.

FUNCEME. **Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos**. Compartimentação Geoambiental do Estado do Ceará. Funceme. Fortaleza, 2009.

GALINDO, I. C. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C. Uso da palma na conservação dos solos. In: MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. (Ed.). **A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005. p. 163-176.

GAZOLLA, P. R., GUARESCHI, R. F., PERIN, A., PEREIRA, M. G., ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis Physical and mineralogical methods. Madison, **Soil Science Society of America**, v. 5, p. 383-411, 1986.

GUERRA, M. D. F.; Souza, M. J. N.; Lustosa, J. P. G. Desertificação em áreas semiáridas do nordeste brasileiro: o caso do município de Jaguaribe, Ceará. **Revista de Geografia**, v. especial SINAGEO, 2, 2010.

HAYNES R.J., Labile organic matter fractions and aggregate stability under short-term, grass-based leys, **Soil Biol. Biochem.** v. 31, n. 13, pág. 1821-1830, 1999.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia do BRASIL, Normais Climatológicas. Brasília - DF, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 18 maio. 2022.

IWATA, B. de F.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F.; BRASIL, E. L.; COSTA, C. do N.; CAMPOS, L. P.; SANTOS, F. S. R. dos. Carbono total e carbono microbiano de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no cerrado piauiense. In: **REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA**, v. 18, 2010.

KÄMPF, N. ; CURI, N. (Org.). Conceito de solo e sua evolução histórica. In: KER, J. C . et al. **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2012. p. 1-20.

KOPPEN, Wladimir. Das geographische **System de Klimate**. In: Handbuch der Klimatologie, 1936.

LAL, R. Carbon management in agricultural soils. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 12: p. 303-322, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-006-9036-7>.

LAL, R.. **Soil Erosion In The Tropics: Principles e Management**. McGrawHill, United States of America, 580p., 1990.

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. S.; MONTENEGRO, A. A. .A; FERREIRA, F. L. 2008. Fitorremediação de Solo Salino Sódico por *Atriplex nummularia* e Gesso de Jazida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.**, v.32, n.3, 1065-1072, 2008.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. Uberlândia: Oficina dos textos, 2002. 178p.

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; SENNA, O. T.; MENDONÇA, E. S.; ARAUJO, J. A. 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.

MCSHERRY, M & RITCHIE, M.E. Effects of grazing on grassland soil carbon density: a global review. **Global Change Biology**, Oxford, v.19, p.1347-1357, 2013

MENDONÇA, E. D. S.; MATOS, E. D. S. **Matéria Orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, M. I. N.; VIEIRA, F. B. M. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 06, p. 2461-2470, 2008.

MOREIRA, M. M. **Estoque de carbono e nitrogênio em áreas de vegetação nativa e antropizada no município de Irecê**. Dissertação (Mestrado em Solos e Qualidade de Ecossistemas), Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, 2013.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). (2008). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole. p.1-5.

OLIVEIRA, T. D.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; NANZER, M. C.; BARRETA, P. G. V; SILVA, M. F. G.; Do PRADO, E. A. F., Carbono lábil e frações oxidáveis de carbono em solos cultivados sob diferentes formas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 8, n. 4, 2018.

PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L.F.S.; JUNIOR, R. F. V.; VALERA, C. A.; Pissarra, T. C. T , **Land degradation: Multiple environmental consequences and routes to neutrality**. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v.5, p.79-86, 2018.
Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>

PASSOS, R. R.; RUIZ, H. A.; CANTARUTTI, R. B.; MENDONÇA, E. de S. Carbono orgânico e nitrogênio em agregados de um Latossolo Vermelho Distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1109-1118, 2007.

PAVINATO, O. S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo: Decomposição e Liberação de Compostos Orgânicos e Resíduos Vegetais, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:911-920, 2008.

PEREZ-MARIN, A.M.; MENEZES, R.S.C.; DIAS, E.M.; SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no agreste paraibano. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.30, p.555-564, 2006.

PEREIRA, E. M., Sensibilidade ecológica e ambientalismo: uma reflexão sobre as relações humanos-natureza, **Sociologias**, p. 49. 2018.

PESSOA, P. A. Frações de carbono orgânico de um Latossolo húmico sob diferentes usos no agreste brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 97-104, 2012.

