



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS

TAMIA DANIELA CABASCANGO VÁSQUEZ

**MÉTODOS ALTERNATIVOS AO USO DO “TEA BAG INDEX” (TBI) PARA
APRIMORAR A AVALIAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM
SOLO DE MANGUEZAL NA ZONA SEMIÁRIDA DO BRASIL**

FORTALEZA

2024

TAMIA DANIELA CABASCANGO VÁSQUEZ

MÉTODOS ALTERNATIVOS AO USO DO “*TEA BAG INDEX*” (TBI) PARA APRIMORAR
A AVALIAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLO DE
MANGUEZAL NA ZONA SEMIÁRIDA DO BRASIL

Tese ou Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Graduação em Ciências Marinhas e Tropicais do Instituto de Ciências do Mar (Labomar) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas e Tropicais.

Área de concentração: Ciência, tecnologia e gestão costeira e oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Tommaso Giarrizzo.

Coorientador: Prof. Dr. Gabriel Nuto Nóbrega

FORTALEZA

2024

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)

V463m Vázquez, Tamia Daniela.

MÉTODOS ALTERNATIVOS AO USO DO “TEA BAG INDEX” (TBI) PARA APRIMORAR A AVALIAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLO DE MANGUEZAL NA ZONA SEMIÁRIDA DO BRASIL / Tamia Daniela Vázquez. – 2024.

66 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Tommaso Giarrizzo.

Coorientação: Prof. Dr. Gabriel Nuto Nóbrega.

1. mitigação climática. 2. matéria orgânica do solo. 3. carcinicultura. 4. processos biogeoquímicos. 5. carbono azul. I. Título.

CDD 551.46

TAMIA DANIELA CABASCANGO VÁSQUEZ

MÉTODOS ALTERNATIVOS AO USO DO “*TEA BAG INDEX*” (*TBI*) PARA APRIMORAR
A AVALIAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLO DE
MANGUEZAL NA ZONA SEMIÁRIDA DO BRASIL

Tese ou Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Graduação em Ciências Marinhas e Tropicais do Instituto de Ciências do Mar (Labomar) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas e Tropicais. Área de concentração: Ciência, tecnologia e gestão costeira e oceânica.

Aprovada em: 29/11/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tommaso Giarrizzo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Gabriel Nuto Nóbrega (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira
Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Alexander Cesar Ferreira Roman
Universidade Federal do Ceará (UFC)

DEDICATÓRIA

A mis padres, Margarita y Mauricio (en memoria)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser meu apoio todos os dias, por me dar serenidade para poder seguir em frente e por colocar as pessoas certas em meu caminho.

A minha mãe que com muito esforço e amor incondicional, soube me apoiar e guiar em cada passo, ao meu pai, cuja presença posso sentir todos os dias e seu amor e legado continuam presentes na minha vida.

À Organização dos Estados Americanos (OEA), ao Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras (GCBU) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) de pelo apoio proporcionado por meio da concessão da bolsa de estudos. Ao Instituto de Ciências do Mar (Labomar), Petronas e ao Programa Cientista Chefe pelo respaldo e apoio financeiro oferecido durante o desenvolvimento da minha pesquisa. Um agradecimento especial ao professor Tiago Ferreira por acreditar neste projeto e por todo o apoio oferecido em cada etapa dos trabalhos de campo.

Aos laboratório de Labomar: Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG), Laboratório de Zoobentos e ao Laboratório de Plâncton, assim como aos laboratórios do Departamento de Ciências do Solo: Laboratório de Análises de Solos, Águas, Tecidos e Adubos, Laboratório de Física do Solo, Laboratório de Química do Solo, Laboratório de Manejo do Solo, pela predisposição a presta de equipos e suportar as tardes de fumaça e cheiro durante as queimas das amostras.

Aos meus orientadores, por quem tenho grande apreço e admiração pelo trabalho e pela trajetória acadêmica. Ao professor Fábio Matos, agradeço por ter aceitado o desafio, mesmo diante das barreiras linguísticas. Muito obrigada pela confiança, paciência e pela oportunidade durante o processo de adaptação, assim como os conhecimentos compartilhados nas aulas.

Ao professor Tommaso Giarrizzo, agradeço pelo entusiasmo e pela sabedoria que tornaram este trabalho realizável. Sou profundamente grata por cada palavra de incentivo durante o período de orientação.

Ao professor Gabriel Nuto Nóbrega, minha gratidão infinita por me guiar neste processo de aprendizado e por me introduzir ao fascinante mundo dos manguezais e solos. Obrigada pelo compromisso, por compartilhar cada experiência, conquista e até mesmo ideias loucas durante os trabalhos de campo. Gratidão pela paciência e pelo esforço contínuo para que esta pesquisa avançasse, mesmo diante de adversidades.

Aos meus professores, professor Vicente Faria, por sempre me estender uma mão amiga e estar disposto a ajudar. Ao professor Alexander Ferreira, por me dar a certeza de trabalhar com manguezais, pelas aulas, cursos oferecidos e pelos conhecimentos compartilhados sobre a erva-mate.

De maneira muito especial, agradeço à Natalia Beloto, uma mulher que admiro profundamente e que tenho o privilégio de chamar de amiga. Obrigada por me apresentar a este belo e louco mundo dos manguezais, por cada campo, cada trabalho, cada troca de ideias sobre os saquinhos, E por me lembrar que “Nossos sonhos sempre vão parar no ouvido do universo”. Agradeço também, com imensa gratidão, à Débora, uma grande amiga e confidente. A vocês duas, mulheres incríveis, minha gratidão infinita por estarem ao meu lado neste processo, por serem pessoas que sustentam e apoiam quando os ventos se tornam complicados.

Aos meus colegas e amigos, Pedro Arruda, por compartilhar tantas histórias do Brasil, do Ceará, de Canindé e da Alemanha. Obrigada por tornar este processo de mestrado mais leve. À Marie, uma mulher guerreira a quem admiro profundamente, minha gratidão por todo o apoio e parceria no laboratório.

Agradecimento especial aos técnicos Jaqueline, Hamilson, Franzé, Dra. Daysi, Dr. José Filho e Dra. Tatiane Garcia, assim como à equipe de iniciação científica Thiago, Bianca e Andresa. Minha gratidão também à minha galera, Willam, Michael, Milena e Gabriela, que contribuíram na fabricação das grades e saquinhos de chá. Ao pessoal do Labomar e DCS – Amalia, Lúcio, Tobías,

Cristina, Israel, Lorena, Jonathan e Débora – meu agradecimento infinito por sempre ajudarem em alguma etapa do projeto.

Agradeço também à Pousada Currais Velhos por me receber de braços abertos e por nos encher de carinho em cada dia de campo. Obrigada, Erandi, por aquele abraço acolhedor.

Meu agradecimento também aos senhores pescadores Orlando Neto “Locura”, que nos levou no “São Lorenzo” em Cacimbas, e Geveniússó e Zé Vigário, no “Aldaisa” em Coassu, que sempre estiveram dispostos a nos ajudar e a esperar pelos horários da maré.

Não posso deixar de reconhecer e agradecer às pessoas que souberam me acolher aqui no Brasil, fazendo-me sentir como em casa, e à minha amada e querida família e amigos do Ecuador, que encurtaram as distâncias. Obrigada por estarem ao meu lado nos momentos em que tudo parecia desmoronar e também nas muitas alegrias que tive para celebrar.

Este trabalho é sustentado por cada uma das pessoas que esteve presente ao longo deste tempo.

Tamia

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	11
ABSTRACT	12
JUSTIFICATIVA	13
OBJETIVOS.....	14
Objetivo Geral	14
Objetivos Específicos	14
HIPÓTESES.....	15
CAPÍTULO 1. Uso do “Tea Bag Index” (TBI) para aprimorar o entendimento da decomposição da matéria orgânica no solo de manguezal.	16
Resumo	16
Abstract	18
INTRODUÇÃO.....	20
MATERIAS E MÉTODOS.....	22
Área de estudo	22
Delineamento amostral	22
Preparação do material e instalação do experimento	24
i. Tecido.....	24
ii. Material Vegetal.....	24
iii. Grades	25
iv. Instalação do experimento.....	26
v. Processamento das amostras e análise da decomposição.....	27
Fator de estabilização (S) e taxa de decomposição (k).....	28
vi. Amostragem de solo e caracterização dos solos.....	29
Análise Estatística.....	31
RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
Caracterização da área	32
Decomposição da matéria orgânica	34
CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS.....	39
CAPÍTULO 2. Análise dos impactos da carcinicultura na decomposição da matéria orgânica em solos de manguezais aplicando o TBI.....	41
Resumo	41
Abstract	42
INTRODUÇÃO.....	43
MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
Área de estudo	45
Delineamento amostral	46
Preparação do material e instalação do experimento	47
i. Materiais.....	47

ii. Instalação do experimento.....	48
Coleta e análise de solo.....	50
Coleta e análises das bolsas com Matéria vegetal.....	51
Análise Estatística.....	52
RESULTADOS.....	53
Caracterização do solo.....	53
Decomposição da matéria orgânica.....	55
DISCUSSÃO	58
Caracterização do solo	58
Decomposição da matéria orgânica	59
CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS.....	62
CONCLUSÃO GERAL.....	64

RESUMO GERAL

Os manguezais são ecossistemas costeiros de grande relevância ambiental, considerados dos mais produtivos do planeta. Sua elevada produção primária e as condições anaeróbicas dos solos, favorece uma decomposição da matéria orgânica (MO) menos eficiente, possibilitando assim o armazenamento de carbono (C). Assim, desempenham um papel crucial na biodiversidade e nas estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. No entanto, os manguezais enfrentam grandes impactos antrópicos, como a carcinicultura, principalmente na costa norte e nordeste do Brasil, causando desmatamento, contaminação por elementos potencialmente tóxicos, eutrofização e alterações nos processos biogeoquímicos, que afetam a retenção de carbono. Métodos padronizados como o *Tea Bag Index* (TBI), avaliam a decomposição da MO em solos e permitem medir e comparar taxas de decomposição usando bolsas de chá comerciais em diferentes locais. Contudo, o uso de materiais alternativos, como folhas de espécies de mangue e matéria vegetal comercial locais como a erva mate, pode ampliar sua aplicabilidade e expandir o entendimento do processo de decomposição. Assim, o presente estudo teve como objetivo aprimorar o método TBI utilizando diferentes materiais orgânicos e tecidos experimentais. Foram realizados experimentos de decomposição em um manguezal no rio Pacoti, empregando 12 tratamentos experimentais, que incluíram bolsas com chá verde padrão e chá comercial Lipton®, folhas de *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Erva-mate*, além de diferentes tecidos (perlon e escaline). Os resultados indicaram que o chá verde Sencha e as folhas de mangue apresentaram taxas de decomposição semelhantes ao padrão TBI, os quais podem ser implementados como substitutos, enquanto o tecido perlon demonstrou maior eficiência, apresentando até 8% maior decomposição da matéria orgânica. O estudo comparou os processos de decomposição em solos de manguezais preservados e impactados por efluentes da carcinicultura no rio Acaraú, no estado do Ceará, realizando a caracterização de solos (Eh, pH, granulometria e grau de piritização), que forneceram informações complementares sobre o ambiente biogeoquímico dessas áreas. Nas áreas impactadas pela carcinicultura, foi identificado um maior percentual de decomposição da MO (79%) com o tecido perlon, acompanhado por um maior conteúdo de nutrientes proveniente dos efluentes como fósforo (25,3 mg kg⁻¹), e um grau de piritização (6 %) significativamente menor em comparação com as áreas não impactadas (15 %), sugerindo uma menor capacidade de armazenamento de C nesses solos. Esses resultados são fundamentais para compreender como os impactos antrópicos alteram os processos de decomposição e para aprimorar métodos de conservação que favoreçam o sequestro e o armazenamento de carbono.

Palavras-chave: Mitigação climática, matéria orgânica do solo, carcinicultura, processos biogeoquímicos, carbono azul.

ABSTRACT

Mangroves are highly relevant coastal ecosystems, regarded as some of the most productive on the planet. Their high primary productivity and the anaerobic conditions of their soils result in less efficient decomposition of organic matter (OM), thereby enabling significant carbon (C) storage. Consequently, mangroves play a crucial role in biodiversity conservation and in strategies for mitigating and adapting to climate change. However, these ecosystems face substantial anthropogenic impacts, such as shrimp farming, particularly along the northern and northeastern coasts of Brazil. These impacts lead to deforestation, contamination by potentially toxic elements, eutrophication, and alterations in biogeochemical processes that affect carbon retention. Standardized methods such as the *Tea Bag Index* (TBI) assess OM decomposition in soils, allowing for the measurement and comparison of decomposition rates using commercial tea bags across different sites. Nevertheless, the use of alternative materials, such as leaves from mangrove species and locally available organic materials like yerba mate, could enhance the method's applicability and broaden understanding of decomposition processes. This study aimed to refine the TBI method by employing different organic materials and experimental fabrics. Decomposition experiments were conducted in a mangrove ecosystem in the Pacoti River, utilizing 12 experimental treatments. These included bags with standard green tea, Lipton® commercial green tea, leaves of *Rhizophora mangle* and *Avicennia germinans*, yerba mate, and different fabrics (perlon and escaline). The results indicated that Sencha green tea and mangrove leaves exhibited decomposition rates similar to the TBI standard, suggesting their potential as substitutes. Moreover, perlon fabric demonstrated superior efficiency, achieving up to 8% higher OM decomposition. The study also compared decomposition processes in preserved mangrove soils with those impacted by shrimp farming effluents in the Acaraú River, Ceará state. Soil characterization (Eh, pH, granulometry, and pyritization degree) provided complementary information about the biogeochemical environment of these areas. In shrimp farming-impacted areas, a higher OM decomposition percentage (79%) was observed with perlon fabric, accompanied by elevated nutrient contents from effluents, such as phosphorus (25.3 mg kg⁻¹), and a significantly lower pyritization degree (6%) compared to non-impacted areas (15%). These findings suggest a reduced carbon storage capacity in impacted soils. These results are critical for understanding how anthropogenic impacts alter decomposition processes and for improving conservation methods that promote carbon sequestration and storage.

Keywords: Climate mitigation, soil organic matter, shrimp farming, biogeochemical processes, blue carbon.

JUSTIFICATIVA

A compreensão do processo de decomposição da matéria orgânica em diferentes condições edafoclimáticas é fundamental para entender a ciclagem de nutrientes, além de entender como essas condições interagem e influenciam a decomposição da matéria vegetal de diferentes origens. Estudos têm demonstrado que a taxa de decomposição varia significativamente em função de fatores como temperatura, intensidade de inundação, salinidade e disponibilidade de nutrientes. No entanto, ainda existem lacunas no conhecimento sobre como esses fatores afetam a decomposição em ecossistemas de manguezais, que desempenham um papel crucial na retenção de carbono, na ciclagem de nutrientes e na resiliência das áreas costeiras. Para alcançar os objetivos desta pesquisa, foram elaborados 2 capítulos com os seguintes objetivos: No primeiro capítulo, foi utilizada uma abordagem experimental, empregando o método padronizado *Tea Bag Index (TBI)* e sugerindo adaptações ao método, como o uso de fontes de matéria orgânica alternativa, devido à disponibilidade limitada de materiais padronizado pelo método na América Latina. O segundo capítulo consistiu na utilização do TBI para avaliar a decomposição da matéria orgânica em solos de manguezal impactados pela carcinicultura. Durante todo o experimento, além da instalação de bolsas propostas no TBI e bolsas alternativas de tecido perlon e escaline, foram coletadas amostras de solos para caracterizar o ambiente geoquímico e para fornecer uma análise abrangente das condições que influenciam a decomposição. Essa abordagem permite comparar métodos alternativos e convencionais, contribuindo para o desenvolvimento de ferramentas mais acessíveis e aplicáveis a diferentes realidades ambientais.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Aprofundar a compreensão do processo de decomposição de matéria orgânica (MO) em solos de manguezais, em diferentes condições de preservação, propondo métodos alternativos ao *Tea Bag Index* e avaliando como a carcinicultura pode afetar a decomposição da matéria orgânica dos solos desse ecossistema.

