



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

JOSÉ VÍTOR MACHADO RODRIGUES

**CARBONO AZUL NO SEMIÁRIDO NORDESTINO: ESTOQUE DE CARBONO
DO SOLO DE UM MANGUEZAL EM RECUPERAÇÃO NO ESTUÁRIO DO
RIO PACOTI, CE**

FORTALEZA - CE

2022

JOSÉ VÍTOR MACHADO RODRIGUES

CARBONO AZUL NO SEMIÁRIDO NORDESTINO: ESTOQUE DE CARBONO
DO SOLO DE UM MANGUEZAL EM RECUPERAÇÃO NO ESTUÁRIO DO RIO
PACOTI, CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais

Orientador: Prof. Dr. Luis Ernesto Arruda Bezerra
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Cotovicz Junior

FORTALEZA - CE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R613c Rodrigues, José Vítor.
Carbono Azul no Semiárido Nordestino : estoque de carbono do solo de um manguezal em recuperação no estuário do Rio Pacoti, CE / José Vítor Rodrigues. – 2022.
76 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Luis Ernesto Arruda Bezerra.
Coorientação: Prof. Dr. Luiz Carlos Cotovicz Junior.
1. Mudanças climáticas. 2. Recuperação ecossistêmica. 3. Brasil. 4. Semiárido. I. Título.
- CDD 551.46
-

JOSÉ VÍTOR MACHADO RODRIGUES

CARBONO AZUL NO SEMIÁRIDO NORDESTINO: ESTOQUE DE CARBONO
DO SOLO DE UM MANGUEZAL EM RECUPERAÇÃO NO ESTUÁRIO DO RIO
PACOTI, CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais.

Aprovada em 30/03/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luis Ernesto Arruda Bezerra (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Carlos Cotovicz Junior (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Dra. Maria Regina Gmach
Swedish University of Agricultural Sciences

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Luís Ernesto, por ter me ensinado e me acompanhado nas pesquisas e trilhas pelo manguezal, desde minha graduação. Agradeço por sempre estar presente, mesmo que bastante atarefado com os infinitos afazeres que sempre se predispôs a cumprir de forma muito eficiente. Sempre admirei muito sua persistência e energia para descobrir novos caminhos da ciência, sem se ater somente à uma única linha de pesquisa. Admiro também, e tento absorver sempre, a forma como você comunica ciência e se preocupa em passar isso aos alunos, à comunidade científica e à toda a sociedade, sempre com clareza.

Ao professor Luiz Carlos Cotovicz, por me orientar, também, de forma tão presente e apresentar novas áreas do conhecimento. Por ser claro nas explicações dos mais complexos assuntos do universo geoquímico. Por me acompanhar em coletas exaustivas pelo manguezal do Pacoti e sempre me apoiar nas dificuldades encontradas durante as análises em laboratório. Por conta de todo o suporte que você me proporcionou pude conhecer e me especializar em áreas até então difíceis, e de que eu tinha certo receio. Agradeço também pelas conversas e dicas sobre a carreira acadêmica, considerando as incertezas do futuro da ciência e a situação política e social do Brasil, que não é das mais animadoras para quem quer persistir produzindo ciência.

À Natália Beloto, por sempre compartilhar sua vasta experiência como pesquisadora esforçada e ética. Sua entrada na equipe fortaleceu bastante a persistência na pesquisa dessa área tão nova e desafiadora. Agradeço por sempre me auxiliar em várias das etapas desta pesquisa, seja nos perrengues das coletas de campo, seja nas análises estatísticas e até descongelando freezer para retirar amostras.

À Talita, por toda a ajuda que me deu nas coletas e nas análises em laboratório durante seu tempo de graduação em Oceanografia. Sempre se mostrou atenciosa, paciente e disposta a aprender sobre os mais diversos assuntos, ligados ou não à pesquisa com o manguezal do Pacoti.

À Viviane, por ser extremamente solícita, divertida e por me dar segurança ao auxiliar no tratamento de amostras de solo. Agradeço também à toda a equipe do

Laboratório de Contaminantes Orgânicos, por me guiarem em análises complexas e até então desconhecidas por mim.

Ao professor Paulo Henrique, pela imensa ajuda prestada na coleta de campo e, especificamente, na retirada dos testemunhos do solo.

Ao Laboratório de Biotransformações de Carbono e Nitrogênio (LABCEN - UFSM), por possibilitarem a utilização do analisador elementar para análise de parte das amostras coletadas.

Agradeço à toda a equipe de professores e alunos do laboratório de Zoobentos por me acolherem e sempre permanecerem unidos pela produção científica e conservação dos ecossistemas costeiros e marinhos. Mesmo durante tempos de pandemia foram muito atenciosos e dispostos a me ajudar no que fosse possível, desde o uso básico de materiais e equipamentos até assuntos mais complexos sobre metodologias de campo e laboratorial. Não sei o que seria das minhas coletas de campo sem as valiosas dicas do Wilson (“Melhor levar a pá, Zé. Vai te ajudar no momento de retirar o testemunho”). Tampouco saberia como armazenar de forma segura minhas amostras sem o empenho e carinho da professora Cristina, que cuida tão bem do laboratório e de quem o frequenta.

Aos funcionários do Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR, que mesmo nos tempos mais difíceis da pandemia, mantiveram os cuidados com esse prédio tão importante para a comunidade científica e para a sociedade. Agradeço às funcionárias e aos funcionários da limpeza e organização das áreas comuns e dos laboratórios (Wagner, Dona Célia, Francisco), da parte administrativa (em especial à Isabela, por sanar quaisquer dúvidas com relação às mais diversas pendências burocráticas), da biblioteca e da recepção (em especial ao Reginaldo).

À toda a equipe de funcionárias e funcionários do CEAC – Centro de Estudos Aquáticos e Costeiros, por cuidarem tão bem desse centro de pesquisa, que é base de apoio fundamental durante as coletas de campo.

Não posso deixar de agradecer, também, a todos os profissionais da saúde e pesquisadores, que, aliados a ciência e ao coletivismo, trabalharam e vem trabalhando incessantemente para desenvolver vacinas e cuidar dos que mais foram afetados pela pandemia. Da mesma forma, agradeço a todos os outros profissionais que permaneceram

trabalhando, sob altos riscos (serviços de entrega e serviços alimentícios, por exemplo), e que me possibilitaram ter certo conforto e segurança para desenvolver este trabalho.

A todos os meus amigos, amigas e família. Pela confiança, companhia e apoio, tão necessários em tempos inseguros e, por vezes, desesperançosos. Agradeço especialmente à minha mãe, Ana Lúcia, pelo amor e suporte incondicionais. À minha querida amiga Bel, pelo imenso carinho e companhia, aos meus amigos e irmãos Regimário, Jamille, Virgínia e a todos os outros que Fortaleza e a Oceanografia me presentaram.

Às marisqueiras, pescadoras e pescadores do Rio Pacoti que, com sensibilidade e respeito, preservam a riqueza dos ecossistemas estuarinos através de suas tradições e usos sustentáveis dos recursos naturais.

À FUNCAP, pelo financiamento da bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	12
1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3. OBJETIVOS	29
3.1. Objetivo geral	29
3.2. Objetivos específicos	29
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
4.1. Área de estudo	30
4.2. Coleta de campo.....	33
4.3. Análises em laboratório	36
4.4. Analisador elementar	39
4.5. Cálculo do estoque total de carbono orgânico do solo	41
4.6. Análises estatísticas	42
5. RESULTADOS.....	43
5.1. Granulometria	43
5.2. Densidade do solo (<i>dry bulk density</i>).....	44
5.3. Teor de carbono orgânico (%Corg)	46
5.3.1. Relação para manguezais do semiárido (Nóbrega <i>et al.</i> , 2015).....	46
5.3.2. Analisador elementar.....	48
5.4. Estoques de carbono orgânico do solo.....	50
5.4.1. Relação para manguezais do semiárido (Nóbrega <i>et al.</i> , 2015).....	50
5.4.2. Analisador elementar.....	53
6. DISCUSSÃO	56
6.1. Estoques de carbono e características do solo no manguezal do Rio Pacoti, CE	56
6.2. Métodos de análise e estimativa de carbono.....	60
6.3. Contextualização regional e global.....	64
6.4. Estoques de carbono no semiárido e mudanças climáticas.....	66
7. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Estoques de carbono, em Mg/ha, na biomassa viva e morta e no solo de manguezais da Costa Norte de São Paulo, do estuário do Acaraú (CE) e do Rio Amazonas (PA).	20
Figura 2 – Mapa da localização do estuário do Rio Pacoti, com destaque para a área da APA e a área de estudo no manguezal.	30
Figura 3 – Foto aérea do manguezal do Rio Pacoti, CE.....	32
Figura 4 – Imagem de satélite e mapa da cobertura do solo no estuário do Rio Pacoti, CE, em 1968.	32
Figura 5 – Mapa de localização da área de estudo, no manguezal do Rio Pacoti, CE, com indicação dos pontos de coleta de testemunhos.....	33
Figura 6 – Tubo de PVC utilizado durante as coletas de testemunho de solo (A) e martelo emborrachado manuseado para auxiliar a perfuração (B).	35
Figura 7 – Testemunho disposto sobre o solo para fracionamento (sub amostragem) dos intervalos de profundidade (A) e porção da amostra retirada com seringa (B).....	36
Figura 8 – Amostras de solo do manguezal do Rio Pacoti, CE no dessecador após secagem na estufa.....	37
Figura 9 – Homogeneização das amostras de solo (A); Forno mufla utilizado para queima (B) e amostras em cadinhos após queima em mufla (C).	38
Figura 10 – Gotejamento de HCl sobre amostras de solo do manguezal do Rio Pacoti, CE.	39
Figura 11 – Amostras de solo imersas em HCl (A); Amostras em banho ultrassônico (B) e centrífuga utilizada previamente à da remoção do ácido (C).	40
Figura 12 – Percentuais médios de sedimentos grossos (areia) e finos (silte e argila) para os intervalos de profundidade amostrados de cada testemunho coletado no manguezal do Rio Pacoti, CE.	43
Figura 13 – Boxplot do percentual de silte e argila, por testemunho (1 m de profundidade), no manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (testemunho). A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.....	44
Figura 14 – Densidade do solo (g/cm ³) média, por intervalo de profundidade (cm), dos testemunhos (T01 a T05) coletados no manguezal do Rio Pacoti, CE.....	45