PESSOA, P. M. A. **Biomassa microbiana, frações de carbono e fósforo orgânico de um latossolo húmico sob diferentes usos**. 2011. 87 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

Secretaria dos Recursos Hídricos do CEARÁ. **Programa de Ação Estadual de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca. PAE/CE**. Fortaleza: Ministério do Meio Ambiente/Secretaria dos Recursos Hídricos, 372p., 2010.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; GUILHERME, L. R. G. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia** v.32: p.429-437, 2008.

REYNOLDS, J. F.; GRAINGER, A.; STAFFORD SMITH, D. M.; BASTIN, G.; GARCIA-BARROS, L.; FERNANDES, R. J.; ZDRULI P.. Scientific concepts for an integrated analysis of desertification. **Land Degradation & Development**, v. 22, n. 2, p. 166-183,2011.

ROSSET, J. S.; LANA, M. D. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M., Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, p. 1529-1538, 2016.

SILVA, A. P. M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 38-43, 2014.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. **Matéria orgânica do solo**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; GRISS, B.M.; HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R.S. **Microrganismos e processos biológicos do solo**; perspectiva ambiental. Brasília: EMBRAPA-PI, 1994. 142p. (EMBRAPA-CNPAF.Documentos, 45).

SOUZA, E. B., CARDOSO, J., LIMA, A., CUNHA, T., & do AMARAL, A. J. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento físico da matéria orgânica do solo sob cultivo de mangueira irrigada no semiárido brasileiro. In: Anais do 43º. **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, julho 2014.

STEVENSON, F. J. Química do Húmus: Gênese, Composição, Reações. v. 2. Nova York, 1994.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Distrito Federal, 2017.

TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. **Tópicos em Ciências do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2:195-276, 2002.

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

VIAUD, V.; SANTILLÀN-CARVANTES, P.; AKKAL-CORFINI, N.; LE GUILLOU, C.; PRÉVOST-BOURÉ, N. C.; RANJARD, L.; MENASSERI-AUBRY, S. Análise à escala da paisagem dos efeitos do sistema de cultivo na qualidade do solo num contexto de agricultura

agropecuária. Agricultura, **Ecosistemas e Meio Ambiente**, v. 265, p. 166-177, 2018. DOI: 10.1016/j.agee.2018.06.018.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L.; SILVA, I. R.; COSTA, L. M. Organic-Matter Lability and Carbon-Management Indexes in Agrosylvopasture System on Brazilian Savannah. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 39, n. 11-12, p. 1750-1772, 2008

YEOMANS, J. C.; BREMNER, John M. Um método rápido e preciso para determinação rotineira de carbono orgânico no solo. **Comunicações em ciência do solo e análise de plantas**, v. 13, pág. 1467-1476, 1988.

ZANINETI R.A., MOREIRA A., MORAES L.A.C. (2016). Atributos físicos, químicos e biológicos de latossolo amarelo na conversão de floresta primária para seringais na Amazônia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51:1061-1068, 2016.

ZECH, Z., SENESI, N. GUGGENBERGER, G., KAISER, K. LEHMANN, J., MIANO, T.M. MILTNER, A. SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, 79, p. 69-116, 1997.

ANEXO A – INFORMAÇÕES SOBRE PERFIL DO LUVISSOLOS CRÔMICOS E NEOSSOLOS LITÓLICOS DISPONIBILIZADO PELA FUCEME

Luvissolos Crômico: são solos minerais eutróficos, normalmente com o contato lítico dentro de 100 cm de profundidade, com presença de horizonte B textural (Bt) e argila de atividade alta (EMBRAPA, 2006). Apresentam sequência de horizontes A-Bt-C ou A-E-Bt-C, com horizontes de destacada diferenciação. Possuem horizonte A do tipo fraco ou moderado e normalmente apresentam pedregosidade superficial (Pavimento Desértico). O horizonte B textural (Bt), comumente tem estrutura bem desenvolvida e cores avermelhadas, bruno-amareladas e, menos frequentemente, brunadas ou acinzentadas. Podem apresentar, também, na parte mais inferior do perfil o caráter vértico, indicando intermediação com os Vertissolos. Morfologicamente, destacam-se pela coloração vermelha ou avermelhada no horizonte Bt e, fisicamente, na maior parte da área apresentam textura média na superfície e argilosa em subsuperfície. Em termos químicos, são de alta fertilidade natural, por apresentar altos valores de CTC e soma de bases trocáveis bem como apreciáveis teores de minerais intemperizáveis na fração areia, principalmente feldspato potássico.