Objetivos Específicos

Caracterizar os solos de manguezais do estuário do rio Pacoti (Ceará), por meio de análises físico-químicas (Eh e pH), granulometria, conteúdo de carbono orgânico e grau de piritização, para analisar a relação entre essas variáveis com taxa de decomposição de matéria vegetal com origens distintas.

Avaliar a decomposição de materiais vegetais de diferentes origens (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Ilex paraguariensis*) enterrados em solos de mangue utilizando bolsas com constituição distinta de fibras de material poliéster (perlon fino e escaline), a fim de determinar materiais alternativos aos propostos pelo *TBI* (*Camellia sinensis*, *Aspalathus linearis*).

Realizar a caracterização detalhada dos solos de manguezais nas áreas impactadas e não impactadas pela carcinicultura no estuário do rio Acaraú. Avaliar parâmetros físico-químicos como Eh, pH, granulometria, teor de carbono orgânico total e grau de piritização.

Comparar a variação na decomposição de materiais vegetais de diferentes origens em solos de manguezal impactados e não impactados pela carcinicultura no estuário do rio Acaraú.

HIPÓTESES

As folhas das espécies de mangue *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Ilex paraguariensis* e erva mate *Camellia sinensis* podem ser utilizadas como material alternativo ao método *Tea Bag Index*, permitindo avaliar ao processo de decomposição da matéria orgânica em solos de manguezais.

A adaptação do método TBI com o uso de matéria orgânica vegetal alternativa (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Ilex Paraguariensis*, e *Camellia sinensis*) permitirá avaliar e compreender as dinâmicas de decomposição em solos impactados pela carcinicultura.

CAPÍTULO 1. Uso do “*Tea Bag Index*” (TBI) para aprimorar o entendimento da decomposição da matéria orgânica no solo de manguezal.

Resumo

O *Tea Bag Index* (TBI) é um método internacionalmente reconhecido para avaliar as taxas de decomposição de diferentes solos, utilizando materiais orgânicos padronizados, como bolsas de chá comerciais. Entretanto, para universalizar este método, é crucial considerar outros materiais orgânicos locais, como as folhas de vegetação nativa ou outro material de maior disponibilidade (e.g., erva mate), que poderiam ser utilizados para ampliar a compreensão do armazenamento de carbono no solo, principalmente sob condições específicas. Neste sentido, os manguezais são ecossistemas que se destacam pela alta habilidade em atuar como sumidouros de CO₂ devido à decomposição lenta da matéria orgânica (MO), que ocorre por meio de vias anaeróbias (e.g., redução dos óxidos de Fe e do sulfato). Além de acumular grandes conteúdos de C, os manguezais também se destacam por sua grande variedade de serviços ecossistêmicos prestados o que os caracterizam como um dos ecossistemas mais valiosos do planeta. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo oferecer materiais alternativos ao padrão do TBI, utilizando fontes distintas de matéria orgânica. Por tanto, foram elaboradas dez tratamentos consistindo na combinação de bolsas de dois materiais (i.e., perlon e escaline) e diferentes fontes de matéria orgânica (i.e., *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Ilex paraquariensis* e *Camellia sinensis*), além de outros dois chás comerciais (Chá verde padrão e chá verde Sencha Lipton® em suas bolsas originais biodegradável e non-woven, respectivamente), que foram comparados com as bolsas de chá padronizadas para o TBI (*Camellia sinensis*- Chá verde padrão TBI; e *Aspalathus linearis* - Chá Rooibos padrão TBI em suas bolsas originais), totalizando 12 tratamentos experimentais que foram submetidas a um ensaio de decomposição em um manguezal (rio Pacoti, Ceará). Amostras de solos foram coletadas e foram analisadas para caracterizar o ambiente biogeoquímico (Eh, pH, granulometria, teor de C e grau de piritização). Os resultados indicam que o chá verde padrão utilizado no TBI, com decomposição de 76%, pode ser substituído pelo chá verde Sencha tradicional da marca Lipton®, que apresentou uma decomposição de 81% ou também por material orgânico proveniente dos bosques de mangue, como folhas de *Rhizophora mangle*, que registraram uma decomposição de 58% quando utilizado tecido perlon. O tecido perlon demonstrou maior eficiência em todos os tipos de material vegetal testados, apresentando até 5% a mais de decomposição em comparação ao tecido escaline, além do que apresentou maior viabilidade ao momento de selagem das bolsas. Essas ferramentas são fundamentais para ampliar a compreensão dos processos de decomposição

da matéria orgânica em ecossistemas de manguezal, aprimorando o método e facilitando o uso de diferentes materiais vegetais.

Palavras-chave: Mitigação climática, ecossistemas de carbono azul, matéria vegetal, mineralização, matéria orgânica do solo

Application of the *Tea Bag Index* (TBI) to improve knowledge of organic matter decomposition in mangrove soils

Abstract

The Tea Bag Index (TBI) is an internationally recognized method for assessing decomposition rates in various soils, using standardized organic materials such as commercial tea bags. However, to universalize this method, it is crucial to consider alternative local organic materials, such as native vegetation leaves or other readily available materials (e.g., yerba mate), which could enhance understanding of soil carbon storage, particularly under specific conditions. In this context, mangroves are ecosystems that stand out for their remarkable ability to act as CO₂ sinks due to the slow decomposition of organic matter (OM), which occurs through anaerobic pathways (e.g., reduction of Fe oxides and sulfates). In addition to accumulating significant carbon content, mangroves provide a wide range of ecosystem services, making them one of the most valuable ecosystems on the planet. This study aimed to offer alternative materials to the standard TBI by using different organic matter sources. Ten treatments were designed, combining bags made from two materials (i.e., perlon and escaline) with various organic matter sources (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Ilex paraguariensis*, and *Camellia sinensis*), as well as two other commercial teas (standard green tea and Lipton® Sencha green tea, in their original biodegradable and non-woven bags, respectively). These were compared with the standardized tea bags used in the TBI (green tea *Camellia sinensis* - TBI standard; and rooibos tea *Aspalathus linearis* - TBI standard in their original bags), resulting in 12 experimental treatments subjected to a decomposition trial in a mangrove area (Pacoti River, Ceará, Brazil). Soil samples were collected and analyzed to characterize the biogeochemical environment (Eh, pH, granulometry, carbon content, and pyritization degree). The results indicated that the standard green tea used in TBI, with a decomposition rate of 76%, could be replaced by Lipton® Sencha green tea, which exhibited a decomposition rate of 81%, or by organic material from mangrove forests, such as *Rhizophora mangle* leaves, which showed a decomposition rate of 58% when using perlon fabric. Perlon fabric demonstrated greater efficiency across all tested organic materials, achieving up to 5% higher decomposition rates compared to escaline fabric and showing greater viability for sealing the bags. These tools are essential for expanding the understanding of organic matter decomposition processes in mangrove ecosystems, improving the TBI method, and facilitating the use of diverse organic materials.

Keywords: Climate mitigation, blue carbon ecosystems, organic matter, mineralization, soil organic matter.

INTRODUÇÃO

Os manguezais são ecossistemas situados na transição entre ambientes terrestres e marinhos com grande relevância global, colonizando as regiões costeiras tropicais e subtropicais e sendo sujeitos ao regime das marés (NOVELLI, 1995; DIAS, 2004). Embora ocupem menos de 0,1 % da superfície terrestre (HERNANDEZ; PARK, 2024), os manguezais são fundamentais para a sustentabilidade e para a subsistência das populações que vivem em seu entorno (ALVES; BARRRAQUI, 2024), fornecendo madeira, alimentos, medicamentos tradicionais, além de valores tradicionais (GRIMM et al., 2024; LEAL; SPALDING, 2024). Além disso, estes ecossistemas sustentam uma grande biodiversidade, servindo como fonte de alimento e áreas de berçário para a reprodução de várias espécies, além de ajudar na mitigação da erosão costeira junto com a proteção contra eventos climáticos extremos (UNRIC, 2022; SIMPSON et al., 2023). Mais recentemente, os manguezais também têm sido amplamente reconhecidos por seu papel na estabilização costeira, atuando em mecanismos que favorecem a retenção de sedimentos, nutrientes e elementos associados a partículas finas. Essa dinâmica desempenha um papel crucial na produtividade primária, bem como na captura e retenção de carbono (ALONGI, 2012).

Nos manguezais, o processo de decomposição anaeróbia é um dos principais fatores para o armazenamento de carbono e ciclagem de nutrientes nesses ecossistemas (ALONGI, 2015). Por um lado, o fluxo e a ciclagem de nutrientes a partir da decomposição da matéria orgânica favorece a alta produtividade dos manguezais e ecossistemas costeiros (CONTRERAS, 2017). Por outro lado, a baixa eficiência na decomposição, causada por condições ambientais como altas concentrações de sais, inundações periódicas e baixos níveis de oxigênio, retardam a ciclagem de nutrientes, porém promovem o grande acúmulo de carbono orgânico nos solos, caracterizando esses ambientes como sumidouros importantes de carbono (NÓBREGA et al., 2019). De fato, nestes ambientes, o processo de decomposição se baseia na utilização de outros aceptores finais de elétrons em substituição ao oxigênio, como por exemplo os óxidos de Fe e o sulfato, que apresentam um menor rendimento energético, propiciando maiores estoques de carbono (cerca de 3,5 vezes maior) e maiores taxas de sequestro que sistemas florestais terrestres (ROVAI et al., 2022; JENNERJAHN, 2020; MACKENZIE et al., 2020; WANG et al., 2021; MCLEOD et al., 2011).

Sem embargo, fatores como o aumento da temperatura, salinidade, inundação e a intensidade da elevação do nível médio do mar, causado pelas mudanças climáticas, além do aumento de nutrientes resultante de impactos antrópicos podem afetar a decomposição da matéria orgânica, aumentando a taxa de liberação de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂), que contribuem para o aquecimento global (GRUBER; GALLOWAY, 2008; SANDERS et al., 2014; HATJE et al., 2021). A

compreensão aprofundada do processo de decomposição da matéria orgânica no solo é fundamental para explicar o ciclo do carbono, especialmente no que se refere à quantidade de carbono armazenado ou liberado para a atmosfera. (SUÁREZ-ABELENDÁ et al., 2014).

Neste sentido, o Tea Bag Index (*TBI*) é um método simples para coletar informações globais sobre a decomposição da matéria orgânica do solo, utiliza a diferença na composição química da matéria vegetal para estimar duas fases distintas do processo de decomposição: uma inicial e rápida, representada por compostos menos recalcitrantes, e outra mais lenta e estabilizada, associada a materiais mais recalcitrantes. Através do enterramento de bolsas de chá comercial Lipton® (chá verde e Rooibos; Tea Time 4 Science, 2022). Neste sentido, Keuskamp et al., (2013) propõem o uso do chá verde Sencha, uma variedade de *Camellia sinensis* com estrutura menos recalcitrante, o que resulta em decomposição mais rápida. O segundo chá é composto de materiais mais recalcitrantes, promovendo uma decomposição lenta que visa explicar a estabilização da matéria orgânica no solo dos ecossistemas estudados. No entanto, o método apresenta limitações importantes, como a disponibilidade restrita de mercado e a descontinuidade comercial na América Latina. Diante desse contexto, para simplificar a aplicação do método e permitir sua universalização, especialmente em países do Sul América, onde os chás padrão do *TBI* não são comercializados, propomos uma alternativa que utiliza material vegetal local e produtos facilmente disponíveis regionalmente. Com essa abordagem, este estudo busca avaliar o fator de estabilidade (*S*) e a taxa de decomposição (*k*) de materiais vegetais como *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Ilex paraguariensis*, a fim de complementar e validar os resultados obtidos pelo *TBI*. Além disso, o estudo inclui a caracterização dos solos de manguezal para analisar a relação entre essas variáveis e a taxa de decomposição de diferentes tipos de material vegetal, possibilitando uma aplicação mais representativa e acessível do método em diversas regiões.

MATERIAS E MÉTODOS

Área de estudo

O estuário do rio Pacoti está localizado na Costa Semiárida do Brasil, influenciada pelos depósitos sedimentares da Formação Barreiras e campos de Dunas e Paleodunas (NASCIMENTO; CARVALHO, 2006). A região é classificada como sub-úmido úmido (Índice de Aridez IA=87.34) e possui uma precipitação anual de 1.402 mm (FUNCEME, 2024). A temperatura média varia entre os 25° e 35°C (WEATHER SPARK, 2024). Os manguezais desta região encontram-se na planície flúvio-marinha, ocupando aproximadamente 158 hectares que, por sua vez, estão inseridos na Área de Proteção Ambiental (APA) do rio Pacoti (SEMACE, 2010), sob influência das barragens Pacoti e Riachão e do Oceano Atlântico, com uma amplitude de maré variando entre 0,5 a 3,0 m (BARBOSA, 2016).

A área selecionada para o estudo está localizada dentro do Centro de Estudos Ambientais Costeiros (CEAC) do Campus LABOMAR da Universidade Federal do Ceará (UFC) (3° 49' 37.664" S, 38° 25' 9.336" W), em um bosque de mangue dominado pela espécie *Rhizophora mangle* (Figura 1). No local, em novembro de 2023, foi estabelecido um plot experimental (5 x 5 m), onde foram enterradas 324 bolsas de diferentes tipo de tecido (perlon, escaline e bolsa original Lipton®) contendo os materiais orgânicos de diferentes origens (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Ilex paraguaiensis*), totalizando 12 tratamentos experimentais.

Figura 1. Localização da área de estudo no estuário do rio Pacoti



Imagens Google Satellite. Fonte: Elaborado pelo autor.

Delineamento amostral

Os tratamentos experimentais que consistem em: os dois chás padrões Lipton® para o TBI (chá verde e chá Rooibos), no qual o tecido é definido como “*non-woven*”; outros dois chás comerciais (chá verde tradicional Lipton®, envolto em uma bolsa biodegradável; e chá verde Sencha Lipton®, envolto no tecido “*non-woven*”), além de oito tratamentos alternativos que foram confeccionados consistindo em uma combinação de dois tipos de tecidos (perlon vs. escaline) e quatro materiais orgânicos (folhas de *R. mangle*, folhas de *A. germinans*, e folhas de *I. paraguayensis*, chá verde tradicional Lipton®; Tabela 1).

Tabela 1. Tratamentos usados neste trabalho, enterrados no estuário do rio Pacoti.