Figura 15 – Boxplot dos valores de densidade do solo (g/cm ³) por testemunho no manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (testemunho), para 1 m de profundidade. A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.....	45
Figura 16 – Boxplot dos valores de densidade do solo (g/cm ³) para a área degradada (T01, T02 e T03) e área não degradada (T04 e T05) do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (tratamento), para 1 m de profundidade. A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.	46
Figura 17 – Teor de carbono orgânico (%Corg), obtido pelo fator de conversão de Nóbrega <i>et al.</i> (2015), por intervalo de profundidade (cm) dos testemunhos (T01 a T05) coletados no manguezal do Rio Pacoti, CE.....	47
Figura 18 – Boxplot dos teores de carbono orgânico (% Corg) por testemunho, obtidos pelo fator de conversão de Nóbrega <i>et al.</i> (2015) no manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (testemunho), para 1 m de profundidade. A linha horizontal representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.	47
Figura 19 – Boxplot dos percentuais de carbono obtidos pelo fator de conversão de Nóbrega <i>et al.</i> (2015), para a área degradada (T01, T02 e T03) e área não degradada (T04 e T05) do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (tratamento), para 1 m de profundidade. A linha horizontal representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.....	48
Figura 20 – Teor de carbono orgânico (%Corg), obtido por analisador elementar, para cada intervalo de profundidade (cm) dos testemunhos (T01 a T05) coletados no manguezal do Rio Pacoti, CE.....	49
Figura 21 – Boxplot dos teores de carbono orgânico (% Corg) por testemunho (1 m de profundidade), obtidos por analisador elementar, para o manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (testemunho). A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.....	49
Figura 22 – Boxplot dos percentuais de carbono obtidos pelo fator de conversão de Nóbrega <i>et al.</i> (2015), por área, com relação à degradação ambiental, do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria	

(tratamento), para 1 m de profundidade. A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.....	50
Figura 23 – Estoques de carbono orgânico (Mg/ha) em 1 metro de profundidade no solo do manguezal do Rio Pacoti, CE, por intervalo de profundidade (cm). Valores obtidos pela relação de Nóbrega <i>et al.</i> (2015).....	51
Figura 24 – Estoques de carbono orgânico, em Mg/ha, por testemunho (T01 a T05), obtidos pela relação de Nóbrega <i>et al.</i> (2015), em 1 metro de profundidade no solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada cor representa um intervalo de profundidade amostrado.	52
Figura 25 – Estoque médio de carbono (MgC/ha), com desvio padrão, das áreas degradada (T01, T02 e T03) e não degradada (T04 e T05) para a camada de 1m do solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. Valores calculados pelo fator de conversão de Nóbrega <i>et al.</i> (2015).	52
Figura 26 – Variação dos estoques de carbono orgânico (Mg/ha) em 1 m de profundidade, exibidos por intervalo de profundidade (cm), no manguezal do Rio Pacoti, CE. Valores obtidos pelo analisador elementar	53
Figura 27 – Estoques de carbono orgânico, em Mg/ha, por testemunho (T01 a T05), obtidos pelo analisador elementar, em 1 metro de profundidade no solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada cor representa um intervalo de profundidade amostrado.	54
Figura 28 – Estoque médio de carbono (MgC/ha), com desvio padrão, das áreas degradada (T01, T02 e T03) e não degradada (T04 e T05) para a camada de 1m do solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. Valores calculados a partir dos resultados do analisador elementar.54	
Figura 29 – Correlação entre matéria orgânica (LOI), obtida pela queima em mufla, e carbono orgânico obtido por análise elementar (AE). O coeficiente de correlação de Spearman (<i>rho</i>) é exibido no gráfico.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Estimativas de estoques de carbono para as áreas de estudo abordadas nos artigos revisados.	22
Tabela 2 – Estimativas de estoques de carbono para as áreas de estudo abordadas nos artigos revisados. Algumas estimativas estão exibidas tais como aparecem nos respectivos estudos ^[1, 6, 10, 17] e outras sofreram conversão de unidade (de kg C/m ² para Mg C/ha) ^[5, 13, 15] para que a comparação com os outros resultados ficasse mais visível.	25
Tabela 3 – Informações complementares extraídas dos artigos revisados.	27
Tabela 4 – Valores de densidade (<i>bulk density</i>), concentração e estoques de carbono orgânico do solo do manguezal do Rio Pacoti, CE, separados por testemunho amostrado e por metodologia aplicada. (FC) – Resultados do fator de conversão de Nóbrega <i>et al.</i> (2015); (AE) – Analisador Elementar.	61
Tabela 5 – Relações entre matéria orgânica e carbono orgânico utilizadas para cálculo dos estoques de carbono para o manguezal do Rio Pacoti, CE.	63
Tabela 6 – Estoques médios de carbono no solo (a 1m de profundidade) em áreas não degradadas de clima semiárido, comparados à média global.	65

RESUMO

Manguezais ocupam uma área global de aproximadamente 137.000 km², abrangendo pelo menos 124 países localizados em regiões tropicais e subtropicais. Além de serem importantes habitats para diversas espécies e fornecerem serviços ecossistêmicos importantes para os seres humanos, florestas de mangue, assim como marismas e pradarias, têm sido foco de muita atenção por acumularem grandes quantidades de carbono, durante séculos (e até milênios), na sua biomassa e nos solos. Por serem eficientes sumidouros, são, conseqüentemente, importantes mitigadores das mudanças climáticas globais quando conservados. Neste estudo estimou-se o estoque de carbono do solo de uma área de mangue impactada por antigas salinas, no semiárido nordestino brasileiro. O manguezal do Rio Pacoti (CE), que hoje encontra-se em processo de recuperação ecossistêmica, apresenta variações significativas ($p < 0,05$) de densidade do solo, concentração e estoque de carbono orgânico (C_{org}) entre as áreas amostradas. Os estoques da camada de 1m do solo variaram de 14 a 290 MgC/ha, valores correspondentes à área de apicum degradado e à área de *Rhizophora mangle* (mangue de franja preservado), respectivamente. Para a área de mangue preservado, os estoques foram superiores aos de manguezais da Amazônia e próximos da média global (283 ± 193 Mg C/ha). Por outro lado, o estoque médio de C_{org} da área impactada por salinas é de $17,55 \pm 4,52$ Mg C/ha. Esse estoque, similar ao de áreas degradadas de estuários do Ceará e de regiões semiáridas do oeste africano, da Austrália e da costa do Mar Vermelho, é consideravelmente inferior à média global e evidencia o impacto causado pela mudança do uso do solo e as condições climáticas extremas na região. Para o manguezal do Rio Pacoti estima-se que foram emitidos cerca de 836,76 Mg CO₂ e/ha para a atmosfera, como resultado de atividades antrópicas. Esta pesquisa traz discussões fundamentadas em uma revisão dos estoques de carbono azul em manguezais do Brasil, a qual se baseia em 17 artigos contendo informações sobre 8 estados. Por fim, este estudo reforça a importância dos manguezais do semiárido como eficientes sumidouros, mesmo sob condições ambientais limitantes ao desenvolvimento, e aponta a urgência de proteção integral a esses ecossistemas, a fim de preservar a capacidade de sequestro e estocagem de carbono, mitigar efeitos das mudanças climáticas e aprimorar projetos de manejo e recuperação de manguezais.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Recuperação ecossistêmica. Brasil. Semiárido.

ABSTRACT

Mangroves occupy a global area of approximately 137,000 km², covering at least 124 countries located in tropical and subtropical regions. In addition to being important habitats for several species and providing important ecosystem services for humans, mangrove forests, as well as salt marshes and seagrasses, have been the focus of much attention for accumulating large amounts of carbon for centuries (and even millennia) in its biomass and soils. As they are efficient sinks, they are, consequently, important mitigators of global climate change when conserved. In this study, the soil carbon stock was estimated in a mangrove area impacted by old salt ponds, in the semi-arid northeast of Brazil. The mangrove area of the Pacoti River (CE), which is currently undergoing an ecosystem recovery process, shows significant variations ($p < 0.05$) in soil density, concentration and stock of organic carbon (C_{org}) among the sampled areas. Stocks in the top meter layer of soil ranged from 14 to 290 MgC/ha. These values correspond to the degraded hypersaline tidal flat and the preserved fringe mangrove area (*Rhizophora mangle*), respectively. For the preserved mangrove, the stocks were higher than that of the Amazonian mangroves and close to the global average (283 ± 193 Mg C/ha). On the other hand, the average stock of C_{org} in the area impacted by salt farming is 17.55 ± 4.52 Mg C/ha. This stock, similar to that of degraded areas of estuaries in Ceará and semi-arid regions of West Africa, Australia and the Red Sea coast, is considerably lower than the global average and highlights the impact caused by land use change and extreme climatic conditions in the region. For the Pacoti River mangrove, it is estimated that about 836.76 Mg CO₂ e/ha were lost to the atmosphere as a result of human activities. This research brings discussions based on a review of blue carbon stocks in mangroves of Brazil, which is based on 17 articles containing information on 8 states. Finally, this study reinforces the importance of semi-arid mangroves as efficient sinks, even under environmental conditions that limit plant development, and points out the urgency of integral protection of these ecosystems, in order to preserve the capacity of carbon sequestration and storage, mitigate the effects of climate change and improve mangrove management and recovery projects.