Potencialidades e limitações - Por serem solos eutróficos, com elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e riqueza em cálcio, magnésio e potássio, com média a alta soma de bases trocáveis e reação moderadamente ácida a ligeiramente alcalina, são considerados de alta fertilidade natural. Por outro lado, a pequena profundidade do contato lítico, a frequente ocorrência de pedregosidade superficial, a alta erodibilidade, a presença de caráter vértico, a intermediação com NEOSSOLOS LITÓLICOS, a possibilidade de apresentarem caráter solódico ou salino, além do intenso déficit hídrico nas áreas onde eles mais ocorrem, conferem aos mesmos muitas limitações ao uso agrícola. Ressalte-se ainda o elevado nível de degradação em que se encontram esses solos em razão de seu uso de forma não conservacionista. (FUCEME, 2016).

Neossolos Litólicos: São solos rasos, que apresentam um contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm da superfície do solo, com horizonte A ou hístico assentes diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material com 90 % (por volume) ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 mm (cascalhos, calhaus e matacões), admitindo ainda um horizonte B em início de formação, cuja espessura não satisfaz a qualquer tipo de horizonte B diagnóstico (EMBRAPA, 2006). Normalmente ocorrem associados com pedregosidade e rochosidade. Apresentam muitas

variações de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos, que associam-se principalmente, com a natureza do material de origem. Na área estudada, foram encontrados Neossolos litólicos com textura arenosa, média e argilosa.

Potencialidades e limitações - Na área estudada, esses solos apresentam um conjunto de atributos restritivos ao uso agrícola que ainda são agravados pelo déficit hídrico regional e pela má distribuição das chuvas na quadra chuvosa. As maiores limitações estão relacionadas com a pequena profundidade do contato lítico, bem como a pedregosidade e a rochiosidade associadas e o risco de erosão do horizonte A, em razão da intensidade das chuvas no ambiente semiárido cearense e do tipo de relevo (suave ondulado a ondulado) onde esses solos ocorrem. São comumente utilizados com pastagens e/ou com cultivos de subsistência, sendo, entretanto, mais recomendada a sua utilização para preservação da fauna e da flora. Não apresentam potencial para uso com agricultura irrigada convencional. (FUCEME, 2016).

ANEXO B – TABELA COM INFORMAÇÕES SOBRE CARATERÍSTICA QUÍMICA DOS PONTOS DAS ÁREAS DA COMUNIDADE MAPUÁ DE JAGUARIBE, CE.

Tabela – Características químicas dos solos com distintos graus de degradação no Município de Jaguaribe-CE (0-20 cm de profundidade).

Área	pH (H ₂ O)	Complexo sortivo (cmol _c dm ⁻³)						V %	P mg kg ⁻¹	COT dag kg ⁻¹
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H + Al	T			
Degradada	6,61	5,87	1,72	0,29	0,72	0,64	9,24	93,07	1,48	2,27
	6,23	4,48	1,45	0,36	0,39	0,69	7,37	90,64	1,55	3,10
	6,22	4,20	1,33	0,26	0,46	0,66	6,91	90,45	1,28	3,39
	5,93	5,08	2,04	0,30	0,75	0,73	8,90	91,80	1,31	2,89
	5,35	3,18	1,05	0,33	0,61	0,83	6,00	86,17	1,41	3,72
Em Recuperação	6,44	4,34	1,23	0,49	0,37	0,89	7,32	87,84	3,21	5,47
	6,66	6,13	2,44	0,63	0,31	0,81	10,32	92,15	10,07	6,08
	6,90	4,59	1,32	0,52	0,21	0,71	7,35	90,34	11,57	5,23
	6,29	3,25	0,83	0,30	0,23	0,89	5,50	83,82	10,89	6,02
	6,39	4,88	1,99	0,35	0,15	0,84	8,21	89,77	3,63	5,91
Controle	6,26	2,38	0,30	0,27	0,10	0,50	3,55	85,92	1,59	5,06
	6,86	4,56	1,25	0,30	0,14	0,47	6,72	93,01	1,36	6,76
	6,32	3,35	0,76	0,33	0,09	0,60	5,13	88,30	1,79	6,06
	6,60	2,32	0,96	0,32	0,11	0,64	4,35	85,29	2,11	6,02
	6,27	3,24	0,76	0,38	0,09	0,77	5,24	85,31	2,15	6,58