Chá padrão Lipton®		
Material Vegetal	Código	Tecido
Chá verde padrão TBI	CVT	<i>Non-Woven</i>
Chá Rooibos padrão TBI	CRT	<i>Non-Woven</i>
Chá convencional Lipton®		
Material Vegetal	Código	Tecido
Chá verde Sencha Lipton®	CSL	<i>Non-Woven</i>
Chá verde tradicional Lipton®	CVL	<i>Biodegradável</i>
Material Vegetal experimental		
Material Vegetal	Código	Tecido
Folhas <i>Rhizophora mangle</i>	FMR	Escaline e Perlon
Folhas <i>Avicennia germinans</i>	FMA	Escaline e Perlon
Erva-mate	EM	Escaline e Perlon
Chá verde tradicional Lipton®	CVL	Escaline e Perlon

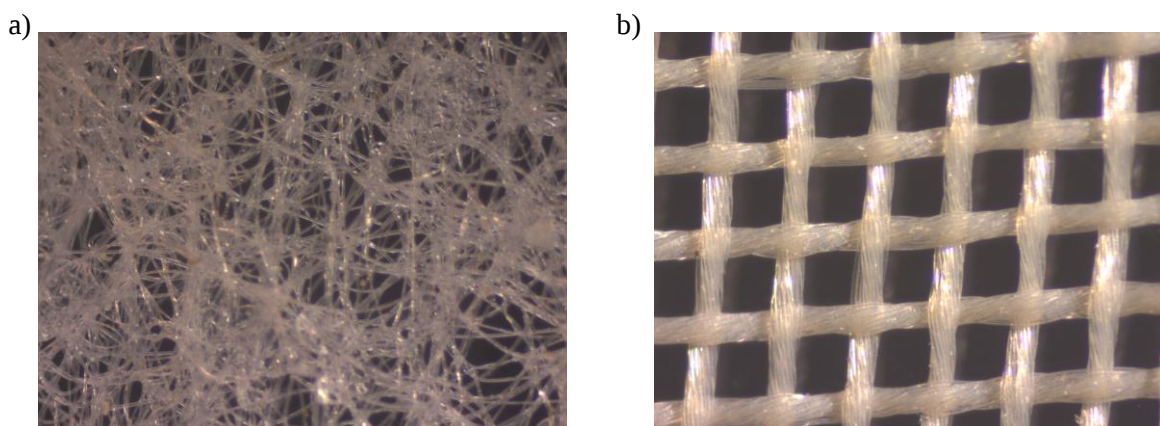
Fonte: Elaborada pelo autor

Preparação do material e instalação do experimento

i. Tecido

Para colocação do material vegetal experimental foram confeccionadas bolsas alternativas semelhantes às bolsas padrão, levando em consideração também a disponibilidade na América Latina. Assim, foram selecionados dois tipos de tecido: tecido escaline, composto principalmente por poliéster, e pelo tecido perlon fino, composto por 75% de poliéster e 25% de viscose. Os tecidos foram medidos e observados através de microscópio para determinar se a separação entre as fibras era menor ou maior que o tamanho da amostra utilizada. Os resultados indicaram um valor médio $0,17 \pm 0,06$ mm para o tecido perlon e $0,14 \pm 0,001$ mm para o tecido escaline (Figura 2). Para este trabalho, foram produzidas 110 bolsas de cada tipo de tecido, com dimensões de 6 cm de largura por 12cm de comprimento.

Figura 2. Fibras observadas nos tecidos perlon e escaline utilizados no experimento



Separação entre as fibras observadas no tecido perlon, ampliação 40x (a), Separação entre as fibras observadas no tecido escaline, ampliação 50x (b). Fonte: Elaborada pelo autor

ii. Material Vegetal

As bolsas alternativas foram preenchidas com um dos quatro tipos de material vegetal alternativo: folhas de *Rhizophora mangle* e *Avicennia germinans*, que foram coletadas na área de estudo, Chá verde tradicional Lipton® e erva mate.

Para as folhas de mangue, foram coletados 1,5 kg para folhas de *Rhizophora mangle* e *Avicennia germinans*, preferencialmente o segundo par de folhas a partir do ápice do ramo,

excluindo as folhas novas e quaisquer marcas de predação ou dano visíveis. As folhas foram lavadas para remover os sais, secas e colocadas em uma estufa a 55 °C por 72 horas. Devido à sua fácil aquisição no Brasil e na América Latina, optou-se pela Erva Mate tipo Argentina Tradicional, sem adição de açúcar, da marca Barão de Cotegipe, em embalagem de 500g contendo galhos e folhas trituradas e com tamanho grande em relação às outras ervas mate.

Posteriormente, os três tipos de folhas foram moídos separadamente em um moedor de material vegetal (moinho de facas) por 3 a 4 vezes, enquanto peneiradas para obter fragmentos com 1 mm de tamanho. Foram pesados 2 gramas de cada tipo de folha e colocados nas respectivas bolsas experimentais perlon e escaline. Para fechar o tecido, foi utilizado um equipamento de calor manual para selar sacolas plásticas (modelo PFS 200). As bolsas foram seladas de forma a adquirir uma forma de tetraedro (Figura 3).

Figura 3. Bolsas com diferentes tecidos experimentais.

a) Bolsa de escaline



b) Bolsa de perlon fino

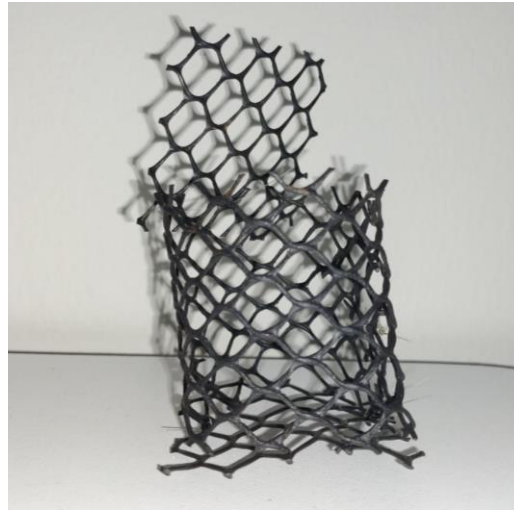


Fonte: Elaborado pelo autor

iii. Grades

Para proteger as bolsas contra predadores maiores e facilitar a coleta das amostras, foram confeccionadas grades de proteção para cada uma das bolsas. Foi utilizada uma tela de jardim preta com malha de 10 mm, da qual foram recortados retângulos de 18 cm de largura por 6 cm de comprimento e quadrados de 6 x 6 cm para as tampas, totalizando 324 grades (Figura 4).

Figura 4. Grade usado para proteger as bolsas



Fonte: Elaborado pelo autor

iv. Instalação do experimento

Para instalar o experimento, foi escolhido um bosque de *Rhizophora mangle*, espécie típica e predominante dos manguezais do Brasil. Com o auxílio de uma pá, foram cavadas trincheiras com profundidades de entre 10 e 15 cm, nos quais foram inseridas as bolsas contendo as grades e uma etiqueta com o nome correspondente. Em seguida, as trincheiras foram cobertas com solo (Figura 5).

Foram obtidas para os materiais FMA, FMR e EM um total de 60 amostras, divididas igualmente entre os tecidos escaline e perlon para cada material vegetal. Para o material CVL, foram coletadas 20 amostras para cada tipo de tecido e 30 amostras com tecido original biodegradável. Para os materiais CSL e CVT, foram coletadas 30 amostras cada, enquanto o material CRT resultou em 14 amostras utilizando tecido original. Desta maneira, foram realizadas 5 coletas com intervalos de aproximadamente 18 dias, ao longo de um período de 96 dias a fim de verificar variações nas taxas de decomposição em curtos períodos de tempo.

Figura 5. Bolsas enterradas na área de estudo no estuário do rio Pacoti.



Fonte: Elaborado pelo autor

v. Processamento das amostras e análise da decomposição

Após cada coleta dos saquinhos, as amostras foram secas em uma estufa (SOLAB SL - 100a) a 55 °C por aproximadamente 24 horas até peso constante e, em seguida, o conteúdo de cada bolsa foi pesado em uma balança eletrônica centesimal (Marte UX420H, precisão 0.001g) e registrado o valor (P_{MRI}). Posteriormente, as amostras foram calcinadas em um forno mufla (Solid Steel, SSFM-N1030) a 450 °C por 2 horas (P_{MI}), para retirar toda a matéria orgânica presente nas amostras, deixando apenas os componentes inorgânicos. O conteúdo de cada amostra calcinada foi pesado e registrado.

Para determinar o percentual de matéria orgânica perdida foram feitos cálculos por diferença de valores, da seguinte forma:

Dados:

Peso inicial do conteúdo de matéria orgânica; P_o

*Peso da matéria orgânica residual e matéria inorgânica,
seco a 55 °C após enterramento; P_{MRI}*

Peso da matéria inorgânica, após combustão a 450°C; P_{MI}

Cálculos:

$$\text{Peso da matéria orgânica residual } (P_{MR}) = P_{MRI} - P_{MI}$$

(Eq.1)

$$\text{Matéria orgânica decomposta (\%)} = \frac{(P_o - P_{MR}) * 100}{P_o}$$

(Eq.2)

Fator de estabilização (S) e taxa de decomposição (k)

Os fatores ambientais influenciam diretamente a decomposição e, em um momento, as substâncias lábeis estabilizam e tornam-se substâncias recalcitrantes. Este valor limite de estabilização é interpretado como o efeito inibitório destas condições ambientais na fração lábil e é denominado fator de estabilização S.

$$S = 1 - \frac{a_g}{H_g}; \quad \text{onde} \quad \text{(Eq.3)}$$

fração hidrolisável, H ;

chá verde $H_g = 0,842$

rooibos $H_r = 0,552$

fração decomponível para o chá verde, a_g

$$a_g = 1 - \frac{P_{g \text{ final}}}{P_{g \text{ inicial}}} \quad \text{(Eq.4)}$$

fração decomponível para o rooibos, a_r

$$a_r = H_r * (1 - S) \quad (\text{Eq.5})$$

Para determinar a taxa de decomposição (k) da matéria vegetal, levando em consideração que a perda de peso inicial ao longo do tempo sofre um decaimento exponencial, segue-se a seguinte equação (Eq.6)

$$k = \ln \left(\frac{\frac{a_r}{W_t - (1 - a_r)}}{t} \right); \text{ onde}$$

(Eq.6)

fração decomponível para o rooibos, a_r

tempo de incubação; t

Fração restante de rooibos; W_t

$$W_t = \frac{P_{r \text{ final}}}{P_{r \text{ inicial}}}$$

vi. Amostragem de solo e caracterização dos solos

A fim de complementar a compreensão dos processos biogeoquímicos, foram coletadas as amostras de solo nas profundidades 0-20 cm (durante a instalação e ao 36º e 96º dias de experimento) utilizando um tubo PVC. Cada testemunho foi dividido nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, em cada seção, foram medidos os parâmetros físico-químicos *in situ*, como pH, Eh, e salinidade da água intersticial (Figura 6).

Os valores de de pH foram obtidos utilizando um eletrodo portátil, previamente calibrado em soluções padrão pH 4,0 e pH 7,0, enquanto o potencial redox (Eh) foi obtido utilizando um medidor portátil com eletrodo de platina, com valores corrigidos para o eletrodo de referência (adicionando um valor de +244 mV). Por fim, a salinidade foi obtida utilizando um refratômetro portátil.

Em seguida, as amostras foram devidamente identificadas e etiquetadas, subdivididas (2 sub-amostras de cada profundidade) e transportadas em um isotherm. No laboratório, sub-amostras foram secas em estufa de circulação forçada a 45 °C, até peso constante, para a determinação da granulometria, conteúdo de carbono orgânico total, enquanto as outras sub-amostras foram mantidas congeladas para o fracionamento do ferro e determinação do grau de piritização (DOP).

Figura 6. Testemunho de solo coletado no estuário do rio Pacoti



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise granulométrica foi realizada utilizando sub-amostras secas por meio do método do densímetro (GEE & BAUDER, 1986), utilizando a combinação de métodos químicos ($0.015\text{ M (NaPO}_3)_6 + 1.0\text{ M NaOH}$) e físicos (16h de agitação) para a dispersão das amostras.

O conteúdo de carbono orgânico total (COT) e o nitrogênio total (NT) do solo foi determinado nas sub-amostras secas por meio de um analisador elementar (EA 3000) após a eliminação dos carbonatos utilizando $\text{HCl } 1\text{ mol L}^{-1}$, em agitação durante 24 horas (Howard et al., 2014; Nóbrega et al., 2015). Em seguida, as amostras foram lavadas com água destilada e centrifugadas até a remoção total dos cloretos, indicada pelo teste negativo do nitrato de prata.

Para o fracionamento do ferro (Fe) foram utilizadas 2 g das sub amostras congeladas e levadas para o processo de extração sequencial proposto por Berner (1970), obtendo assim duas frações: $\text{Fe}_{\text{REATIVO}}$ e $\text{Fe}_{\text{PIRITA}}$. Inicialmente, o $\text{Fe}_{\text{REATIVO}}$ foi extraído com solução de $\text{HCl } 1\text{ M}$ e agitação de 16 h para a extração das frações que podem ser reduzidas, seguido de pré-tratamento para remoção de Fe associado aos silicatos usando $\text{HF } 10\text{ M}$ e matéria orgânica com H_2SO_4 concentrado. Finalmente, foi utilizado ácido nítrico HNO_3 concentrado e 2 horas de agitação, para a extração do $\text{Fe}_{\text{PIRITA}}$. Entre cada etapa, as amostras com os extratores foram centrifugadas a 3.500 RPM durante 15 minutos para a separação do material. Em seguida, as amostras eram lavadas com água destiladas e novamente centrifugadas. Nos extratos, os conteúdos de Fe foram determinados utilizando espectroscopia de Absorção Atômica (Thermo Scientific, iCE 3000 Series) e os conteúdos de $\text{Fe}_{\text{REATIVO}}$ e $\text{Fe}_{\text{PIRITA}}$ foram calculados considerando a massa seca dos solos. Assim, foi possível obter o grau de piritização (*Degree of pyritization*, DOP), de acordo com a equação

$$\text{DOP (\%)} = \text{Fe}_{\text{PIRITA}} * 100 / (\text{Fe}_{\text{REATIVO}} + \text{Fe}_{\text{PIRITA}})$$
(HUERTA-DIAZ; MORSE, 1992; NÓBREGA et al., 2018)

Análise Estatística

Os resultados analíticos correspondentes a decomposição da matéria orgânica, índices S e K, e análises foram comparados utilizando Análise de Variância (ANOVA), e comparada com o teste Tukey ($p \leq 0.05$) a fim de verificar se existe algum tratamento que pode substituir aqueles propostos pelo TBI.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da área

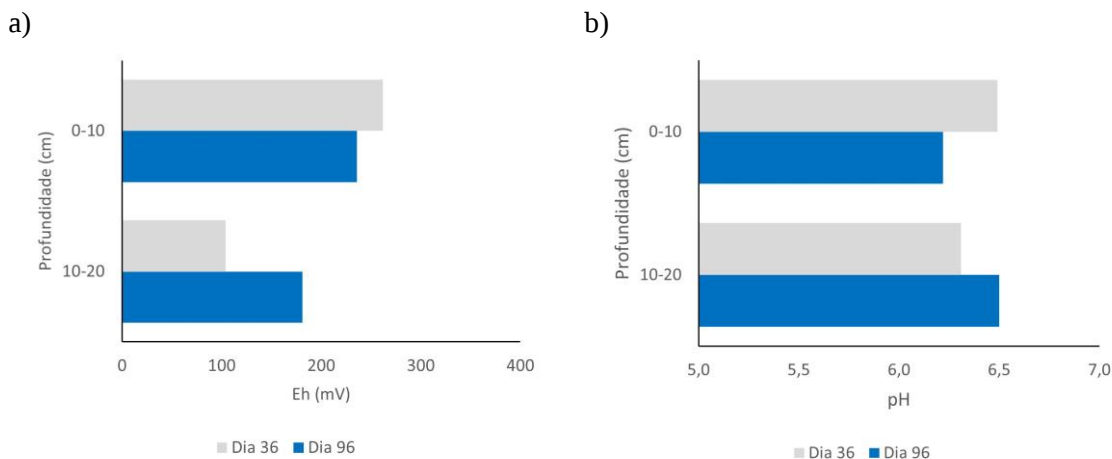
Os solos da área de estudo apresentaram uma textura predominantemente arenosa, com teores médios de areia superiores a 85% (média±desvio padrão: 88,7±1,8 %) e teores de argila inferiores a 10% (média±d.p.: 2,0±2,7 %; Tabela 2). Ao analisar os dois períodos estudados, não foi observado uma diferença estatística significativa, tampouco diferenças entre as duas profundidades. Os valores de pH dos solos da área de estudo foram APROXIMADAMENTE neutros, variando entre 6,2 e 6,5, com valor médio $6,4 \pm 0,3$; Figura 7, sem diferença significativa entre as profundidades ou períodos analisados. Além disso, foram observados valores de potencial redox (Eh) entre +104 e +262 mV, apresentando um valor médio de $+201 \pm 103$ mV; Figura 6, de modo que os valores em superfície foram, em média, $+251 \pm 65$ mV, enquanto que os valores em subsuperfície foram $+142 \pm 113$ mV, indicando condições predominantemente sub-óxicas nas duas camadas ($+100 < Eh < +350$ mV; OTERO et al., 2009). Essas condições físico-químicas e de granulometria medidas para o local de estudo são típicas de manguezais da costa semiárida do Brasil, sob influência de campos de dunas, que geralmente apresentam valores de pH e Eh ligeiramente mais elevados aos valores observados em outros compartimentos da costa Brasileira (FERREIRA et al., 2022). Contudo, as condições físico químicas podem sofrer variações sazonais significativas na costa semiárida, controlando a dinâmica de decomposição da matéria orgânica (FERREIRA et al., 2021).