Key words: Climate change. Ecosystem Recovery. Brazil. Semiarid.

1. INTRODUÇÃO

Manguezais são ecossistemas costeiros formados por um conjunto de feições ao longo da faixa entre marés — porção compreendida entre os limites da maré baixa e maré alta. Essas feições compreendem áreas desprovidas de vegetação arbórea (apicuns, ou planícies hipersalinas) bem como áreas cobertas por comunidades de árvores e/ou arbustos, conhecidos como mangues. Esses organismos vegetais habitam solos que são frequentemente ou perenemente inundados pela maré, possuem pouca disponibilidade de oxigênio e sofrem constantes variações de salinidade. Além disso, esses ambientes estão sujeitos à hidrodinâmica do oceano que, por sua vez, é capaz de moldar as feições topográficas costeiras, bem como transportar nutrientes e carbono entre o manguezal e as águas oceânicas adjacentes (Spalding *et al.*, 2010; ICMBio, 2018; Alongi, 2014).

Para o início dos anos 2000, a cobertura global de áreas florestais de mangue foi estimada em até 153.000 km² (FAO, 2007). Estimativas mais recentes sugerem uma cobertura global variando de 83.495 km² (Hamilton & Casey, 2016) a 136.714 km² (Worthington & Spalding, 2018). Tal cobertura global da vegetação de mangue abrange regiões costeiras de ao menos 124 países de regiões tropicais e subtropicais, sendo representadas por cerca de 70 espécies (Spalding *et al.*, 2010).

Assim como outros ecossistemas costeiros e estuarinos e.g. marismas, bancos de angiospermas, os manguezais possuem grande importância ecológica e econômica ao fornecerem uma série de serviços ecossistêmicos, tais como a pesca e a mariscagem, uma vez que são hábitat e berçário para diversas espécies de organismos marinhos (incluindo espécies ameaçadas); proteção contra erosão costeira e aumento do nível do mar, ciclagem de nutrientes e regulação da qualidade da água. Esse papel desempenhado pelos ecossistemas de manguezal tem grande relevância para a manutenção da biodiversidade costeira e marinha, além de favorecer a qualidade de vida humana (Howard *et al.*, 2014; Barbier *et al.*, 2011). Contudo, outro serviço fornecido pelos manguezais e por outros ecossistemas vegetados costeiros tem sido, crescentemente, alvo de estudos: o sequestro e estocagem de carbono (Duarte *et al.*, 2005; Nellemann *et al.*, 2009; McLeod *et al.*, 2011; Pendleton *et al.*, 2012; Howard *et al.*, 2014; Hori *et al.*, 2018).

Carbono azul é o nome dado ao carbono capturado pelos manguezais, marismas e angiospermas marinhas que fica acumulado (estocado) na biomassa viva e morta (e.g.

folhas, caules e raízes) e, em maior parte, nos solos desses ambientes (kusumaningtyas *et al.*, 2019; Nellemann *et al.*, 2009; Donato *et al.*, 2011; Alongi, 2014; Howard *et al.*, 2014; Kauffman & Bhomia, 2017). Estima-se que mais da metade do carbono acumulado nos oceanos seja proveniente do sequestro exercido pelos ecossistemas costeiros (Hori *et al.*, 2018) e, mesmo ocupando apenas 0,5% da extensão de áreas costeiras globais, estima-se que os manguezais contribuam com aproximadamente 10 – 15% do sequestro total de carbono costeiro, correspondendo a 0,024 Pg C/ano (1 Pg = 10^9 t) (Alongi, 2014).

Nos manguezais esse carbono é adquirido pela atividade fotossintética (carbono autóctone) de algas presentes sobre raízes aéreas dos mangues e na superfície do solo e, majoritariamente, de plantas de mangue, bem como por importação de carbono de fontes adjacentes (carbono alóctone), tais como a água oceânica e de rios (Alongi, 2012; 2014).

A ação das marés, a elevação do terreno e, conseqüentemente, o grau de inundação do manguezal tem bastante influência na estocagem de carbono no solo (kusumaningtyas *et al.*, 2019; Alongi, 2014; Nguyen *et al.*, 2004). Devido ao caráter anóxico dos sedimentos provocado pela saturação de água, o carbono acumulado no solo dos manguezais é lentamente degradado e, como consequência das elevadas taxas de sedimentação nesses ambientes, é continuamente estocado no solo. Portanto, maiores estoques estão, geralmente, associados à bosques de mangues mais antigos (Alongi, 2012; Chmura *et al.*, 2003; McLeod *et al.*, 2011).

O clima e, mais precisamente a pluviometria da região, também tem forte influência na estocagem de carbono no solo dos manguezais. Maiores frequências de chuvas tornam os solos desses ambientes mais inundados diminuindo, portanto, as taxas de decomposição da matéria orgânica. À vista disso, a estocagem de carbono orgânico pode estar mais fortemente correlacionada às chuvas do que a outras variáveis estudadas (temperatura, amplitude de maré e latitude, por exemplo) (Sanders *et al.*, 2016).

A taxa de enterramento (“*burial rate*”) do carbono em manguezais, em angiospermas marinhas e em marismas pode ser de 30-50 vezes maior que a taxa em florestas terrestres (McLeod *et al.*, 2011). Para se ter uma noção dessa desproporção estimam-se taxas de sequestro de carbono que variam de 18 a 1713 g C m⁻² ano⁻¹ para ecossistemas vegetados costeiros, enquanto para florestas terrestres (boreais, tropicais e temperadas) essas taxas variam de 0,7 a 13,1 g C m⁻² ano⁻¹ (McLeod *et al.*, 2011). Essa eficiência em capturar carbono se deve à elevada produtividade primária somada à

hidrodinâmica fluvial e marinha e às altas taxas de sedimentação, que permitem, portanto, um acúmulo significativo de carbono no solo desses ecossistemas (Alongi, 2014; Chmura *et al.*, 2003; Donato *et al.*, 2011). Além disso, as condições anaeróbicas e anóxicas nos solos de manguezais favorecem processos mais lentos de degradação de matéria orgânica, facilitando grandes estoques e taxas de sequestro por longos períodos (Alongi, 2014).

Com relação aos manguezais estima-se que o estoque global de carbono em 1 m de profundidade no solo desses ecossistemas seja de 9,4 – 10,4 Pg (Duarte *et al.*, 2013), com um incremento médio anual (taxa de sequestro) de 226 g C m⁻² nos sedimentos (McLeod *et al.*, 2011).

Pelo fato de estocarem grandes quantidades de carbono, os manguezais são considerados importantes aliados na mitigação das mudanças climáticas globais uma vez que retiram (sequestram) CO₂ atmosférico durante o processo de fotossíntese (Duarte *et al.*, 2013; Atwood *et al.*, 2017). Por outro lado, quando degradados por mudanças no uso do solo, esses ecossistemas perdem seus estoques de carbono, resultando na emissão de CO₂ para a atmosfera e na perda de sua capacidade de sequestrar carbono (Pendleton *et al.*, 2012; Atwood *et al.*, 2017; McLeod *et al.*, 2011).

A mudança do uso do solo configura-se como uma das maiores ameaças à saúde dos manguezais. Ocorre, geralmente, atrelada a atividades humanas tais quais carcinicultura, agricultura, expansão urbana, poluição e exploração de madeira, e vem causando a destruição de florestas de mangue em escala global (Alongi, 2002; Ferreira & Lacerda, 2016; Valiela *et al.*, 2001). Por conta dessas constantes e crescentes pressões sobre os manguezais, mais de um terço das florestas de mangue do planeta desapareceu nos últimos 60 anos (Hamilton & Casey, 2016). A devastação de manguezais, que ocorre a uma taxa de, aproximadamente 0,16% a 0,39% ao ano, pode causar uma perda anual de 2 – 8 Tg C (milhões de toneladas) de carbono do solo, representando uma emissão até 10 vezes maior que a emissão de CO₂ por florestas da caatinga, quando desmatadas (Kauffman *et al.*, 2018; Atwood *et al.*, 2017; Hamilton & Casey, 2016).

Visando um incremento da área de sumidouros de CO₂, projetos de conservação, restauração e proteção de manguezais e de outros ecossistemas costeiros vêm surgindo como soluções mitigadoras das mudanças climáticas globais. Para tanto, mecanismos como o REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation* ou Redução de Emissões causadas por Desmatamento e Degradação) incentivam e apoiam

financeiramente projetos de conservação e manejo sustentável de ecossistemas com o intuito de integrar o carbono azul a políticas internacionais da UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*). Para que isso seja alcançado, faz-se necessário estimar os estoques, bem como monitorar taxas de sequestro e emissão de carbono nesses ambientes (Turner *et al.*, 2009; Herr & Laffoley, 2012; Wylie *et al.*, 2016).