Tabela 2. Composição granulométrica dos solos para estuário do rio Pacoti ao longo do experimento

Dia	Profundidade (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
0	0 - 10	0,0	9,8	90,2
	10 - 20	0,0	9,8	90,2
36	0 - 10	6,5	8,1	85,4
	10 - 20	3,7	7,3	89,0
96	0 - 10	0,0	11,4	88,6
	10 - 20	1,6	9,8	88,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7. Valores médios de Eh e pH no estuário rio Pacoti



Fonte: Elaborado pelo autor

Os conteúdos de carbono orgânico total (COT) variaram entre 1,4 e 4,0 %, com valor médio igual a $2,6 \pm 0,7$ % (Tabela 3). Não foram observadas variações nos conteúdos de carbono ao comparar as amostras de superfície e sub-superfícies, nem entre os períodos avaliados. O mesmo padrão foi observado para os conteúdos de nitrogênio total (NT), com valor médio $0,13 \pm 0,03$ %, sem diferenças significativas entre profundidades ou períodos. Em relação à razão C:N, não foi observado uma diferença significativa quando comparado os períodos (média: $20,1 \pm 2,4$). Por outro lado, nas amostras superficiais (média: $18,9 \pm 2,0$) apresentaram valores inferiores, quando comparadas aos valores sub-superficiais (média: $21,4 \pm 2,1$). Os menores valores obtidos para as amostras de superficiais sugerem uma matéria orgânica (MO) mais lábil, o que facilita sua decomposição (FERREIRA et al., 2024).

Os valores de Fe reativo oscilaram entre 22,3 e 66,2 $\mu\text{mol g}^{-1}$, com valor médio $37,4 \pm 11,3$ $\mu\text{mol g}^{-1}$, enquanto os valores de Fe pirítico variaram entre 3,1 e 51,3 $\mu\text{mol g}^{-1}$. Ao comparar $\text{Fe}_{\text{PIRITA}}$ valores significativamente menores foram observados nas amostras superficiais (média: $19,8 \pm 15,4$ $\mu\text{mol g}^{-1}$) comparado aos valores sub-superficiais (média: $33,9 \pm 14,5$ $\mu\text{mol g}^{-1}$). Do mesmo modo, menores valores de DOP foram observados nas amostras superficiais (média: $32,6 \pm 19,2$ %), comparada às amostras de subsuperfície (média: $44,7 \pm 11,7$ %).

Para todas as variáveis relacionadas à dinâmica do Fe, não foi observado uma variação entre os períodos amostrados. Em consequência dos valores do potencial redox mais elevados e das condições geológicas do entorno, a costa semiárida apresenta menores valores de Fe reativo, DOP

e COT quando comparada à outros compartimentos da costa (e.g., costa granítica; (FERREIRA et al., 2022), controlando a provisão de serviços ecossistêmicos (FERREIRA et al., 2024), bem como reforçando a necessidade de estudos e métodos padronizados como o TBI para identificar a variabilidade desse ecossistema (FERREIRA et al., 2022).

Tabela 3. Conteúdos de C orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), relação C:N, bem como conteúdos de Fe reativo, pirítico e grau de piritização (DOP), para o estuário do rio Pacoti

Dia	Profundidade (cm)	COT	NT	C:N	F _{REATIVO}	F _{EPIRITA}	DOP
		(%)			(μmol g ⁻¹)	(%)	
0	0 - 10	2,2	0,11	20,0	29,9	31,4	51,3
	10 - 20	2,0	0,09	22,8	28,1	30,9	52,4
36	0 - 10	2,9±0,6	0,14±0,02	19,8±2,0	40,5 ± 9,5	22,7±18,3	31,7±18,9
	10 - 20	2,7±0,8	0,13±0,02	20,8±2,6	38,2±3,2	38,4±14,0	48,9±10,5
96	0 - 10	1,8±0,5	0,11±0,03	17,2±1,4	26,4±3,8	12,0±12,5	27,7±23,4
	10 - 20	3,2±0,7	0,14±0,02	22,1±1,6	49,0±17,7	29,0±16,2	36,5±12,2

Fonte: Elaborado pelo autor

Decomposição da matéria orgânica

Avaliando as taxas de decomposição nas bolsas padrão, observou-se que os percentuais mais baixos de decomposição foram registrados para o chá rooibos padrão (CRT) ao longo dos 96 dias, atingindo um valor máximo de entre 33,0 e 34,8 % (média aos 96 dias: 33,2±1,3%) Por outro lado, o maior percentual de decomposição foi observado para o chá verde padrão (CVT; Figura 7), com média 79,9±2,8% no mesmo período. Considerando os materiais alternativos, o chá comercial verde Sencha Lipton® (CSL) apresentou uma porcentagem de decomposição ainda maior, alcançando 84,1±1,3% nesse intervalo de tempo, demonstrando maior eficiência na degradação em comparação ao padrão do TBI (Figura 8.c).

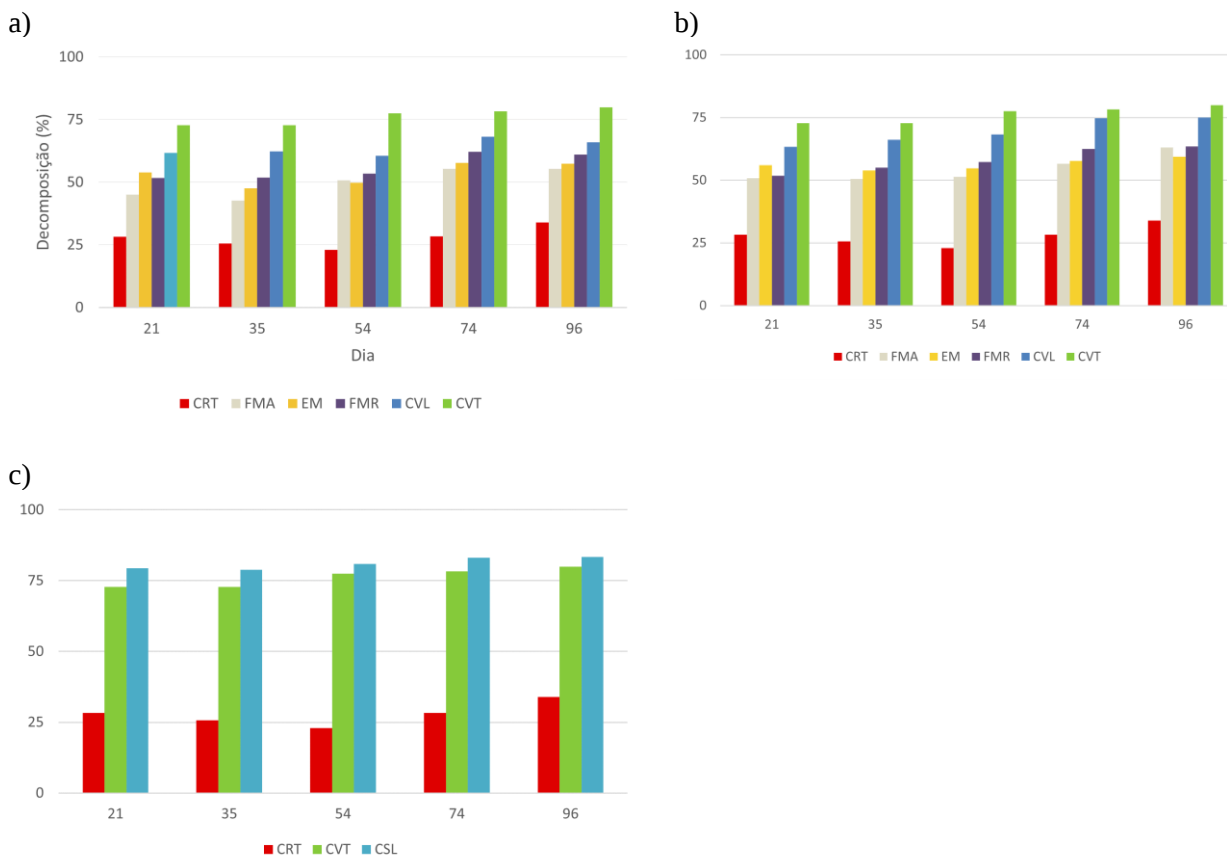
Entre os materiais vegetais experimentais avaliados nos tecidos escaline e perlon, o chá verde tradicional Lipton® (CVL), apresentou as maiores porcentagens de decomposição, variando entre 65,9 ± 4,0 % e 75,3 ± 1,0 % para escaline e perlon, respectivamente. Seguindo as folhas de *R. mangle* (FMR) registraram percentuais de decomposição médio de 59,9 ± 3,3 % e 62,1 ± 4,6 % para os mesmos tecidos ao final do experimento (96 dias; Figura 8). As folhas de *Avicennia* (FMA)

apresentaram uma média de decomposição de $55,4 \pm 4,5$ e $63,1 \pm 2,6$ % para os tecidos escaline e perlon, que foram similares aos valores observado para a erva mate (EM), com média $56,4 \pm 4,3$ e $59,4 \pm 1,5$ % para escaline e perlon.

Ao avaliar o efeito dos tecidos na decomposição, pode-se observar que o tecido escaline proporcionou os menores percentuais de decomposição para todos os materiais experimentais. Após 96 dias, os valores de decomposição variaram entre 53,1 % e 59,95 % (Figura 8.a). No entanto, para o tecido perlon (Figura 8.b) estão entre 55,52 % e 65,27 %, sendo próximos aos percentuais de decomposição do tecido original Lipton® que tem valores desde 60,14% até 65,75 %

Para as bolsas de chá verde tradicional Lipton® (CVL) com tecido original biodegradável Lipton®, foi determinada uma decomposição de 46,10 % aos 21 dias; após isso, devido à rápida decomposição do tecido original, não foi possível dar continuidade à análise dos dados para este material.

Figura 8. Porcentagem de decomposição para cada tipo de matéria orgânica ao longo do tempo, comparando os tecidos experimentais (perlon e escaline) com o tecido original Lipton®

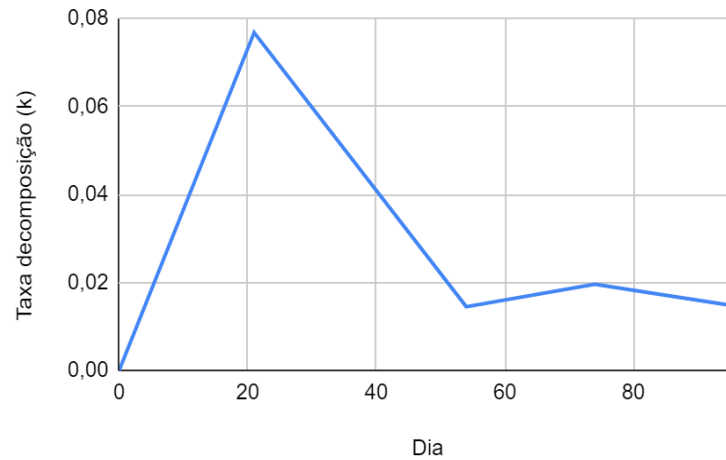


Chá verde tradicional Lipton® (CVL), Folhas Rhizophora mangle (FMR), Folhas Avicennia germinans (FMA), Erva-mate (EM), Chá Rooibos padrão TBI (CRT), Chá verde padrão TBI (CVT), Chá verde Sencha Lipton® (CSL). Gráfica (a): Porcentagem de decomposição para os materiais vegetais (FMA, FMR, EM, CVL) com tecido escaline e tecido original do método TBI (CRT, CVT). Gráfica (b): Percentagens de decomposição para os materiais vegetais (FMA, FMR, EM, CVL) com tecido perlon e tecido original do método TBI (CRT, CVT). Gráfica (c): Percentagens de decomposição para o material vegetal convencional (CVT) com tecido original non-woven e tecido original do método TBI (CRT, CVT). Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando as taxas de decomposição ao longo do experimento, nos primeiros 21 dias do experimento foi observado o pico na taxa de decomposição $k = 0,077$ e fator de estabilização $S = 0,357$, onde mostra que ocorreu uma rápida decomposição, a qual diminuiu até o dia 54 ($k = 0,014$; $S = 0,279$) (Tabela 4), seguindo até o dia 96, uma decomposição mais uniforme da matéria orgânica no solo de manguezal durante este estudo (Figura 9). Sendo a taxa de decomposição é menor que o fator de estabilização ($k < S$), relação típica em ecossistemas de manguezal, isso sugere que o ecossistema funciona como um bom sumidouro de carbono. Keuskamp indica que nesses ecossistemas a matéria orgânica se decompõe lentamente, com um valor baixo de k ($0,01 - 0,05 \text{ dia}^{-1}$) e alta estabilização, com valores de S entre 0,2 e 0,6 (Tabela 4). Seguindo esses parâmetros, embora os valores obtidos para k sejam baixos, indicando uma lenta decomposição na área, os valores médios observados para o fator de estabilização sugerem que nem toda a matéria orgânica é efetivamente estabilizada.

Beloto (2024), aponta que existem diferentes variáveis externas que podem influenciar na rapidez de decomposição da matéria orgânica, como o clima, a temperatura, a precipitação e as características oceanográficas, entre outras, em seu estudo realizado no estuário do rio Pacoti durante a estação seca, foram identificados valores médios de $k = 0,026$ e $S = 0,284$, para os 25 dias. No entanto, mesmo em um mesmo local, as taxas de decomposição da matéria orgânica podem variar, sempre influenciadas pelas condições ambientais externas. Neste sentido, uma vez que as condições lito-climáticas variam ao longo da costa brasileira, controlando as condições físico-químicas, é importante avaliar como a decomposição das bolsas alternativas variam na costa brasileira, a fim de compreender melhor a habilidade destes ecossistemas como sumidouros de carbono.

Figura 9. Taxa de decomposição (k) ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4. Fator de estabilização (S) e taxa de decomposição (k) para o estuário do rio Pacoti

Dia	Fator estabilização (S)	Taxa decomposição (k)
21	0,357	0,077
54	0,305	0,014
74	0,377	0,020
96	0,279	0,015

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar se as médias das taxas de decomposição das amostras de bolsas de chá diferem significativamente entre si. Esse teste verifica a hipótese nula de que todas as amostras possuem médias iguais. Após identificar diferenças significativas ($p < 0,05$) com o ANOVA, foi aplicado o teste de Tukey, um método pós-hoc que realiza comparações pareadas entre as médias das amostras para identificar quais grupos diferem entre si. Esse teste calcula a diferença entre as médias de cada par de amostras, fornecendo valores de p ajustados para múltiplas comparações e intervalos de confiança para as diferenças observadas.

Os resultados do teste de Tukey mostraram que algumas combinações pares de amostras não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$), como o chá verde padrão TBI (CVT) frente

ao chá verde Sencha Lipton® (CSL) e frente ao chá verde tradicional Lipton® (CVL); assim como entre as folhas de mangue *R. mangle* (FMR) e *A. germinans* frente à erva mate (EM). Isso indica, por exemplo, que as bolsas CSL podem ser alternativas adequadas ao chá verde padrão TBI (CVT), amplamente utilizado na metodologia de análise de decomposição (KEUSKAMP et al., 2013). Adicionalmente, a similaridade na decomposição das folhas de *A. germinans* (FMA) e *R. mangle* (FMR) sugere que ambas as espécies podem ser utilizadas em experimentos comparativos ou simultâneos.

Por outro lado, embora a erva-mate (EM) tenha sido avaliada como possível substituta ao chá vermelho padrão rooibos Lipton® (CRT), os resultados indicaram que suas porcentagem de decomposição diferem significativamente, sendo maiores para à EM, das observadas para o chá vermelho. Isso reforça a necessidade de explorar materiais mais recalcitrantes para aprimorar a avaliação da decomposição em solos de manguezal.

CONCLUSÕES CAPÍTULO 1

Métodos padronizados, como o Tea Bag Index (TBI) utilizados para mensuração da decomposição da matéria orgânica em manguezais são essenciais para possibilitar comparações globais. No entanto, a implementação eficaz desses métodos exige que seja viável para todos os países, mesmo para aqueles onde os chás padrão sugeridos por Keuskamp et al. (2013) não estão comercialmente disponíveis. Assim, propõe-se o uso de chás alternativos e folhas de espécies de mangue locais em substituição aos chás convencionais os chás indicados pela metodologia de TBI, visando a universalização do método e sua acessibilidade para países onde as opções padrão são restritas comercialmente. Dessa forma, foi possível determinar que folhas de manguezal local, como as de *Rhizophora mangle*, podem substituir o chá verde padrão utilizado no método TBI. Além disso, um chá verde convencional, como o Sencha Lipton®, apresentou resultados favoráveis, reforçando a viabilidade de que sejam materiais alternativos para avaliar a decomposição da matéria orgânica em solos de manguezal substituindo ao chá verde utilizado no TBI. Esses resultados destacam a possibilidade de adaptar o método TBI para condições locais, utilizando recursos disponíveis e ampliando sua aplicabilidade em diferentes contextos ambientais. Em relação ao material alternativo para substituir o chá vermelho, não foi possível determinar que a erva-mate seja a melhor opção. O baixo percentual de decomposição do CRT está associado ao alto teor de lignina presente nesse material vegetal, o que retarda sua degradação, por esse motivo, sugere-se a análise de novos materiais, preferencialmente mais recalcitrantes, que possam oferecer características adequadas para substituí-los.

REFERÊNCIAS

- ALONGI, D. M. Carbon sequestration in mangrove forests. **Carbon Management**, v. 3, n. 3, p. 313–322, jun. 2012.
- ALONGI, D. M. The Impact of Climate Change on Mangrove Forests. **Current Climate Change Reports**, v. 1, n. 1, p. 30–39, mar. 2015.
- ALVES, A. N.; BARRRAQUI, N. Avaliação científica das propriedades dos ecossistemas de manguezais e seu papel na mitigação da intensificação do efeito estufa. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 10, n. 2, p. 145–160, 29 abr. 2024.
- BARBOSA, L. N. Caracterização geoecológica do estuário do rio Pacoti-Ceará: ações para um planejamento integrado. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 2, p. 971–980, 27 out. 2016.
- DIAS, J. A ANÁLISE SEDIMENTAR E O CONHECIMENTO DOS SISTEMAS MARINHOS (Uma Introdução à Oceanografia Geológica). 1 jan. 2004.
- FERREIRA, A. D. et al. Seasonal drives on potentially toxic elements dynamics in a tropical estuary impacted by mine tailings. **Journal of Hazardous Materials**, v. 474, p. 134592, ago. 2024.
- FERREIRA, T. O. et al. Windsock behavior: climatic control on iron biogeochemistry in tropical mangroves. **Biogeochemistry**, v. 156, n. 3, p. 437–452, dez. 2021.
- FERREIRA, T. O. et al. Litho-climatic characteristics and its control over mangrove soil geochemistry: A macro-scale approach. **Science of The Total Environment**, v. 811, p. 152152, 10 mar. 2022.
- FUNCEME. **Calendário de Chuvas do Estado do Ceará**. Disponível em: <<https://chuvas.funceme.br/ano/municipios/media/2024>>. Acesso em: 3 out. 2024.
- GRIMM, K. et al. **Including Local Ecological Knowledge (LEK) in Mangrove Conservation & Restoration. A Best-Practice Guide for Practitioners and Researchers**. [s.l.] Global Mangrove Alliance, 2024. Disponível em: <<http://repository.si.edu/xmlui/handle/10088/118227>>. Acesso em: 13 ago. 2024.
- GRUBER, N.; GALLOWAY, J. N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. **Nature**, v. 451, n. 7176, p. 293–296, jan. 2008.
- HATJE, V. et al. Blue carbon stocks, accumulation rates, and associated spatial variability in Brazilian mangroves. **Limnology and Oceanography**, v. 66, n. 2, p. 321–334, fev. 2021.
- HERNANDEZ, J. O.; PARK, B. B. Litterfall Production and Decomposition in Tropical and Subtropical Mangroves: Research Trends and Interacting Effects of Biophysical, Chemical, and Anthropogenic Factors. **Wetlands**, v. 44, n. 2, p. 23, fev. 2024.
- HUERTA-DIAZ, M. A.; MORSE, J. W. Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 56, n. 7, p. 2681–2702, 1 jul. 1992.
- JENNERJAHN, T. C. Relevance and magnitude of “Blue Carbon” storage in mangrove sediments: Carbon accumulation rates vs. stocks, sources vs. sinks. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 247, p. 107027, dez. 2020.
- KEUSKAMP, J. A. et al. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 4, n. 11, p. 1070–1075, nov. 2013.
- LEAL, M.; SPALDING, M. D. **The State of the World’s Mangroves 2024**. [s.l.] Global Mangrove Alliance, jul. 2024. Disponível em: <<https://repository.si.edu/handle/10088/119867>>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- MCLEOD, E. et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 9, n. 10, p. 552–560, dez. 2011.
- NÓBREGA, G. N. et al. Pedological Studies of Subaqueous Soils as a Contribution to the Protection of Seagrass Meadows in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0170117, 15 fev. 2018.
- NÓBREGA, G. N. et al. The importance of blue carbon soil stocks in tropical semiarid mangroves: a case study in Northeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 12, p. 369, jun. 2019.
- OTERO, X. L. et al. Geochemistry of iron and manganese in soils and sediments of a mangrove system, Island of Pai Matos (Cananeia — SP, Brazil). **Geoderma**, v. 148, n. 3–4, p. 318–335, jan. 2009.

ROVAI, A. S. et al. Brazilian Mangroves: Blue Carbon Hotspots of National and Global Relevance to Natural Climate Solutions. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 787533, 3 jan. 2022.

SANDERS, C. J. et al. Elevated rates of organic carbon, nitrogen, and phosphorus accumulation in a highly impacted mangrove wetland: SANDERS ET. AL.; OC, N AND P FLUX IN IMPACTED MANGROVES. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 7, p. 2475–2480, 16 abr. 2014.

SEMACE. **Área de Proteção Ambiental do Rio Pacoti**. Disponível em: <<https://www.semace.ce.gov.br/2010/12/08/area-de-protecao-ambiental-do-rio-pacoti/>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SIMPSON, L. T. et al. Do global change variables alter mangrove decomposition? A systematic review. **Global Ecology and Biogeography**, v. 32, n. 11, p. 1874–1892, nov. 2023.

SUÁREZ-ABELENDIA, M. et al. The effect of nutrient-rich effluents from shrimp farming on mangrove soil carbon storage and geochemistry under semi-arid climate conditions in northern Brazil. **Geoderma**, v. 213, p. 551–559, jan. 2014.

WANG, J. et al. Research on the carbon emission effect of the seven regions along the Belt and Road—based on the spillover and feedback effects model. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128758, out. 2021.

WEATHER SPARK. **Clima, condições meteorológicas e temperatura média por mês de Eusébio (Ceará, Brasil)**. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/31124/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Eus%C3%A9bio-Cear%C3%A1-Brasil-durante-o-ano>>. Acesso em: 16 out. 2024.

CAPÍTULO 2. Análise dos impactos da carcinicultura na decomposição da matéria orgânica em solos de manguezais aplicando o TBI

Resumo

Os manguezais são ecossistemas costeiros altamente relevantes, considerados dos mais produtivos do planeta, que desempenham um papel crucial na biodiversidade costeira e nas estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Por apresentar elevada produção primária que contribui para a incorporação da biomassa ao solo como matéria orgânica, juntamente com as condições anaeróbias, reduz a decomposição da matéria orgânica e favorece a retenção de carbono. O Brasil abriga a maior extensão de manguezais na América do Sul, no entanto esses ecossistemas enfrentam grande influência antrópica, especialmente pela carcinicultura, resultando na devastação de manguezais ao longo das costas norte e nordeste. A carcinicultura causa desmatamento, mudanças no uso do solo, eutrofização, contaminação por metais pesados e liberação de CO₂ para a atmosfera, além de mudanças nos processos biogeoquímicos fundamentais que reduzem o armazenamento do carbono. Entretanto, ainda é necessário aprofundar o entendimento dos efeitos da carcinicultura nos estoques de carbono do solo. Neste sentido, métodos como o *Tea Bag Index (TBI)* em combinação com a caracterização do solo, são úteis para avaliar a decomposição da matéria orgânica em solos impactados, fornecendo informações essenciais para melhorar a compreensão dos processos biogeoquímicos nestes ambientes. Assim, nas áreas impactadas apresentaram os valores mais elevados de Eh (233 mV) e o pH alcalino (7.95), refletem o impacto dos efluentes, resultando em um ambiente menos redutor e com maior teor de carbono, confirmando o maior percentual de decomposição da matéria orgânica nessas áreas de até o 79%. Por outro lado, o grau de piritização foi menor nas áreas não impactadas (DOP=15%), sugerindo uma maior capacidade de retenção de carbono devido à formação de pirita nestas áreas.

Palavras chave: Processos biogeoquímicos, mineralização, matéria vegetal, Tea Bag Index

Assessment of shrimp farming impacts on organic matter decomposition in mangrove soils using the TBI

Abstract

Mangroves are highly relevant coastal ecosystems, considered among the most productive on the planet, playing a crucial role in coastal biodiversity and in strategies for mitigating and adapting to climate change. Their high primary production contributes to the incorporation of biomass into the soil as organic matter, and the anaerobic conditions in these environments reduce organic matter decomposition, favoring carbon retention. Brazil hosts the largest expanse of mangroves in South America; however, these ecosystems face significant anthropogenic pressures, particularly from shrimp farming. This activity has led to the devastation of mangroves along the northern and northeastern coasts, causing deforestation, land-use changes, eutrophication, heavy metal contamination, and CO₂ emissions, as well as altering fundamental biogeochemical processes that reduce carbon storage capacity. Despite these challenges, the effects of shrimp farming on soil carbon stocks remain underexplored. Methods like the Tea Bag Index (TBI), combined with soil characterization, provide valuable tools to assess organic matter decomposition in impacted soils, offering essential insights into the biogeochemical processes in these environments. In impacted areas, higher redox potential ($E_h = 233 \text{ mV}$) and alkaline pH (7.95) reflect the influence of effluents, resulting in a less reducing environment and higher carbon content, corroborating the higher organic matter decomposition rate of up to 79% in these areas. Conversely, the degree of pyritization was lower in non-impacted areas (DOP = 15%), suggesting a greater carbon retention capacity due to pyrite formation in these regions.

Keywords: Biogeochemical processes, mineralization, organic matter decomposition, Tea Bag Index

INTRODUÇÃO

Manguezais são ecossistemas costeiros de alta relevância ambiental, reconhecidos como um dos mais produtivos do planeta (ALONGI, 2012; BELOTO, 2024), desempenhando papéis cruciais para a manutenção da biodiversidade e para estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (LEAL; SPALDING, 2024). Esses ecossistemas abrangem cerca de 75% das áreas costeiras localizadas entre as latitudes 25° N e 30° S (GIRI et al., 2011). Nos ecossistemas tropicais úmidos, como os manguezais, a elevada produção primária bruta (GPP) sustenta a geração de biomassa aérea e subterrânea, que é incorporada ao solo como matéria orgânica (ALONGI, 2020; HATJE et al., 2021). Além disso, a decomposição da matéria orgânica nos solos de manguezais é um processo essencial para o sequestro de carbono e a ciclagem de nutrientes, destacando a importância do estudo desses processos para o entendimento dos ciclos biogeoquímicos nesses ambientes (BELOTO, 2024).

No Brasil os manguezais ocupam 9.626 km² (GIRI et al., 2011; BRITO, 2014), incluindo a maior área contínua do mundo (NASCIMENTO Jr et al. 2013; SANTOS et al., 2017). Esse ecossistema se estende do norte do Amapá até Laguna, Santa Catarina, com cerca de 85 % desses ecossistemas concentrados na região Norte e Nordeste do Brasil (FERREIRA et al., 2022). Entretanto, extensas áreas têm sido degradadas devido a impactos antrópicos, como a produção de camarão, extensas porções de manguezais foram devastadas devido os efeitos antrópicos, especialmente pela aquicultura, produção de sal e alterações nos padrões de sedimentação ao longo das costas norte e nordeste do Brasil (FERREIRA; LACERDA, 2016).

Globalmente, práticas de conversão de terras, como as mencionadas, contribuíram para cerca de 43% da perda de manguezais entre 2000 e 2020, conforme relatório de 2024 da Global Mangrove Alliance (GMA). Dentre essas práticas, a carcinicultura industrial tem sido a principal responsável, provocando desmatamento, mudanças no uso do solo e contaminação por metais pesados (QUEIROZ et al., 2019). Desde a década de 1980, essa atividade tem causado sérios danos aos manguezais e às comunidades costeiras que dependem de seus serviços ecossistêmicos. Em regiões como Kerala e o leste da Índia, Indonésia, nordeste do Brasil e noroeste do México, a carcinicultura se consolidou como uma das atividades humanas mais impactantes, resultando em perdas significativas de biodiversidade e em desequilíbrios ecológicos em escala global (MMA, 2002; ROCHA, 2022; QUARTO; THAVARAJ, 2024; LEAL; SPALDING, 2024). No Equador, a expansão da carcinicultura resultou em uma perda significativa de manguezais ao longo do tempo. Estima-se que entre 25% e 60% da cobertura original de manguezais tenha sido transformada em

áreas de carcinicultura, com grandes impactos negativos, sendo que, em algumas regiões, o desmatamento atinge até 90%. Essa transformação alterou de maneira irreparável os ecossistemas intermareais, afetando a biodiversidade e os meios de subsistência tradicionais das comunidades locais (TREVINO; MURILLO-SANDOVAL, 2021). No estado do Ceará, a carcinicultura tem levado ao desmatamento de manguezais, e eutrofização, contribuindo para emissões de CO₂ e modificando a dinâmica hidrológica local, com impactos diretos no regime de inundação. Além disso, os efluentes não tratados dos tanques de camarão têm causado contaminação do solo e da água, comprometendo processos biogeoquímicos essenciais nesse ecossistema (ARAÚJO; FREIRE, 2007; CAVALCANTI, 2009). Esses efluentes apresentam elevados aportes de nutrientes, como nitrogênio (N) e fósforo (P), resultantes do uso intensivo de rações e fertilizantes na carcinicultura. Esses nutrientes estimulam os processos microbiológicos, intensificando a eutrofização e a mineralização do carbono da matéria orgânica. Como consequência, há um aumento na decomposição da matéria orgânica, o que diminui o estoque de carbono nos solos e promove sua liberação na forma de CO₂ para a atmosfera ou de carbono orgânico dissolvido para os corpos d'água (NÓBREGA et al., 2013). Entretanto, é necessário utilizar ferramentas adicionais para aprofundar o entendimento das dinâmicas de decomposição da matéria orgânica, que influenciam as emissões de CO₂. Assim, o método TBI fornece uma abordagem inovadora para quantificar esse fenômeno, permitindo a comparação direta entre áreas de manguezais impactadas pelos efluentes da carcinicultura frente a áreas preservadas. Assim, este estudo decorre da importância de estabelecer métodos práticos que possam ser replicados ao longo da costa brasileira.