O desenvolvimento de projetos de conservação e restauração de manguezais tem sido pensado como uma solução natural (“*nature-based solution*”) para a mitigação das mudanças climáticas, estando em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas e alinhados com o Acordo de Paris no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, 2015; Gattuso *et al.*, 2018). As ações e tecnologias utilizadas para a conservação e restauração da vegetação de manguezais podem ser consideradas medidas efetivas, duradouras, de baixo custo e com grande potencial de manejo governamental (Gattuso *et al.*, 2021).

Dados sobre essas estimativas ainda são limitados para ecossistemas costeiros da África, da América do Sul e do Sudeste da Ásia, o que dificulta o entendimento do ciclo e estocagem do carbono desses ambientes nas escalas local, regional e global (Howard *et al.*, 2014). Essa limitação de dados deve-se, em parte, à não inclusão do estoque de carbono do solo na quantificação do estoque total do ecossistema o que, consequentemente, dificulta a integração desses ambientes em políticas de mitigação das mudanças climáticas (Donato *et al.*, 2011; Wylie *et al.*, 2016).

Considerando a vasta área de manguezais no território brasileiro (aproximadamente 9.900 km²; Diniz *et al.*, 2019) e a necessidade de estimativas de estoques totais de carbono, as quais considerem o carbono acumulado no solo e na biomassa viva e morta (acima e abaixo do solo), este estudo tem como objetivo geral estimar o estoque de carbono azul do solo de um manguezal tropical em processo de recuperação, localizado no estuário do rio Pacoti, CE (região semiárida do Nordeste do Brasil).

Adicionalmente, reúne-se, em uma primeira parte, dados de estoques de carbono em manguezais do território brasileiro. Essas estimativas, que consideram também o carbono estocado na biomassa viva e morta, permitirão um maior entendimento sobre o acúmulo de carbono em manguezais de diferentes regimes climáticos, sob distintas

influências antrópicas e diferentes estágios de maturação (idade da floresta). As informações obtidas nesta pesquisa fornecerão aprimoramentos para protocolos de recuperação desses ecossistemas ao investigar a heterogeneidade espacial dos manguezais em diferentes escalas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estoques de carbono em manguezais brasileiros

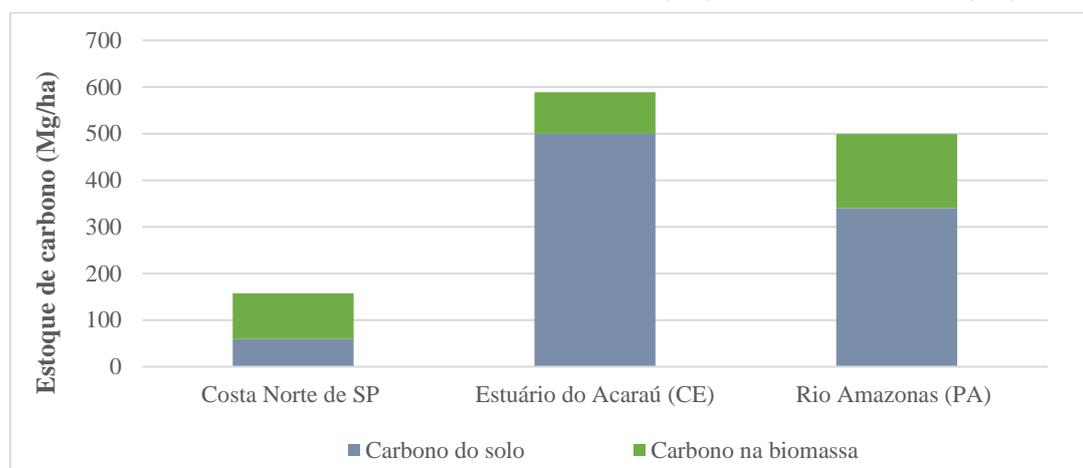
No Brasil, estimativas de estoques de carbono azul não contemplam toda a área de manguezais. A maioria dos estudos publicados foi realizada nas regiões Nordeste e Sudeste. Já para a região Norte, que abriga cerca de 80% das florestas de mangue do país, há poucas pesquisas publicadas (Kauffman *et al.*, 2018b). Além disso, nem todos os estudos calculam o estoque total do ecossistema, ou seja, poucos trabalhos consideram todos os compartimentos onde o carbono é armazenado (biomassa acima, abaixo do solo e nos sedimentos).

As concentrações de carbono na biomassa acima do solo (*aboveground*; AGB) variam de $\cong 1,46$ — $258,34$ Mg C/ha*, sendo a maior média referente às florestas de manguezais do Delta do Rio Parnaíba (PI) (Portela *et al.*, 2020). As estimativas de estoques de carbono do solo têm valores entre $\cong 29$ — 600 Mg C/ha, dos quais a menor média corresponde à manguezais impactados do Ceará (Suárez-Abelenda *et al.*, 2014) e a maior média é de uma área de manguezal preservado no rio Acaraú (Kauffman *et al.*, 2018b) também no Ceará. Já com relação aos estoques totais de carbono no ecossistema, observa-se valores entre $\cong 157,36$ Mg C/ha (Pavani *et al.*, 2018) e 605 Mg C/ha (Kauffman *et al.*, 2018b), dos quais os manguezais do Rio Acaraú (CE), por possuírem camadas com altas concentrações de carbono orgânico abaixo de 1 m no solo, destacam-se pelos maiores estoques médios. No entanto, quando se compara a média de todas as áreas de manguezais investigados em cada estudo tem-se que as florestas de mangue da região amazônica possuem os maiores estoques de carbono ecossistêmico.

* Mg = Megagrama = Tonelada.

Observa-se, portanto, que os manguezais da região amazônica e do semiárido nordestino, especificamente no Ceará, apresentam as maiores médias de carbono do solo e de carbono total do ecossistema (Figura 1); já o manguezal do Delta do Parnaíba apresenta as maiores médias de carbono na biomassa acima do solo (*aboveground*). Tanto os mangues do Rio Amazonas quanto os do Delta do Parnaíba sofrem influência do regime climático amazônico (equatorial úmido) e recebem grandes volumes de água doce dos rios. Tais características ambientais podem explicar as grandes concentrações de carbono tanto na biomassa quanto no solo, uma vez que maiores fluxos de água doce podem transportar mais carbono alóctone para os manguezais assim como a maior biomassa dos bosques está relacionada com uma maior taxa fotossintética. Ademais, grandes áreas dominadas por uma única espécie de mangue podem apresentar uma maior biomassa e, conseqüentemente, um maior acúmulo de carbono (Portela *et al.*, 2020), o que pode ser uma explicação para a elevada biomassa dos manguezais do Delta do Parnaíba.

Figura 1– Estoques de carbono, em Mg/ha, na biomassa viva e morta e no solo de manguezais da Costa Norte de São Paulo, do estuário do Acaraú (CE) e do Rio Amazonas (PA).



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Mesmo apresentando grandes estoques de carbono quando comparados aos manguezais do Brasil, o solo dos bosques de mangue do Rio Amazonas possui estoques menores que a metade da média global (Kauffman *et al.*, 2018a; Kauffman & Bhomia, 2017). Esses valores abaixo da média podem ser justificados pela grande amplitude de maré da região, que por sua vez “ameniza” o caráter anóxico dos sedimentos durante as marés baixas e facilita a degradação da matéria orgânica contida no solo. A predominância de grãos mais grossos no solo desses manguezais também pode facilitar a

degradação da matéria orgânica, sendo esta mais facilmente estocada em sedimentos finos (Kauffman *et al.*, 2018a; Matus, 2021).

Para a região Nordeste há estimativas de carbono na biomassa *aboveground* de mangues do Delta do Parnaíba (PI) (Portela *et al.*, 2020) e de uma área de manguezal em processo de Recuperação no Rio Potengi (RN) (Ferreira *et al.*, 2019) (258,34 e 42,28 Mg C/ha, respectivamente) (Tabela 1). Para a área de manguezal preservado do Rio Potengi (RN) as médias de carbono na biomassa foram similares à média para mangues recuperados e ambas as áreas possuem valores muito baixos quando comparadas ao Delta do Parnaíba (PI). Esse contraste pode, mais uma vez, ser associado à diferença de regime climático e, conseqüentemente, à diferença de vazão dos rios aos quais os manguezais estão associados (Duke *et al.*, 1998; Alongi, 2009).

Manguezais de regiões semiáridas, como a do Rio Potengi (RN), podem apresentar menor umidade no solo devido à baixa vazão do rio e às elevadas taxas de evaporação (intensificadas pelos longos períodos de seca), o que leva à menores taxas de sequestro e acúmulo de carbono no solo (Nóbrega *et al.*, 2019). Além disso, um menor fluxo de água e menor umidade (do solo e do ar) podem levar à um menor crescimento do mangue e, conseqüentemente, um menor acúmulo de carbono na biomassa (Ferreira *et al.*, 2019). Por esse motivo, observa-se uma menor produtividade primária em regiões tropicais secas que em regiões tropicais úmidas (Atwood *et al.*, 2017; Alongi, 2009; Duke *et al.*, 1998).

No Ceará estudou-se o estoque de carbono no solo de manguezais impactados e preservados em diferentes estuários: Acaraú, Jaguaribe, Cocó e Timonha (Kauffman *et al.*, 2018b; Nóbrega *et al.*, 2016; Suárez-Abelenda *et al.*, 2014). Os estoques investigados variam de 29 Mg C/ha (manguezais impactados dos rios Acaraú e Jaguaribe) a > 600 Mg C/ha (manguezal do rio Acaraú). O principal impacto antrópico relacionado à perda de estoques de carbono (emissão de CO₂) em manguezais nessa região é a produção de camarão. De acordo com Kauffman *et al.* (2018b) houve uma perda de 82% do estoque total de carbono ecossistêmico de um manguezal degradado pela instalação de fazendas de camarão.

Quando comparados aos manguezais do Rio Amazonas (511 Mg C/ha; Kauffman *et al.*, 2018a) os bosques de mangue do semiárido nordestino (CE) (413 Mg C/ha; Kauffman *et al.*, 2018b), com exceção de manguezais do Rio Acaraú, são um pouco

inferiores quanto ao estoque total de carbono do ecossistema (Tabela 1). Já com relação ao estoque médio na biomassa viva e morta nota-se uma diferença considerável, sendo 159 Mg C/ha para manguezais da Amazônia e 84 Mg C/ha para manguezais do Ceará.

Tabela 1– Estimativas de estoques de carbono para as áreas de estudo abordadas nos artigos revisados.

Área de Estudo	Carbono biomassa <i>above</i> (AGB) e <i>belowground</i> (BGB)	Carbono solo	Carbono total do ecossistema	Referência
Costa Norte de SP	AGB = 76,09 Mg/ha BGB = 22,07 Mg/ha	59,2 Mg/ha	157,36 Mg/ha	Pavani <i>et al.</i> , 2018
Delta do Rio Parnaíba (PI)	AGB = 258,34 Mg C/ha	-	-	Portela <i>et al.</i> , 2020
Rio Potengi (RN) - Manguezal em Recuperação	AGB = 26,59 ± 9,21 – 42,28 ± 9,99 Mg C/ha	-	-	Ferreira <i>et al.</i> , 2019
Estuários do Acaraú e do Jaguaribe (CE)	AGB = 70 Mg C/ha BGB = 14 Mg/ha	~500 Mg C/ha (Acaraú) ~150 Mg C/ha (Jaguaribe)	605 Mg C/ha (Acaraú) 224 Mg C/ha (Jaguaribe)	Nóbrega <i>et al.</i> , 2019
Ilha Guarás (PA)	AGB = 110.1 Mg C/ha	-	-	Salum <i>et al.</i> , 2020
Rio Amazonas (PA)	AGB = 145 Mg/ha BGB = 14 Mg/ha	340 Mg C/ha	511 Mg C/ha	Kauffman <i>et al.</i> , 2018a

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

Manguezais da região Sudeste do Brasil considerados nesta revisão (Gorman *et al.*, 2020; Schaeffer-Novelli *et al.*, 2018; Pavani *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2017; Portillo *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2010) apresentam os menores estoques de carbono tanto na biomassa quanto no solo e, conseqüentemente, no ecossistema total (apenas uma área de manguezal no estado de SP possui estoques no solo maiores que o de mangues degradados do CE) (Pavani *et al.*, 2018; Suárez-Abelenda *et al.*, 2014).

Nas latitudes onde os manguezais do Sudeste estão inseridos (19° – 24° S) (Tabela 3) há menor produtividade primária em manguezais. A disponibilidade de luz, nesse caso, passa a ser um fator limitante, bem como a temperatura (Duke *et al.*, 1998; Alongi, 2009). De acordo com Atwood *et al.* (2017) manguezais localizados entre maiores latitudes (20° – 30°) apresentam menor acúmulo de carbono no solo, enquanto que manguezais de baixas latitudes (0° – 10° S) apresentam os maiores estoques médios de carbono no sedimento (Sanders *et al.*, 2016).

Estimativas de estoques de carbono de manguezais e planícies salinas da Baía de Araçá (SP) (Gorman *et al.*, 2020; Schaeffer-Novelli *et al.*, 2018) mostram valores muito baixos, levando em consideração a área amostrada. Isso pode ser explicado tanto pela menor produtividade e biomassa encontradas nessa latitude (23° 49'S) quanto pelos impactos antrópicos relatados, tais como ocupações humanas e desmatamentos nas adjacências.

Sob a perspectiva de escala nacional, vale ressaltar o estudo de Hamilton & Friess (2018), que considera uma área total de manguezais do Brasil de aproximadamente 7.674,94 km² e um estoque total de carbono, em toneladas, de 389.760.564. Utilizando-se esses dados é possível obter uma média de aproximadamente 507 Mg C/ha nos manguezais do Brasil. O estudo também estima os estoques em escala subnacional, de áreas de mangue com elevadas concentrações de carbono, tais como os estados do Maranhão e do Pará, cujos estoques representam 3,66% e 2,52%, respectivamente, do estoque total de carbono dos manguezais do planeta. Schroedep & Winjumb (1995), diferentemente, citam estimativas para os estoques de carbono de diversos ecossistemas do Brasil, incluindo o carbono da biomassa *aboveground* e do solo dos manguezais (30 - 190 Mg C/ha e 234 Mg C/ha, respectivamente).

Esta revisão evidencia o elevado potencial de sequestro e estocagem de carbono nos manguezais bem como a ampla variação espacial desses estoques, e reforça a necessidade de aquisição de dados mais robustos sobre o acúmulo e dinâmica do carbono nesses ambientes. Dessa forma o estoque total de carbono do ecossistema pode ser estimado mais precisamente em ambas as escalas estadual (subnacionais) e nacional.

Para que tal objetivo seja alcançado faz-se necessária a elaboração de estudos detalhados que abordem tanto o carbono da biomassa viva e morta (*above* e *belowground*) quanto o carbono acumulado no solo (Donato *et al.*, 2011; Wylie *et al.*, 2016). Adicionalmente, atenção deve ser dada às características ambientais e ecológicas da área de estudo, tais como regime de marés, clima, fluxo de água doce, distribuição de espécies de mangue, influência antrópica, entre outros, visto que o acúmulo de carbono é fortemente influenciado por esses parâmetros (Alongi, 2014; Nguyen *et al.*, 2004).

Apesar da existência de estimativas detalhadas de estoques totais de carbono em alguns manguezais do Brasil (Kauffman *et al.*, 2018a, b; Pavani *et al.*, 2018) ainda se faz necessário o estudo de áreas adicionais de mangues, as quais representem tanto áreas

preservadas quanto áreas impactadas, tendo em vista a considerável variação espacial de estoques de carbono tanto ao longo de mesmas latitudes quanto com relação ao nível de degradação ambiental (Kauffman *et al.*, 2018a, b).

Os dados revisados nesta pesquisa também enfatizam a urgência de projetos e ações de conservação e recuperação/restauração de áreas de manguezais (bem como de ambientes de transição, como o apicum) presentes no território brasileiro, onde a expansão urbana e a aquicultura ameaçam incessantemente a saúde desses ecossistemas e, por conseguinte, contribuem para emissão de CO₂ para a atmosfera ao destruírem a cobertura vegetal de mangues e ao provocarem mudanças no uso do solo.

Com isso em vista, a pesquisa em áreas de mangues surge como um importante alicerce para o desenvolvimento de atividades de manejo, recuperação e restauração do ecossistema, bem como a introdução do ecoturismo como forma de promover a importância desses ecossistemas de forma sustentável (Gattuso *et al.*, 2018; Wylie *et al.*, 2016).

Tabela 2 – Estimativas de estoques de carbono para as áreas de estudo abordadas nos artigos revisados. Algumas estimativas estão exibidas tais como aparecem nos respectivos estudos ^[1, 6, 10, 17] e outras sofreram conversão de unidade (de kg C/m² para Mg C/ha) ^[5, 13, 15] para que a comparação com os outros resultados ficasse mais visível.

Área de Estudo	Carbono biomassa <i>above</i> (AGB) e <i>belowground</i> (BGB)	Carbono solo	Carbono total do ecossistema
Baía de Araçá (SP) – Planície entre marés/APA	-	-	Em 115 ha: 1945 ± 45 Mg C (modelo) Aprox. 17 Mg C/ha*
Baía de Araçá (SP)	AGB = 14,6; BGB = 7,1; Biomassa total = 21,7 Mg C/ha	-	-
Costa Norte de SP	AGB = 76,09 Mg/ha BGB = 22,07 Mg/ha	59,2 Mg/ha	157,36 Mg/ha
Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, Baía de Sepetiba (RJ)	BGB = 104.41 ± 20.73 Mg C/ha	-	-
Rio Piraquê-Açu (ES)	AGB = 1,46 Mg C/ha	-	-
Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, Baía de Sepetiba (RJ)	AGB = aprox. 38 - 50% C **	-	-
Rio Crumahú (SP)	-	aprox. 14% - 33% C **	-
Delta do Rio Parnaíba (PI)	AGB = 258,34 Mg C/ha	-	-
Rio Potengi (RN) - Manguezal em restauração	AGB = 26,59 ± 9,21 – 42,28 ± 9,99 Mg C/ha	-	-