Neste sentido, o método *Tea Bag Index (TBI)* avalia o processo de decomposição da matéria orgânica, fornecendo informações valiosas que, combinadas com a caracterização de solos, permitem ampliar a compreensão das dinâmicas de carbono entre diferentes tipos de áreas, facilitando sua comparação. Neste sentido este estudo busca ampliar a base de dados sobre a decomposição da matéria orgânica em solos de manguezais impactados diretamente pelos efluentes da carcinicultura e solos menos impactados. Essa informação será essencial para a criação de modelos preditivos de armazenamento de carbono (SIMPSON et al., 2023) e para a melhoria dos modelos climáticos (PAUL, 2007; KEUSKAMP et al., 2013), além de melhorar a compreensão dos processos de decomposição e as alterações na capacidade de sequestro de carbono em solos impactados pela carcinicultura que alteram a capacidade de sequestro de carbono (SUÁREZ-ABELENDIA et al., 2014). Assim, este estudo objetivou utilizar o método TBI, propondo mudanças e melhorias, para avaliar como os efluentes de carcinicultura podem afetar a taxa de decomposição da matéria orgânica em solos de manguezais. Para tanto, foram instalados 10 tratamentos

experimentais em três setores do estuário do Rio Acaraú (Ceará, NE-Brasil), onde estavam localizados uma área sob forte influência da carcinicultura e outra área sem efeito direto da carcinicultura, totalizando 6 áreas experimentais.

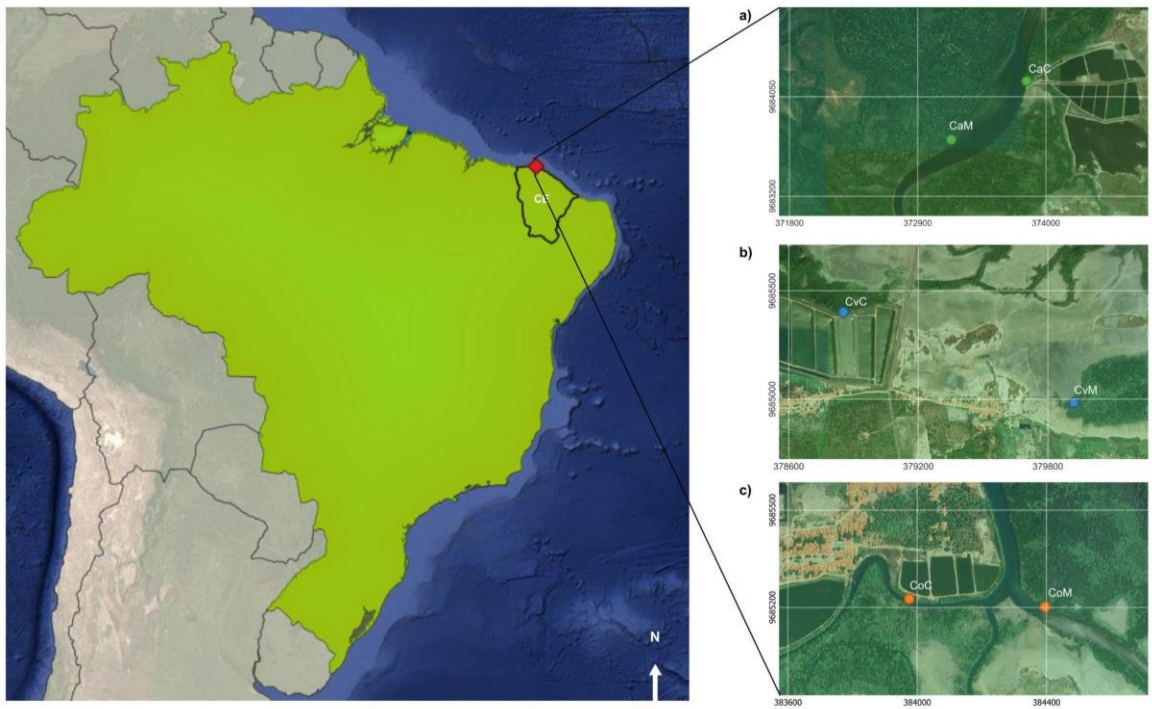
MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo corresponde à parte da região estuarina do rio Acaraú, que cobre uma área de 80 km² é localizada no Município de Acaraú e parte do município de Cruz (ARAUJO, 2019; SILVA, 2023), a oeste da cidade de Fortaleza, Ceará. A região é classificada como Sub-úmido seco (Índice de Aridez IA= 62), com uma precipitação anual média de 1.045,9 mm (FUNCEME, 2024; WEATHER SPARK, 2024) e temperatura anual média de 26° a 32 °C (MORAES; PORTELA, 2016), apresentando uma variação média de maré oscilando entre 2.7 m e 0,5 m (TÁBUA DE MARÉS, 2024). A dinâmica morfológica do estuário é influenciada pelos efeitos do vento no transporte e deposição de sedimentos, assim como pelos fluxos de água fluvial e as marés (MORAES; PORTELA, 2016). No estuário, áreas de manguezais vegetadas com *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana*, *Rhizophora mangle* e *Laguncularia racemosa* são desmatadas para a construção de tanques de carcinicultura, que resultam na emissão de grande volume de efluentes enriquecidos em nutrientes, afetando as características, o funcionamento e os serviços ambientais prestados pelos ecossistemas de manguezal (SILVA, 2023; BARCELLOS et al., 2019; QUEIROZ et al., 2019).

De fato, a carcinicultura é uma forte ameaça aos manguezais do Ceará, tendo em vista que o estado se destaca como um dos principais produtores nacionais de camarão, respondendo por 33,2% do volume total de camarão produzido no Brasil (IBGE, 2020; SILVA, 2023), destacando o estado e, conseqüentemente, uma das regiões de manguezais mais ameaçadas do Brasil.

Figura 9. Localização da área de estudo no Município de Acaraú



a) Sector Cacimbas: área de carcinicultura (CaC) e área de manguezal (CaM); b) Sector Currais Velhos: área de carcinicultura (CvC) e área de manguezal (CvM); c) Sector Coassu: área de carcinicultura (CoC) e área de manguezal (CoM). Imagens Google Satellite. Fonte: Elaborado pelo autor.

Delineamento amostral

Em cada uma das áreas, foram instalados dez (10) tratamentos experimentais, que consistiam em bolsas com material vegetal para analisar a decomposição, e que foram coletadas após 72 e 155 dias de incubação *in situ*. Os tratamentos consistiam em bolsas de chá fabricadas com tecidos perlon e escaline, preenchidas com dois chás comerciais Lipton® (Chá verde tradicional e Chá verde Sencha Lipton) e três materiais orgânicos (folhas de *R. mangle*, folhas de *A. germinans*, e folhas de *I. paraguariensis*), com 6 repetições para cada tecido, totalizando 60 bolsas ao longo do experimento por área e 360 bolsas para todo o experimento (Tabela 5).

Tabela 5. Tratamentos usados neste trabalho, enterrados no estuário do rio Acaraú

Material Vegetal experimental		
Material Vegetal	Código	Tecido
Folhas <i>Rhizophora mangle</i>	FMR	Escaline - Perlon
Folhas <i>Avicennia germinans</i>	FMA	Escaline - Perlon
Erva-mate	EM	Escaline - Perlon
Chá verde Sencha Lipton®	CSL	Escaline - Perlon
Chá verde tradicional Lipton®	CVL	Escaline - Perlon

Fonte: Elaborada pelo autor

Preparação do material e instalação do experimento

i. Materiais

Foram confeccionadas bolsas com dois tipos de tecido: escaline, composto por poliéster; e perlon fino com 75% poliéster e 25% viscose. Para este trabalho foram produzidas bolsas com dimensões de 6 cm de largura por 12cm de comprimento, sendo um total de 180 bolsas para cada tipo de tecido (Figura 2).

Cada bolsa foi preenchida com as 5 matérias vegetais experimentais: folhas de *Rhizophora mangle* e *Avicennia germinans*, que foram coletadas na área de estudo; erva mate, chá verde tradicional Lipton® e chá verde sencha Lipton®, que são chás convencionais da mesma marca. Deste modo, para as folhas de mangue foram coletadas 1,5 kg de cada tipo de folha, sem marca de predação ou dano visíveis, foram coletas as segundas ou terceiras a partir do ápice do ramo. Para a erva mate, optou-se pela Erva Mate tipo Argentina Tradicional, que não contém açúcar e contém alto conteúdo de galhos e material grosso. Cada tipo de material vegetal foi moído, em um moedor de facas de 3 a 4 vezes e posteriormente peneiradas com uma malha tamanho: 1 mm. Foram pesadas duas gramas de cada tipo de matéria vegetal e colocadas respectivamente as bolsas alternativas, foram fechadas em forma de tetraedro com um equipamento de calor manual, para selar sacolas plásticas.

Como medida de proteção das bolsas contra predadores maiores e facilitar a coletas das amostras, foram confeccionadas grades com tela de jardim preta, malha de 10 mm, da qual foram recortados retângulos de 18 cm de largura por 6 cm de comprimento e para as tampas, quadrados de 6 x 6 cm. totalizando 360 grades para este estudo (Figura 3).

ii. Instalação do experimento

Para o estudo, foram selecionados três setores do estuário do Rio Acaraú: Cacimbas (Ca) e Coassu (Co) Figura 10, que apresentavam uma vegetação predominante de *Rhizophora mangle*, enquanto que a área Currais Velhos (Cv) apresentava um predomínio de *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinans*. Em cada um dos setores, foram selecionadas uma área pristina, com baixo impacto de carcinicultura (M) e outra área diretamente afetada pelo descarte de efluentes oriundos da carcinicultura (C) (Tabela 6).

Figura 10. Área de manguezal impactado pela carcinicultura (C), localizada em Coassu, Acaraú



Fonte: Nóbrega, (2024)

Figura 11. Descarga direta de efluentes da carcinicultura localizado no Currais Velhos, Acaraú



Fonte: Foto do autor, 2024

Figura 12. Área de manguezal com predominância de *Rhizophora mangle* em Currais Velhos, Acaraú.



Fonte: Foto do autor, 2023

Tabela 6. Coordenadas UTM zona 24 S correspondentes para as áreas de estudo

Setor	Área	Coordenadas UTM, 24 S	
		Latitude	Longitude
Cacimbas (Ca)	CaC	-28.567	-40.1351
	CaM	-28.612	-40.1410
Currais Velhos (Cv)	CvC	-28.457	-40.0900
	CvM	-28.495	-40.0804
Coassu (Co)	CoC	-28.478	-40.0439
	CoM	-28.476	-40.0401

Área de carcinicultura (C), área não impactada (M). Fonte: Elaborada pelo autor

Coleta e análise de solo

Durante a instalação do experimento, foram medidos os parâmetros físico-químicos in situ: pH, utilizando um eletrodo portátil, previamente calibrado em soluções padrão pH 4.0 e pH 7.0; para o potencial redox (Eh), foi utilizado um eletrodo de vidro com valores ajustados para o eletrodo de referência (adicionando +244 mV); e salinidade da água com um refratômetro. Após a caracterização físico-química (Eh e pH), foram coletadas três amostras do solo até a profundidade de 10 cm, para cada área, as quais foram devidamente identificadas e etiquetadas e transportadas sob refrigeração para o laboratório. No laboratório, sub-amostras foram secas em estufa de circulação forçada (45 °C) até peso constante, enquanto as demais sub-amostras foram mantidas congeladas até posterior análise para o fracionamento do Fe.

Para o procedimento da análise granulométrica foi utilizado o método do densímetro utilizando a combinação de métodos químicos (0.015 M (NaPO₃)₆+1.0 M NaOH) e físicos (16h de agitação) para a dispersão das amostras após a oxidação da matéria orgânica utilizando peróxido de hidrogênio (H₂O₂) 15%. (GEE; BAUDER, 1979).

O conteúdo de carbono orgânico total (COT) e Nitrogênio Total (NT) no solo foram determinados por meio de um analisador elementar (EA 3000) após a eliminação dos carbonatos utilizando HCl 1 mol L⁻¹, em agitação durante 24 horas (Howard et al., 2014; Nóbrega et al., 2015). Em seguida, as amostras foram lavadas com água destilada e centrifugadas até o teste com nitrato de prata para indicar ausência de cloretos.

A extração de P biodisponível foi realizada segundo o método proposto por Mehlich-1 (1953) e adaptada por Tedesco et al., (1995). Para tanto, foi realizada uma extração de com solução extratora Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) na razão 1:5. A quantificação da

concentração de P nos extratos foi realizada pelo método colorimétrico do Azul de Molibdênio, utilizando 30 mg de ácido ascórbico como redutor, para finalmente ser feita a leitura da densidade ótica no fotocolorímetro em absorbância com longitud de onda $\lambda = 660$ nm (SANTOS et al., 2015).

Para o fracionamento do ferro (Fe) foram utilizadas 2 g das amostras congeladas e levadas para o processo de extração sequencial proposto por Berner (1970), obtendo assim duas frações operacionalmente definidas: Fe_{REATIVO} e Fe_{PIRITA}.

Inicialmente, o Fe_{REATIVO} foi extraído com solução de HCl 1 M e agitação de 16h, seguido de pré-tratamento para remoção de Fe associado aos silicatos (utilizando HF 10 M) e associado à matéria orgânica (utilizando H₂SO₄ concentrado; para mais detalhes, ver HUERTA-DÍAZ e MORSE, 1992). Após os pré-tratamentos, o Fe_{PIRITA} foi extraído utilizando HNO₃ concentrado e 2 horas de agitação. Entre cada etapa, as amostras com os extratores eram centrifugados a 3.500 RPM durante 15 minutos para a separação do material. Em seguida, as amostras eram lavadas com água destiladas e novamente centrifugadas. A concentração de Fe nos extratos foi determinada utilizando espectroscopia de absorção atômica (Thermo Scientific, iCE 3000 Series) e os conteúdos de Fe em cada uma das frações foram corrigidos para massa seca de amostra. Assim, foi possível determinar o valor do grau de piritização (DOP) (%) = $\text{Fe}_{\text{PIRITA}} / \text{Fe}_{\text{REATIVO}} + \text{Fe}_{\text{PIRITA}}$; (HUERTA-DÍAZ e MORSE, 1990; 1992; et al. 1988; NÓBREGA et al., 2018)

Coleta e análises das bolsas com Matéria vegetal

Para os materiais FMA, FMR, EM, CVL e CSL, foram coletadas 6 amostras de cada material tanto na primeira coleta (72 dias) quanto na segunda coleta (155 dias). Destas, metade correspondeu ao tecido perlon e a outra metade ao tecido escaline, respectivamente para cada ponto. Isso resultou em um total de 360 amostras para análise.

Aos 72 e 155 dias de incubação, as amostras foram retiradas, as bolsas foram secas em uma estufa de circulação forçada a 55°C, por aproximadamente 72 horas até peso constante e, em seguida, pesadas em uma balança eletrônica centesimal, caracterizando o peso remanescente (que consiste em material não decomposto e material mineral) e registrado o valor (P_{MRI°). Posteriormente, as amostras foram calcinadas em um forno mufla (Solid Steel, SSFM-N1030) a 450°C por duas (2) horas para oxidar toda a matéria orgânica remanescente, resultando apenas na massa dos componentes inorgânicos. O conteúdo de cada amostra calcinada, referente ao material inorgânico, foi pesado e registrado (P_{M°).