Ceará (NE do Brasil)	-	Aprox. 82 ± 9 Mg C/ha ("manguezais representativos") Aprox. 124 ± 19 Mg C/ha (manguezais preservados)	-
Estuários do Acaraú e do Jaguaribe (CE)	ABG = 70 Mg C/ha BGB = 14 Mg/ha Biomassa total = 84 Mg/ha	~500 Mg C/ha (Acaraú) ~150 Mg C/ha (Jaguaribe)	605 Mg C/ha (Acaraú) 224 Mg C/ha (Jaguaribe)
Rio Jaguaribe (CE), Rio Cocó (CE) e Rio Timonha (CE)	-	Aprox. 148 ± 11 Mg C/ha (Timonha) 83 ± 30 Mg C/ha (Cocó) 83 ± 19 Mg C/ha (Jaguaribe)	-
Estuários do Acaraú (CE) e do Jaguaribe (CE)	-	81 - 67 Mg C/ha (áreas não impactadas) 38 - 29 Mg C/ha (áreas impactadas)	-
Ilha Guarás (PA)	AGB = 110.1 Mg C/ha	-	-
Rio Amazonas (PA)	ABG = 145 Mg/ha BGB = 14 Mg/ha Biomassa total = 159 Mg C/ha	340 Mg C/ha	257 Mg C/ha (<i>saltmarshes</i>) 511 Mg C/ha (manguezais)
Estimativas globais, Brasil	-	-	Brasil: 389.760.564 ± 9.556.539 t C 507 Mg C/ha*
Todo o território do país	AGB = 30 e 190 Mg C/ha	234 Mg C/ha	-

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

*(aproximação feita pelo autor)

** concentrações em percentual. Valores não comparados com os resultados expressos em Mg/ha.

Tabela 3 – Informações complementares extraídas dos artigos revisados.

Área de Estudo	Características Ambientais	Influência Antrópica	Regime Climático	Latitude
Baía de Araçá (SP) - Planície de maré/APA	Planície salina entre marés (<i>mudflat</i>)	Ocupações humanas - Influência não considerada	Tropical úmido	23° 49'S
Baía de Araçá (SP)	Floresta de mangue	Ocupações humanas, desmatamento	Tropical úmido	23° 49'S
Costa Norte de SP - Diversos ecossistemas	Sem informação	Sem informação	Tropical úmido	aprox. 23° S
Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, Baía de Sepetiba (RJ)	Mangue de franja	Reserva Biológica Estadual de Guaratiba	Tropical úmido	23° 00' S
Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, Baía de Sepetiba (RJ)	Mangue de franja, floresta transicional e planície salina	Sem informação	Tropical úmido	aprox. 23° S
Rio Crumahú (SP)	Floresta de mangue	Não considerada	Tropical úmido	23° 52' S
Rio Piraquê-Açu (ES)	Floresta de mangue	Sem informação	Tropical úmido	19 °56' S
Rio Jaguaribe (CE), Rio Cocó (CE) e Rio Timonha (CE)	Floresta de mangue	Esgoto urbano, desmatamento (Cocó), efluentes de carcinicultura (Jaguaribe) e mangue preservado (Timonha)	Tropical Semiárido	02° 56' S - 04° 26' S
Delta do Rio Parnaíba (PI)	Floresta de mangue, planície de inundação	Área de uso sustentável (casas, agricultura...), impactos 'positivos' mencionados*	Transição Tropical/Equatorial Úmido (Amazônico)	02° 46' S
Rio Potengi (RN) - Manguezal em restauração	Floresta de mangue preservada, tanques de carcinicultura abandonados	Carcinicultura, desmatamento	Tropical Semiárido	05° 45' S

Ceará (NE do Brasil)	Manguezais do semiárido nordestino	Manguezais com e sem influência antrópica - carcinicultura, esgoto, desmatamento - Impactos considerados	Tropical Semiárido	02° 56' S - 04° 26' S
Ceará (Estuários do Acaraú e do Jaguaribe)	Florestas de mangue e tanques de carcinicultura	Mangues preservados e impactados por carcinicultura - Impactos considerados	Tropical Semiárido	02° 50' S - 04° 32' S
Estuários do Acaraú (CE) e do Jaguaribe (CE)	Floresta de mangue (áreas impactadas por água residual de fazenda de camarão e áreas não impactadas por resíduos de carcinicultura)	Efluentes de carcinicultura	Tropical Semiárido	02° 50' S - 04° 32' S
Ilha Guarás (PA) - Florestas de mangue	Floresta de mangue	Área de conservação	Equatorial Úmido	00° 34' S
Rio Amazonas (PA)	Florestas de mangues e marismas	Não	Equatorial Úmido	00° 37' S - 00° 58' S
Estimativas globais, Brasil (detalhe para MA e PA)	Área total de florestas de mangue	Sem informação	-	-
Todo o território do país	Considera todos os ecossistemas do Brasil (dados disponíveis de manguezal/áreas alagadas)	Não considerada para vegetação de manguezal	-	-

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estimar o estoque de carbono orgânico do solo de um manguezal com diferentes níveis de degradação e restauração ecossistêmica, em um estuário de clima semiárido – Estuário do Rio Pacoti, CE – na região Nordeste do Brasil. A pesquisa visa contribuir para uma maior compreensão da dinâmica do carbono em manguezais de regiões semiáridas e para o aprimoramento de estratégias de conservação e recuperação de áreas costeiras, especificamente de manguezais degradados.

3.2. Objetivos específicos

- Estimar a quantidade de carbono estocado em 1 metro de solo em uma área de aproximadamente 27 ha;
- Avaliar estoques de carbono em diferentes intervalos de profundidade;
- Investigar possíveis diferenças entre os estoques de carbono azul de diferentes tratamentos da área de estudo, considerando a inundação pela maré, cobertura vegetal, estágio de recuperação ecossistêmica e impactos antrópicos;
- Comparar diferentes métodos de estimativa de carbono orgânico do solo (queima em mufla e análise elementar);
- Comparar os estoques de carbono estimados sob as perspectivas regional e global; e
- Cooperar com projetos de recuperação/restauração de manguezais.

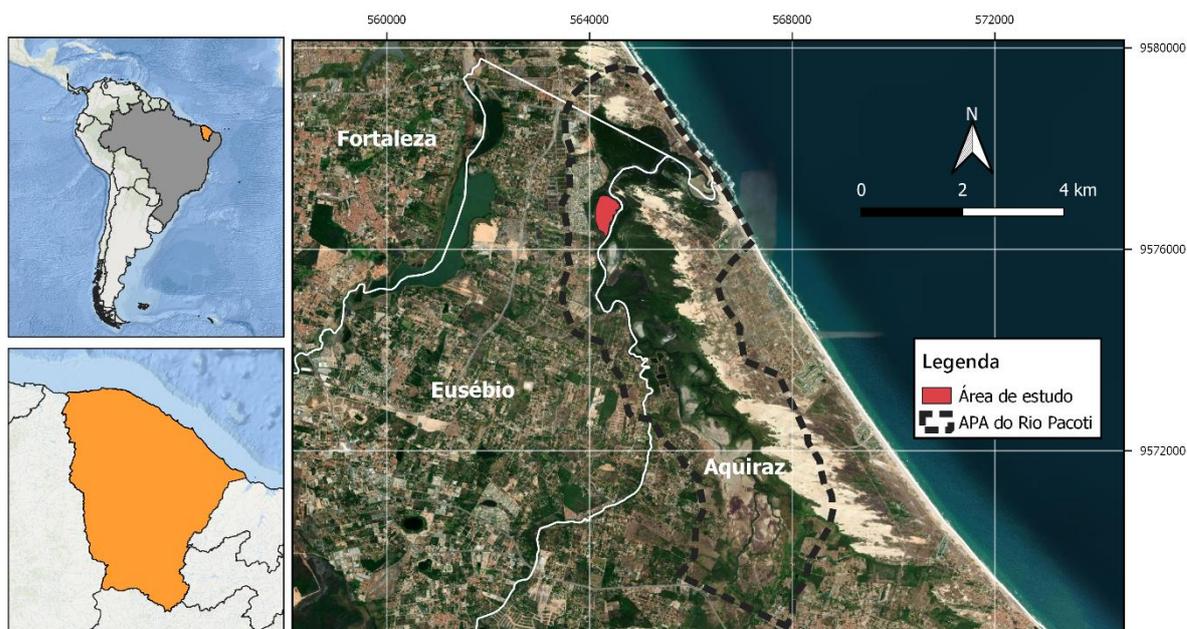
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

São identificados, no estado do Ceará, 22 estuários dos quais cerca de 182,25 km² são ocupados por manguezais, cujos bosques ocorrem como formações ribeirinhas (mangue de franja) e ocupando bacias salinas das planícies costeiras (SEMACE, 2006).

O estuário do Rio Pacoti, localizado entre os municípios de Fortaleza, Eusébio e Aquiraz, entre as latitudes 3° 53' 15'' S e 3° 55' 0'' S e longitudes 38° 22' 30'' W e 38° 26' 5'' W, fica a cerca de 150 km da nascente do rio, na Serra de Baturité. Esse sistema estuarino está inserido na Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Pacoti (Figura 2), a qual foi decretada em fevereiro de 2000, abrangendo uma área de 2914,93 ha, e visa a conservação dos campos de dunas, da vegetação (e.g. manguezais e restingas), de corpos hídricos associados, bem como da planície litorânea da Bacia do Rio Pacoti (Barbosa *et al.*, 2016; Lacerda *et al.*, 2007).

Figura 2 – Mapa da localização do estuário do Rio Pacoti, com destaque para a área da APA e a área de estudo no manguezal.



Fonte: elaborado pelo autor

Assim como a maioria das desembocaduras de rios da região semiárida, o estuário do Rio Pacoti pode ser considerado um estuário hipersalino, onde ocorrem misturas e processos caracteristicamente estuarinos apenas no período chuvoso, quando há fluxo de águas fluviais para o litoral. Mesmo apresentando característica intermitente o rio não perde conexão com o oceano no período de estiagem uma vez que, durante as marés cheias, a água do mar penetra o continente através do vale do rio (Marins *et al.*, 2002). O regime de marés na região atinge cerca de 3,1 metros durante sizígia e é caracterizado, portanto, como sendo de meso maré (DNH, 2021).

O clima da região é tropical semiárido com média pluviométrica anual de 1200 mm e caracterizado por um período de chuvas no primeiro semestre do ano e um período seco no restante dos meses. O regime de chuvas do estado é controlado, principalmente, pela migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pode ter início no mês de dezembro, com as chuvas de pré-estação, e estender-se até os meses de junho ou julho, conforme a atuação das condições oceânicas e atmosféricas. O maior registro de chuvas ocorre geralmente ao longo da quadra chuvosa, que se inicia em fevereiro e prolonga-se até o mês de maio ou durante os trimestres fevereiro/março/abril ou março/abril/maio (FUNCEME, 2020; IPECE, 2010; Lacerda *et al.*, 2007).

Mais precisamente, o presente trabalho foi efetuado em uma área de manguezal em recuperação, localizado a cerca de 2,4 km da desembocadura do Rio Pacoti. A área apresenta notável heterogeneidade com relação à cobertura de mangue e ao estágio de sucessão ecológica (Figura 3). Isso em razão de parte do antigo mangue ter sido retirada para a implantação de uma salina, que funcionou do início dos anos 1960 até início da década de 1980 (Figura 4) (Lacerda *et al.*, 2007). Devido à introdução desse empreendimento há décadas e à consequente degradação de parte do manguezal, alguns trechos são desprovidos de cobertura vegetal, enquanto outros passam por processos de restauração ecossistêmica, onde observa-se a colonização e estabelecimento de bosques de mangue (Bracho *et al.*, Submt; Ferreira *et al.*, Submt.).

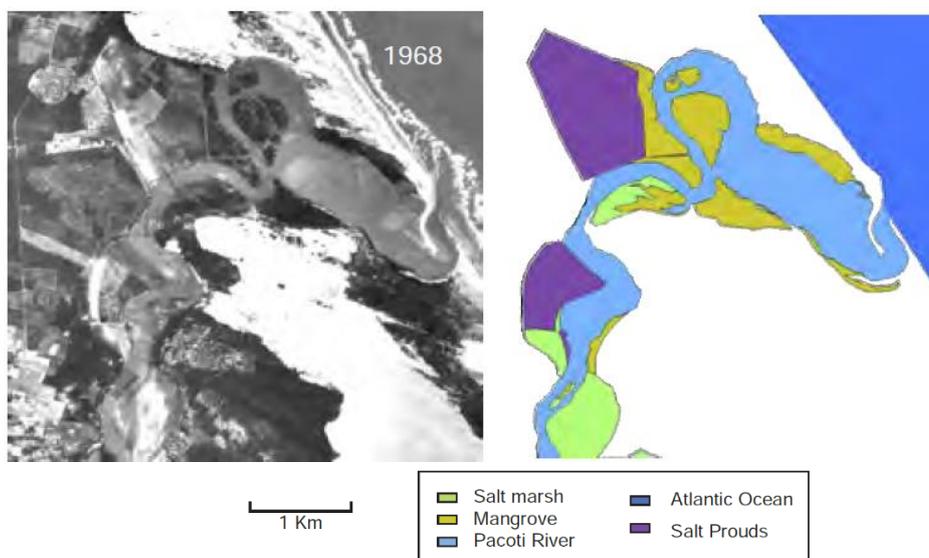
É observada no manguezal do Rio Pacoti a presença de mangues das espécies *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana*, *Laguncularia racemosa* e *Conocarpus erectus* desenvolvendo-se, em algumas áreas, associadas a manchas de plantas herbáceas facilitadoras das espécies *Batis maritima* e *Sesuvium portulacastrum*.

Plantas da espécie *Rhizophora mangle* (mangue vermelho) ocupam, na área de estudo, porções baixas e médias no perfil intermaré, onde a salinidade é mais baixa. Os mangues do gênero *Avicennia* ocupam porções mais elevadas no perfil intermaré e suportam maiores salinidades (Schaeffer-Novelli *et al.*, 2000). Em menor abrangência encontram-se mangues da espécie *Laguncularia racemosa* (mangue branco), ocorrendo nas posições médias e altas no perfil de maré, e da espécie *Conocarpus erectus* nas porções mais elevadas do leito do rio, onde o solo é mais arenoso (SEMACE, 2006).

Figura 3 – Foto aérea do manguezal do Rio Pacoti, CE.



Figura 4 – Imagem de satélite e mapa da cobertura do solo no estuário do Rio Pacoti, CE, em 1968.



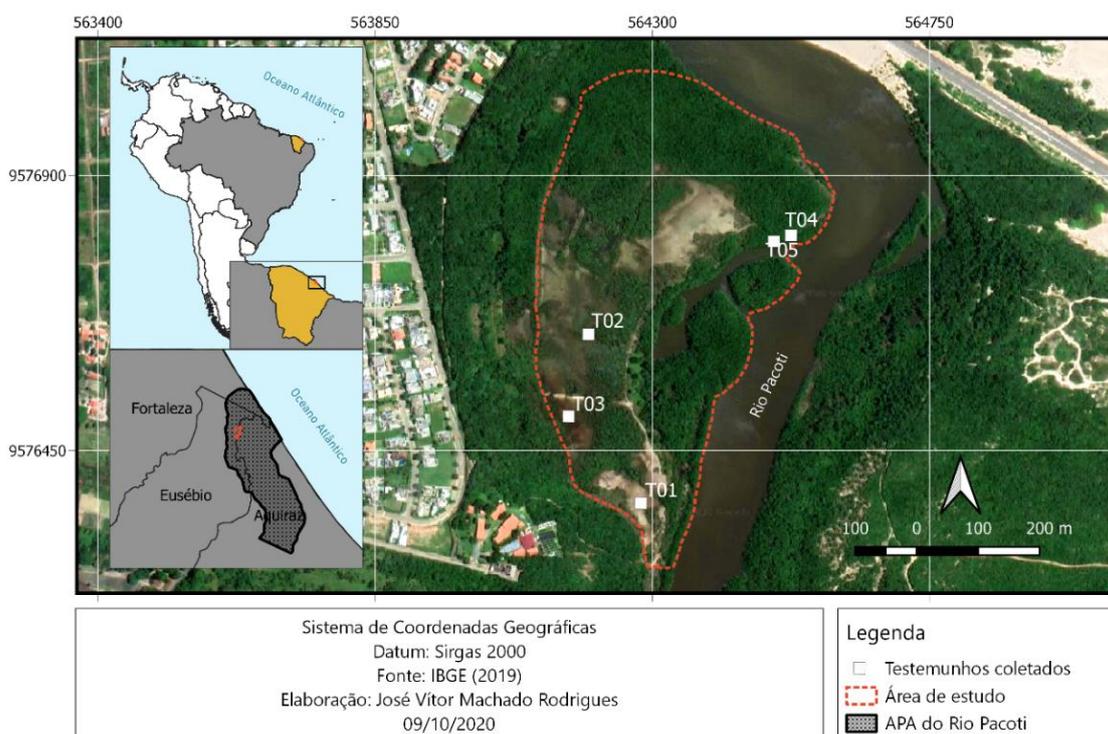
Fonte: Modificado de Lacerda *et al.* (2007)

4.2. Coleta de campo

A metodologia deste trabalho foi baseada no livro *Coastal Blue Carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows* de Howard *et al.* (2014), que apresenta protocolos internacionais e normatizados para o estudo do carbono azul em ecossistemas de manguezais.

Foram realizadas duas campanhas ao manguezal do Rio Pacoti. Na primeira campanha, em março de 2020, foram coletados cinco testemunhos, e suas réplicas foram coletadas em dezembro de 2020 (Figura 5). Ao todo foram coletados, portanto, 10 testemunhos. O local exato dos testemunhos foi marcado com GPS *Garmin*® portátil.

Figura 5 – Mapa de localização da área de estudo, no manguezal do Rio Pacoti, CE, com indicação dos pontos de coleta de testemunhos.



Fonte: Mapa elaborado pelo autor.

Os pontos de coleta foram estabelecidos com o intuito de abranger as diferentes áreas (tratamentos) levando-se em conta os níveis topográficos, o impacto sofrido pela mudança do uso do solo (instalação de tanques de salinas) e a cobertura vegetal. Este último fator considera a presença ou não de plantas de mangue, a densidade de biomassa e a maturidade das florestas. Para tanto foram estabelecidos três tratamentos para a área

de estudo: área de Apicum, onde foi coletado o testemunho T01; área em Recuperação (área de transição), correspondente aos testemunhos T02 e T03 e área Preservada, representada por T04 e T05 (Figura 5). Posteriormente, as áreas foram agrupadas em degradadas (T01, T02, T03) e não degradadas (T04 e T05) para análises estatísticas.