Para determinar o percentual de matéria orgânica perdida foram feitos cálculos por diferença de valores, desta forma obtivemos os seguintes valores:

Dados:

Peso inicial do conteúdo de matéria orgânica; P_o

*Peso da matéria orgânica residual e matéria inorgânica,
seco a 55 °C pos enterramento; P_{MRI}*

Peso da matéria inorgânica seco a 450°C; P_{MI}

Cálculos:

Peso da matéria orgânica residual (P_{MR}) = $P_{MRI} - P_{MI}$

(Eq.1)

*Matéria orgânica decomposta (%) = $\frac{(P_o - P_{MR}) * 100}{P_o}$*

(Eq.2)

Análise Estatística

Os resultados analíticos correspondentes a decomposição da matéria orgânica e análises de solos foram comparados utilizando Análise de Variância (ANOVA) ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS

Caracterização do solo

Os resultados indicaram a predominância da fração de areia em relação às outras frações em todas as áreas analisadas, tanto impactadas quanto não impactadas, com teores oscilando entre 45 e 85 %, e teores de argila oscilando entre 8 e 27 %. Ao comparar os três compartimentos, observou-se uma textura mais fina nos manguezais de Cacimbas (argila oscilando entre 24 e 27 %), enquanto nas áreas Currais velhos e Coassu os valores foram inferiores, oscilando entre 8 e 16%). Entretanto, ao comparar áreas impactadas e não impactadas mediante o método estatístico ANOVA, não foi observado uma variação significativa entre a composição granulométrica, o que possibilita a comparação entre áreas no mesmo setor do estuário, assim os valores médios nas áreas da carcinicultura foram para argila $17,3 \pm 9,7$ %, silte $13,0 \pm 5,8$ % e areia $69,7 \pm 15,3$ %. Nas áreas menos impactadas, os valores médios para argila $16,3 \pm 6,9$ %, silte $15,1 \pm 14,0$ % e areia $68,6 \pm 20,8$ %.

Os potencial de oxi-redução (Eh) para as áreas impactadas pelos efluentes da carcinicultura foi, em média ($+233 \pm 20$ mV), o qual indica que o solo de manguezal tem predominância de condições sub-óxicas ($100 < Eh < 350$ mV; OTERO et al., 2009), enquanto para as áreas não impactadas (média $+125 \pm 56$ mV) indicando as condições variam entre sub-óxicas e anóxicas (Figura 13.a; OTERO et al., 2019).

Os valores de pH nas áreas impactadas pelos efluentes da carcinicultura foram em média $7,95 \pm 0,49$, enquanto as áreas não impactadas apresentaram média $7,61 \pm 0,39$. Comparativamente, às áreas localizadas em Currais Velhos apresentaram maiores valores de pH ($8,17 \pm 0,33$), comparada às demais.

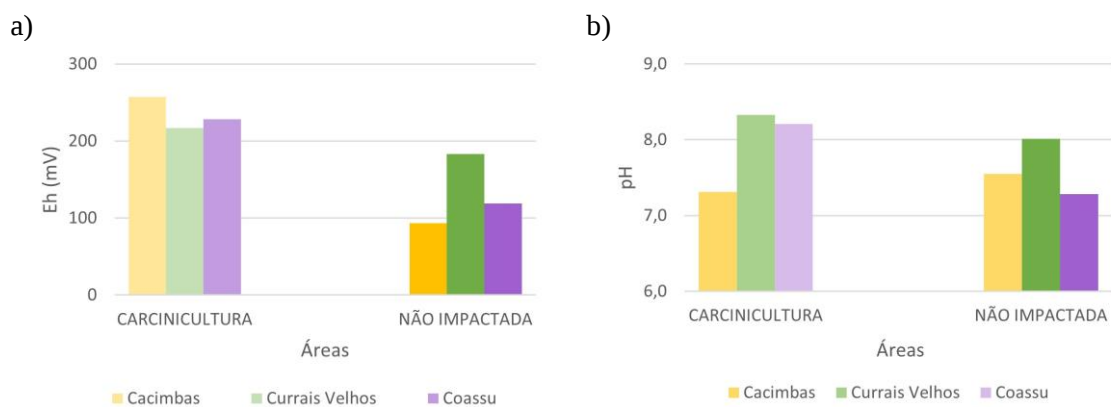
Tabela 7. Composição granulométricas dos solos das áreas da carcinicultura e áreas não impactadas.

Área	Amostra	Argila	Silte	Areia
		(%)		
Cacimbas (Ca)	Não impactada	24,20	30,60	45,20
	Impactada	27,50	17,80	54,60

<i>Currais Velhos (Cv)</i>	Não impactada	11,50	3,30	85,20
	Impactada	8,20	6,50	85,30
<i>Coassu (Co)</i>	Não impactada	13,20	11,60	75,30
	Impactada	16,20	14,60	69,20

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13. Valores de Eh e pH medidos na área impactada e na área não impactada, época chuvosa



Fonte: Elaborada pelo autor

Em relação aos conteúdos de C orgânico total (COT) e N total (NT), as áreas não impactadas possuem os maiores níveis, com médias de $1,92 \pm 0,62\%$ e $0,15 \pm 0,03\%$, respectivamente, em comparação com as áreas impactadas pelos efluentes, que registraram valores de $1,33 \pm 0,71\%$ e $0,13 \pm 0,06\%$, respectivamente (Tabela 10). Por outro lado, a concentração de fósforo (P) e o fósforo biodisponível, são maiores nas áreas impactadas pela carcinicultura, o que explica uma fonte externa de fornecimento deste nutriente, o que pode intensificar a mineralização da matéria orgânica comprometendo sua capacidade de reter carbono. Além disso, essas alterações podem impactar nos processos de ciclagem de nutrientes e a biodiversidade do ecossistema. Comparativamente, foram observados os maiores valores de P Biodisponível na área de Currais Velhos com valores de 50,8 e 63,3 para áreas preservadas e impactadas.

Tabela 8. Conteúdos de Carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), relação C:N e Fósforo (P) para as áreas de estudo

Área	Amostra	Eh (mV)	pH	COT	NT	C:N	P Biodisp.	Fe Reativo	Fe Pirita	DOP
				(%)			(mg kg ⁻¹)	(μmol g ⁻¹)		(%)
Cacimbas (Ca)	M	93	7,55	2,39	0,17	13,70	3,71	169,40	19,70	10,40
	C	257	7,31	1,36	0,12	11,00	17,33	149,90	4,20	2,90
Currais Velhos (Cv)	M	183	8,01	1,22	0,12	10,30	50,83	74,10	8,10	13,00
	C	217	8,33	0,61	0,08	8,10	56,51	63,30	0,20	0,20
Coassu (Co)	M	119	7,28	2,17	0,16	13,90	1,98	65,00	17,20	21,30
	C	228	8,21	2,03	0,19	10,80	4,08	148,60	24,40	14,20
Não Impactado (M)		132 ±46,46	7,61 ±0,37	1,90 ±0,62	0,15 ±0,03	12,6 ±2,00	19,54 ±27,10	102,84 ±57,86	15,00 ±6,10	14,90 ±5,70
Carcinicultura (C)		234 ±20,85	7,95 ±0,56	1,30 ±0,70	0,13 ±0,06	9,97 ±1,62	25,30 ±28,10	120,59 ±49,63	9,58 ±12,98	5,80 ±7,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Além dos menores valores de COT e N e maiores valores de P biodisponível, as áreas afetadas pela carcinicultura apresentaram menores valores do grau de piritização (DOP) em comparação com as áreas menos impactadas. Neste sentido, os conteúdos de Fe reativo variaram entre 63,3 e 169,4 μmol g⁻¹, enquanto os valores de Fe_{PIRITA} variaram entre 0,2 e 24,4 μmol g⁻¹. Comparativamente, em Coassu (Co), foram registrados os maiores valores de DOP, enquanto em currais velhos foram observados os menores valores de Fe_{REATIVO} os valores mais altos entre as três áreas de estudo, com 14,2% para a zona impactada e 21,3% para a zona menos impactada.

Decomposição da matéria orgânica

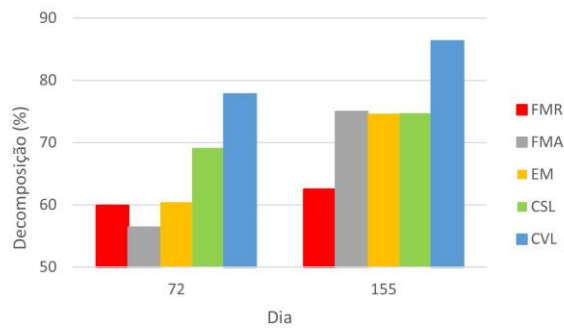
Na área impactada, utilizando o tecido perlon (Figura 14), os maiores percentuais de decomposição corresponderam ao chá verde tradicional Lipton® (CVL), variando de 79,5% no dia 72 a 87,1% no dia 155. Para o tecido escaline (Figura 15), os valores foram de 73,0% a 76,4% no mesmo intervalo de tempo.

Nas áreas preservadas, a maior decomposição também foi observada para o material vegetal CVL. Contudo, os percentuais foram ligeiramente menores em relação às outras áreas, assim, com o tecido perlon apresentou uma decomposição de 82,58% no dia 72 e 84,72% no dia 155. Para o tecido escaline, os valores variaram de 77,4% a 79,9% no mesmo período.

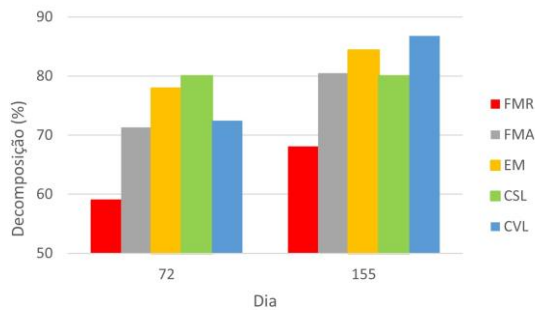
Por outro lado, as folhas de *Rhizophora mangle* (FMR) apresentaram os menores percentuais de decomposição ao longo do intervalo analisado, alcançando 69,1% para o tecido perlon e 56,4% para o tecido escaline nas áreas impactadas.

Figura 14. Porcentagem de perda de massa em função do tempo com o tecido perlon

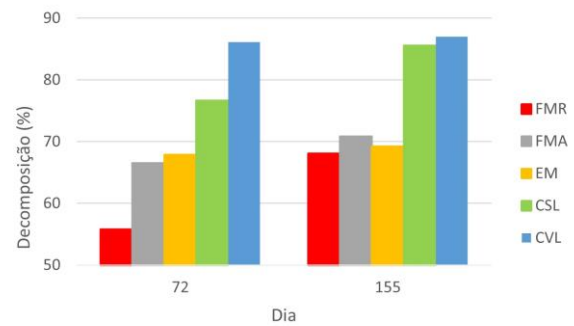
a.1)



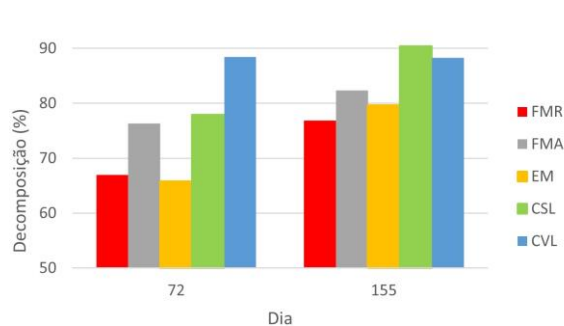
b.1)



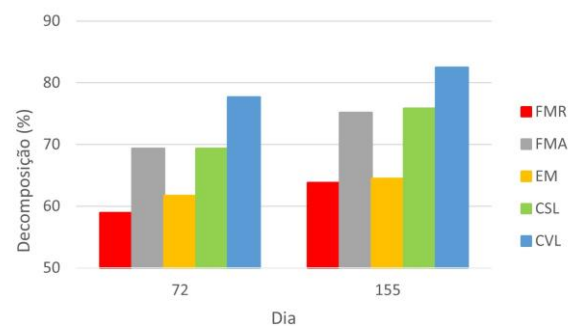
b.2)



c.1)



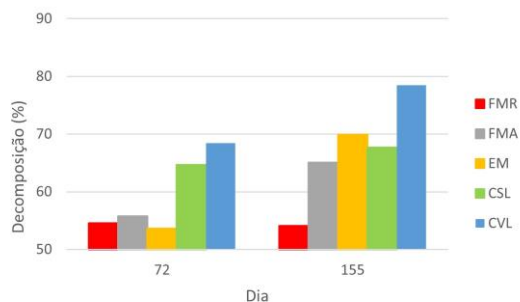
c.3)



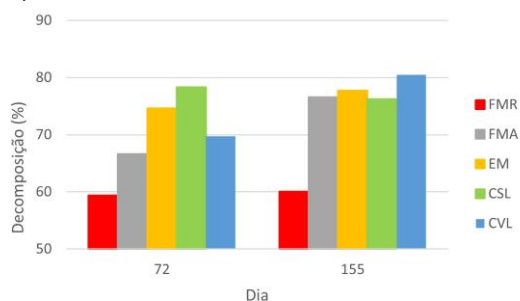
*Cacimbas Carcinicultura - CaC (a.1), Currais Velhos Carcinicultura - CvC (b.1), Currais Velhos Manguezal - CvM (b.2), Coassu Carcinicultura - CoC (c.1), Coassu Manguezal - CoM (c.2). Folhas *Rhizophora mangle* (FMR), Folhas *Avicennia germinans* (FMA), Erva-mate (EM), Chá verde Sencha Lipton® (CSL), Chá verde tradicional Lipton® (CVL). Fonte: Elaborado pelo autor*

Figura 15. Porcentagem de perda de massa em função do tempo com o tecido escaline.

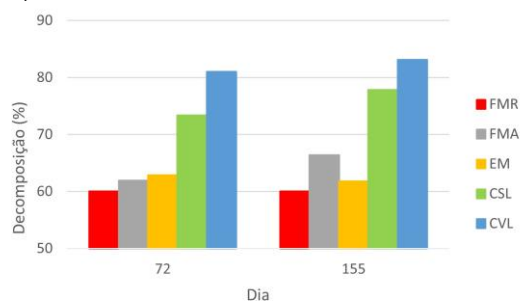
d.1)



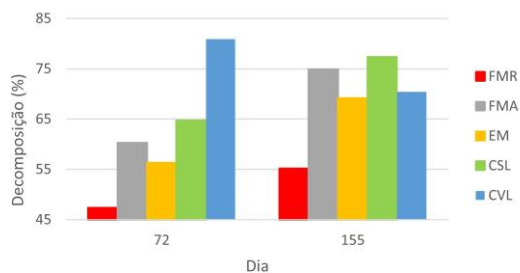
e.1)



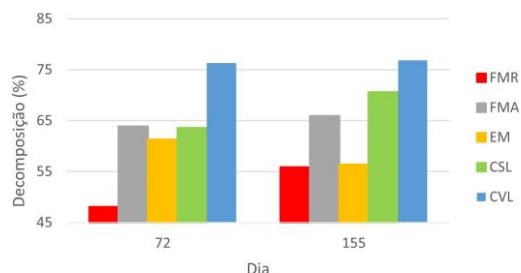
e.2)



f.1)



f.2)



Cacimbas Carcinicultura - CaC (d.1), Currais Velhos Carcinicultura - CvC (e.1), Currais Velhos Manguezal - CvM (e.2), Coassu Carcinicultura - CoC (f.1), Coassu Manguezal - CoM (f.2). Folhas Rhizophora mangle (FMR), Folhas Avicennia germinans (FMA), Erva-mate (EM), Chá verde Sencha Lipton® (CSL), Chá verde tradicional Lipton® (CVL). Fonte: Elaborado pelo autor.

DISCUSSÃO

Caracterização do solo

Nas duas áreas avaliadas, tanto aquelas com influência direta de efluentes quanto as com menor influência antrópica, foram observadas condições sub-óxicas, com valores médios de +234 mV e +132 mV, respectivamente. Os solos impactados pela carcinicultura apresentaram condições menos redutoras, conforme relatado por outros autores em estudos semelhantes da mesma área. (NÓBREGA et al., 2013; GARCÊS PASSOS, 2015). Na área impactada, foi registrado um valor médio de pH de 7,95, enquanto na área não impactada o pH médio foi ligeiramente menor, com 7,61. Em ambas as áreas de estudo, os solos apresentaram características ligeiramente alcalinas (Tabela 8) (GARCÊS PASSOS, 2015; BARBOSA et al., 2015). Nas áreas impactadas, os valores mais elevados de Eh e o pH alcalino refletem o impacto dos efluentes, resultando em um ambiente alcalino, que pode ser atribuído às medições realizadas durante o período chuvoso, quando o processo de inundação e secagem dos solos pode contribuir para o aumento desses valores, que são característicos dos manguezais semiáridos, ligeiramente mais salinos e alcalinos e menos redutor e, portanto, menores valores de DOP (FIRME, 2003; NÓBREGA et al., 2016). Essa condição contrasta com as áreas não impactadas, onde valores mais baixos de Eh, típicos de condições redutoras, estão associados a solos com alto teor de matéria orgânica e baixa disponibilidade de oxigênio e, portanto, com maior DOP (PONNAMPERUMA, 1972; NÓBREGA et al., 2016).

A relação entre a razão C:N e o Eh, permite compreender o processo de decomposição da matéria orgânica. Esses dois parâmetros apresentam uma relação inversamente proporcional, o que explica por que, na área não impactada, predominam condições mais redutoras e maiores teores de carbono em comparação às áreas impactadas. Isso confirma o maior percentual de decomposição da matéria orgânica nas áreas influenciadas pelos efluentes da carcinicultura, confirmado pelos ensaios de decomposição, o que indica, sobretudo, maiores taxas de emissão de CO₂ resultante das atividades antrópicas. Neste sentido, além dos impactos para as mudanças climáticas do desmatamento para a construção dos tanques (KAUFFMAN et al., 2018), a produção de camarão afeta as áreas circunvizinhas reduzindo os conteúdos de C nos solos e, conseqüentemente, elevando a emissão de C. De fato, considerando apenas a mudança de uso da Terra, para cada quilo de camarão produzido, são emitidos em média 1.603 kg CO₂ (KAUFFMAN et al., 2018), caracterizando uma das maiores emissões de carbono. Entretanto, para uma correta aferição dos impactos para as mudanças do clima desta atividade é necessário considerar, também, o incremento de decomposição resultante do descarte de efluentes. Estudos utilizando essa abordagem já

apontavam para o incremento das emissões de C e a intensificação da decomposição em áreas sob influência dos efluentes, devido ao aumento na disponibilidade de nutrientes como nitrogênio e fósforo nestas descargas, (e.g., SUAREZ-ABELENDIA et al., 2014; NÓBREGA et al., 2016; QUEIROZ et al., 2019; 2020).

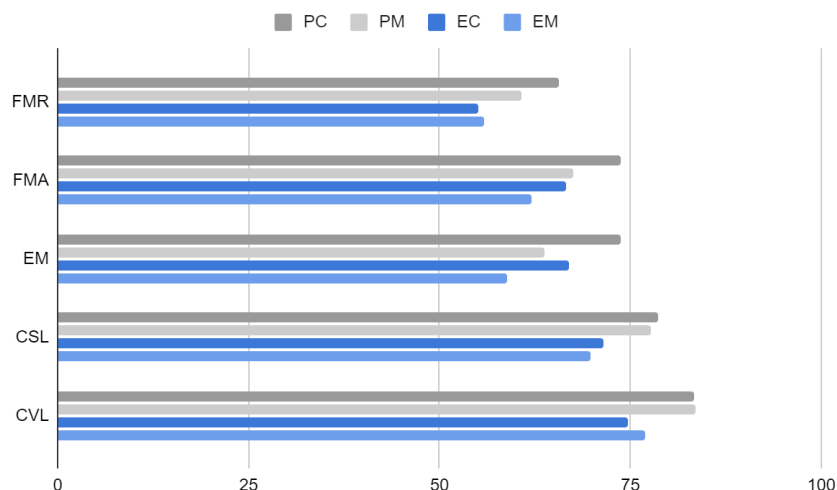
De fato, em manguezais pouco impactados, sob condições mais redutoras, a velocidade de decomposição da matéria orgânica é afetada, tornando-se menos eficiente, contribuindo também para o armazenamento de carbono nesses solos (GARCÊS PASSOS, 2015). Nessas mesmas condições, espera-se que ocorra uma maior taxa de desnitrificação, convertendo nitratos em nitrogênio gasoso (N_2) liberando-o na atmosfera.(LUVIZOTTO, 2013). Para as duas áreas o NT tem valores próximos ($NT = 0,13 \%$ e $NT = 0,15 \%$) para as de carcinicultura e áreas não impactadas, respectivamente. Enquanto isso, os valores de P Biodisponível para as áreas de carcinicultura é de $25,3 \text{ mg kg}^{-1}$, sendo maior em relação às áreas não impactadas com $19,5 \text{ mg kg}^{-1}$.

Os valores de F_{REATIVO} e F_{PIRITA} , NT e COT foram comparados entre as áreas menos impactadas e mais impactadas utilizando o teste de ANOVA. Nesse caso, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas, o que pode ser atribuído à quantidade limitada de amostras analisadas, possivelmente insuficiente para detectar variações entre as condições avaliadas.

Decomposição da matéria orgânica

Nas áreas impactadas e não impactadas por efluentes da carcinicultura, observou-se que a decomposição da matéria vegetal aumentou ao longo do tempo, independentemente do tipo de tecido utilizado, perlon ou escaline. No entanto, podemos concluir que existe uma tendência de aumento na decomposição ao longo do tempo, como era esperado, independentemente do tipo de tecido utilizado. Assim, observamos que, na área de carcinicultura com tecido perlon, a decomposição total da matéria vegetal variou de uma média de 70,7% no dia 72 para 79,4% no dia 155. Nas áreas preservadas, os valores foram ligeiramente menores, com uma variação de 68,9% para 74,2% no mesmo período. Pode-se confirmar que há maior decomposição da matéria orgânica com o tecido experimental perlon, bem como, fazendo uma comparação entre áreas impactadas e não impactadas, há maior percentual de decomposição em áreas influenciadas pelos efluentes da carcinicultura, independente do tecido experimental (Figura 16).

Figura 16. Porcentagem médio de perda de matéria orgânica para cada tratamento utilizado



Tecido perlon, zona carcinicultura(PC), tecido perlon, zona mangue (PM), tecido escaline, zona carcinicultura(EC), tecido escaline, zona mangue(EM). *Fonte: Elaborado pelo autor*

A maior ou menor percentagem de decomposição das folhas pode estar relacionada a vários fatores, como o tamanho, a composição dos compostos lábeis e refratários e a quantidade de lignina que regulam o processo de decomposição (BELOTO et al., 2024; ZHANG; LAANBROEK, 2020). Além disso, fatores externos como tempo de alagamento, a amplitude da maré, variações de salinidade, teor de matéria orgânica, entre outras, que faz com que cada área de manguezal crie condições diferentes para sua decomposição (SHIAU; CHIU, 2020). Assim, é importante registrar tanto características dos materiais quanto às condições ambientais em cada área, com o fim de possibilitar uma comparação e compreensão da interação entre os fatores externos e as características do solo.

CONCLUSÕES CAPÍTULO 2

Nos solos impactados pela carcinicultura, o grau de piritização observado nos solos foi significativamente menor em comparação aos solos preservados. Essa redução indica alterações nos processos biogeoquímicos naturais, possivelmente causadas pelo aporte de efluentes ricos em nutrientes. Da mesma forma, os resultados suportam uma maior decomposição da matéria orgânica nessas áreas, sugerindo uma capacidade reduzida de retenção de carbono nos solos influenciados pelos efluentes da carcinicultura. Os parâmetros analisados, como Eh, pH e granulometria, revelaram interações importantes entre as condições do solo e os processos de decomposição da matéria orgânica, destacando o papel das atividades antrópicas na intensificação da mineralização e na perda de carbono do solo.

Os resultados deste estudo forneceram informações valiosas sobre os processos que influenciam a decomposição da matéria orgânica e a retenção e o armazenamento de carbono nos solos de manguezais, evidenciando diferenças significativas entre áreas impactadas pela carcinicultura e áreas preservadas. Essa maior compreensão dos mecanismos subjacentes à decomposição da matéria orgânica representa uma contribuição significativa no conhecimento dos efeitos antrópicos e das estratégias de mitigação das mudanças climáticas nos manguezais. Além disso, destaca o papel essencial dos manguezais na conservação ambiental e no combate às mudanças climáticas, reforçando a importância de sua gestão e preservação

CONCLUSÕES GERAIS

O manguezal é um ecossistema de grande relevância, dado seu papel crucial na relação entre estoques de carbono, especialmente em seus solos. Assim, a melhor compreensão do processo de decomposição da matéria orgânica por meio da análise da taxa de decomposição e do fator de estabilização é essencial e pode revelar potenciais significativos para mitigação das mudanças climáticas. O método indireto do *TBI* nos aproxima de uma melhor compreensão do processo de decomposição da matéria orgânica e do potencial de sequestro de carbono associadas ao tipo de solo, ao impacto antrópico e às condições físico-químicas locais, como pH e Eh, no ecossistema de manguezal. Entretanto, o método apresenta limitações importantes, como a dificuldade de adquirir os chás padrão, agravada pela descontinuidade comercial e restrições de mercado. Essas dificuldades, evidenciadas especialmente na América do Sul, comprometem a eficácia do método. Portanto, é proposto o uso de materiais locais que possam ser padronizados e aplicáveis em diversas regiões, tornando o método mais eficiente e acessível para estudos globais. Além disso, a utilização de diferentes tipos de chá, como o chá verde padrão e folhas de manguezais, mostrou a influência do material vegetal na dinâmica de decomposição. O tecido perlon mostrou maior eficiência para medir a decomposição, destacando-se como uma alternativa viável para futuros experimentos em ecossistemas costeiros. Esses resultados reforçam a aplicabilidade do *TBI* como uma ferramenta prática para estudar os processos de ciclagem de carbono e a qualidade do solo em manguezais.

A carcinicultura apresenta impactos negativos significativos nos processos biogeoquímicos dos manguezais, modificando o ciclo do carbono e os mecanismos de decomposição da matéria orgânica. A descarga de efluentes ricos em nutrientes contribui para a eutrofização, ao mesmo tempo que reduz a capacidade desses ecossistemas de armazenar carbono de maneira eficaz. Além disso, as condições anóxicas decorrentes dessa atividade comprometem a decomposição da matéria orgânica, o que afeta diretamente serviços ecossistêmicos essenciais, como o suporte à biodiversidade e a manutenção da qualidade do solo. Essas alterações debilitam a resiliência dos manguezais frente às mudanças climáticas, incluindo o aumento do nível do mar e a ocorrência de eventos climáticos extremos. Assim, torna-se importante a adoção de estratégias sustentáveis que visem mitigar esses impactos e promover a conservação desses ecossistemas

REFERÊNCIAS

- ALONGI, D. M. Carbon sequestration in mangrove forests. **Carbon Management**, v. 3, n. 3, p. 313–322, jun. 2012.
- ALONGI, D. M. Global Significance of Mangrove Blue Carbon in Climate Change Mitigation. **Sci**, v. 2, n. 3, p. 67, 21 ago. 2020.
- ARAÚJO, M. V.; FREIRE, G. S. S. ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS EM ESTUÁRIOS: ESTUDO DO ESTUÁRIO DO RIO ACARAÚ, CEARÁ - BRASIL. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 24, p. 111–123, 14 dez. 2007.
- BARCELLOS, D. et al. Phosphorus enriched effluents increase eutrophication risks for mangrove systems in northeastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 142, p. 58–63, maio 2019.
- BELOTO, N. **BASES PARA A COMPREENSÃO DO POTENCIAL DE CARBONO AZUL EM MANGUEZAIS BRASILEIROS: UM EXPERIMENTO E UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**. Fortaleza: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2024.
- BRITO, F. P. D. COMPOSIÇÃO E FLUXO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM UM CANAL DE MARÉ NO ECOSISTEMA DE MANGUEZAL DO ESTUÁRIO DO RIO PARAÍBA DO SUL, COSTA NORTE DO RIO DE JANEIRO. 2014.
- CAVALCANTI, D. DIAGNÓSTICO DOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS NO MANGUEZAL DO RIO ACARAÚ (CEARÁ – BRASIL) DEVIDO À CARCINICULTURA. 2009.
- FERREIRA, A. C.; LACERDA, L. D. Degradation and conservation of Brazilian mangroves, status and perspectives. **Ocean & Coastal Management**, v. 125, p. 38–46, jun. 2016.
- FUNCEME. **Índices de aridez do Estado do Ceará. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos**, 2024. Disponível em: <http://www.funceme.br/?page_id=5826>. Acesso em: 1 out. 2024
- GIRI, C. et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 1, p. 154–159, jan. 2011.
- HATJE, V. et al. Blue carbon stocks, accumulation rates, and associated spatial variability in Brazilian mangroves. **Limnology and Oceanography**, v. 66, n. 2, p. 321–334, fev. 2021.
- KAUFFMAN, J. B.; BERNARDINO, A. F.; FERREIRA, T. O.; BOLTON, N. W.; GOMES, L. E. de O.; NOBREGA, G. N. Shrimp ponds lead to massive loss of soil carbon and greenhouse gas emissions in northeastern Brazilian mangroves. *Ecology and Evolution*, v. 8, p. 5530–5540, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ece3.4079>.
- KEUSKAMP, J. A. et al. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 4, n. 11, p. 1070–1075, nov. 2013.
- FERREIRA, A. C.; LAZERDA, L. D. Mangroves of Brazil: challenges and opportunities for their conservation. In: SANDILYAN, S.; EZHILARASAN, K.; ANAND, V. K. (Eds.). *Mangroves of the world*. Springer Verlag, 2022. Cap. 20, p. 325–345. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/AlexanderFerreira/publication/360851016_Mangroves_of_Brazil/links/6291510288c32b037b56d9fe/Mangroves-of-Brazil.pdf>
- LEAL, M.; SPALDING, M. D. **The State of the World's Mangroves 2024**. [s.l.] Global Mangrove Alliance, jul. 2024. Disponível em: <<https://repository.si.edu/handle/10088/119867>>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- MORAES, M. V. A. R.; PORTELA, J. P. Caracterização Geomorfológica da Planície Litorânea do município de Acaraú - Ceará. 2016.
- PAUL, E. A. (ED.). **Soil microbiology, ecology, and biochemistry**. 3rd ed ed. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2007.
- QUEIROZ, H. M. et al. Hidden contribution of shrimp farming effluents to greenhouse gas emissions from mangrove soils. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 221, p. 8–14, maio 2019.
- ROCHA, I. DE P. **Censo da carcinicultura dos estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte**. Natal, RN: Studio Jose Design, 2022.
- SANTOS, D. M. C. et al. First Assessment of Carbon Stock in the Belowground Biomass of Brazilian Mangroves. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 3, p. 1579–1589, set. 2017.

SILVA, G. D. **ESPÉCIES NÃO NATIVAS E A BIODIVERSIDADE: UM ESTUDO DE CASO SOBRE CAMARÕES PENEÍDEOS NO ESTUÁRIO DO RIO ACARAÚ, NORDESTE DO BRASIL**. Fortaleza: [s.n.].

SIMPSON, L. T. et al. Do global change variables alter mangrove decomposition? A systematic review. **Global Ecology and Biogeography**, v. 32, n. 11, p. 1874–1892, nov. 2023.

SUÁREZ-ABELENDA, M. et al. The effect of nutrient-rich effluents from shrimp farming on mangrove soil carbon storage and geochemistry under semi-arid climate conditions in northern Brazil. **Geoderma**, v. 213, p. 551–559, jan. 2014.

TÁBUA DE MARÉS. **Tábua de marés 2024 de Acaraú, Ceará para ir à pesca**. Disponível em: <<https://tabuademares.com/br/ceara/acarau>>. Acesso em: 2 out. 2024.

WEATHER SPARK. **Clima, condições meteorológicas e temperatura média por mês de Eusébio (Ceará, Brasil)**. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/31124/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Eus%C3%A9bio-Cear%C3%A1-Brasil-durante-o-ano>>. Acesso em: 16 out. 2024.

TREVINO, C. et al. Impacts of shrimp aquaculture on mangroves: a global perspective. *Aquaculture Reports*, v. 21, p. 1-10, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569121001721>>