A **área de apicum** (Figura 6A) compreende a porção mais seca, cuja frequência de inundação pela maré é menor — sendo mais pronunciada apenas durante marés de sizígia (Shen *et al.*, 2018; Soares *et al.*, 2017; Schaeffer-Novelli *et al.*, 2000). Além disso, salinidades próximas ou maiores que 100 podem ser registradas durante a estação seca (Bracho *et al.*, Submt.; Ferreira *et al.*, Submt.), devido às elevadas taxas de evaporação. Essa área é desprovida de cobertura vegetal significativa de mangue, sendo possível identificar espécies de herbáceas halófitas (facilitadoras) e.g. *Batis maritima* e *Sesuvium portulacastrum* adjacentes às plantas juvenis de *Avicennia* spp. e *Laguncularia* spp. no entorno da área. Esta zona é considerada uma planície hipersalina (em inglês, *hypersaline tidal flat*) e caracteriza-se como uma zona de transição entre a vegetação de mangue e a “mata de terra firme” (continental).

No Brasil, essa parte transicional é comumente chamada de apicum, cuja origem se dá na língua indígena Tupi e deriva da palavra *apecu*, que significa “língua de areia” ou “coroa de areia” (Albuquerque *et al.*, 2014; Schmidt *et al.*, 2013, *apud* Cunha, 1999). No estuário do Rio Pacoti essa área não apresenta indicativos de uma recuperação ecossistêmica (colonização por mangues) mesmo décadas após a desativação das salinas.

O não estabelecimento de mangues no apicum pode ser explicado pela alteração hidrológica causada por barreiras (diques) construídas para delimitar os tanques de salina entre os anos 1960 e 1980, às elevadas concentrações de sal no solo e à elevação topográfica. O baixo fluxo hídrico nesse trecho torna as condições físico químicas não adequadas para o estabelecimento e crescimento de espécies de mangue (Pellegrini, 2000; Hadlich *et al.*, 2010).

A **área em recuperação**, há alguns anos, passa por processos de recuperação ecossistêmica (Bracho *et al.*, 2021, no prelo; Ferreira *et al.*, 2021, no prelo). Portanto observa-se plantas de mangue juvenis (de até cerca de 3 metros de altura) associadas ou não a plantas facilitadoras e sujeitas a um maior fluxo de água. A recuperação hidrológica nessa área foi facilitada pela abertura de canais nas barreiras dos antigos tanques de salina (Ferreira *et al.*, 2021, no prelo). Nessa área considerou-se, para a coleta de testemunhos,

uma porção com plantas de mangue do gênero *Avicennia* recém estabelecidas (T03; Figura 5), medindo até 1m de altura; e também uma porção com plantas juvenis de aproximadamente 3m de altura, também do gênero *Avicennia* (T02; Figura 5).

A **área preservada** corresponde ao trecho de vegetação ribeirinha (mangue de franja), representada pelo mangue vermelho (*Rhizophora mangle*). Nesta zona a densidade de vegetação é maior e mais desenvolvida que nos outros tratamentos e a frequência de inundação é maior (Ferreira *et al.*, 2021, no prelo; Estrada *et al.*, 2013), o que, hipoteticamente, ocasiona uma maior preservação da matéria orgânica estocada no solo e, conseqüentemente, uma maior estocagem de carbono. Para esse trecho de floresta de mangue considerou-se, para as coletas, uma área menos elevada (submersa) (T05; Figura 5) e outra adjacente e mais elevada no perfil topográfico (T04; Figura 5), sujeita a uma menor frequência de inundação.

As coletas foram realizadas durante maré baixa com a utilização de tubos de PVC de cerca de 1 metro de comprimento (Figura 6A). Folhas e galhos foram retirados da superfície do solo e evitou-se locais com muitas raízes durante a perfuração. Este procedimento foi realizado com auxílio de um martelo emborrachado (Figura 6B).

Figura 6 – Tubo de PVC utilizado durante as coletas de testemunho de solo (A) e martelo emborrachado manuseado para auxiliar a perfuração (B).



Fonte: registros do autor

Após retirado do solo, seccionou-se o testemunho em oito intervalos de profundidade: 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30, 30–50 e >50 cm (Figura 7A). Para tanto, utilizou-se uma fita métrica e uma espátula. Ainda em campo retirou-se uma amostra de solo de volume conhecido, utilizando-se uma seringa de 20 ml, para posterior análise de densidade do solo e teor de carbono (Figura 7B). Adicionalmente, separou-se uma amostra para análise granulométrica. Após esses procedimentos, as amostras de solo foram etiquetadas, refrigeradas em um *cooler* e transportadas para o laboratório de Zoobentos, no Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR – UFC).

Figura 7 – Testemunho disposto sobre o solo para fracionamento (sub amostragem) dos intervalos de profundidade (A) e porção da amostra retirada com seringa (B).



Fonte: registros do autor

4.3. Análises em laboratório

Três parâmetros foram considerados para se quantificar o estoque de carbono do solo para 1 metro de profundidade:

Intervalo de profundidade da sub amostra – Cada intervalo de profundidade foi sub amostrado, devidamente etiquetado e congelado para posteriores cálculos de densidade e de teor de carbono;

Densidade do solo (*dry bulk density*) – A densidade do solo foi estabelecida pela seguinte equação:

$$(1) \text{ Dry bulk density (g/cm}^3\text{)} = \text{Peso de solo seco (g)} / \text{Volume original amostrado (cm}^3\text{)};$$

Teor de carbono orgânico (% C_{org}) do solo – Uma vez determinada a densidade do solo, pode-se usá-la juntamente com o teor de C_{org} para calcular a densidade de carbono para um intervalo de profundidade específico. Complementarmente, foram realizadas análises granulométricas de cada intervalo de profundidade dos testemunhos. É importante frisar que os termos “teor” e “concentração” de carbono referem-se ao percentual de carbono orgânico (% C_{org}).

O peso do solo seco foi determinado após secagem da amostra na estufa a 60 °C por cerca de 5 dias. O volume original amostrado (cm³) corresponde ao volume da seringa utilizada (20 ml = 20 cm³). As amostras foram colocadas em uma placa de *petri* durante a secagem na estufa e após retiradas foram levadas para um dessecador (Figura 8) por 1 hora antes de serem pesadas com uma balança de precisão.

Figura 8 – Amostras de solo do manguezal do Rio Pacoti, CE no dessecador após secagem na estufa.



Fonte: registro do autor

Após o cálculo de densidade do solo as amostras foram homogeneizadas (Figura 9A) e, em seguida, estimou-se o teor de carbono orgânico (% C_{org}) pelo método da queima em forno mufla à 450 °C por 4 horas (Figura 9B), utilizando-se cadinhos (Figura 9C). Esse é um método semi-quantitativo que utiliza tecnologia simples e relativamente barata para estimar o teor de matéria orgânica (MO) pela diferença de peso da amostra antes e depois da combustão (2) (Howard *et al.*, 2014). A partir desse parâmetro utiliza-se uma relação empírica entre matéria orgânica e carbono orgânico (3).

Figura 9 – Homogeneização das amostras de solo (A); Forno mufla utilizado para queima (B) e amostras em cadinhos após queima em mufla (C).



Fonte: registros do autor

- (2) % *Loss on ignition* (LOI) = [(peso da amostra seca antes da queima (g) – peso da amostra seca depois da queima (g)) / peso da amostra antes da queima (g)] * 100
- (3) % Corg = 0,27 * % LOI

A equação (3) é um fator de conversão estabelecido a partir de estudos em manguezais de região semiárida do nordeste brasileiro (Nóbrega *et al.*, 2015). Pelo fato de ter sido determinada em manguezais de mesma região (também no estado do Ceará) optou-se por aplicar essa relação para o cálculo do teor de carbono orgânico do solo do manguezal do Pacoti.

Para as análises granulométricas foi realizado, primeiramente, o peneiramento a úmido em peneira de malha de 0,062 mm para separação das frações de finos (silte e argila), após pesagem de 50 g de cada amostra. Em seguida utilizou-se o agitador de peneiras *Ro-Tap*, durante 10 minutos, para as frações grossas (areia). Cada fração foi

pesada em balança de precisão, convertida em porcentagem e processada no *software* ANASED 5.0 (da Motta Portillo *et al.*, 2016).

4.4. Analisador elementar

Amostras de solo do Pacoti também foram processadas em um analisador elementar Flash EA 1112 (Thermo Electron Corporation), do Laboratório de Pesquisa em Biotransformações de C e N (LABCEN), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Esse equipamento permite uma estimativa mais precisa do teor de carbono do solo e possibilita uma comparação com os resultados obtidos pelo método da queima em mufla (método semi-quantitativo) (Howard *et al.*, 2014).

Antes de serem submetidas ao analisador elementar, foi realizado o procedimento da acidificação nas amostras de solo do manguezal do Pacoti, com auxílio do Laboratório de Avaliação de Contaminantes Orgânicos (LaCOR – LABOMAR, UFC). Tal metodologia consiste na aplicação de HCl 1M sobre o sedimento para verificar se havia quantidades significativas de carbonato (Figura 10). Quando presente na amostra, o carbonato de cálcio (CaCO_3) pode interferir na determinação de carbono orgânico pelo analisador elementar (Howard *et al.*, 2014; Nóbrega *et al.*, 2015).

Figura 10 – Gotejamento de HCl sobre amostras de solo do manguezal do Rio Pacoti, CE.



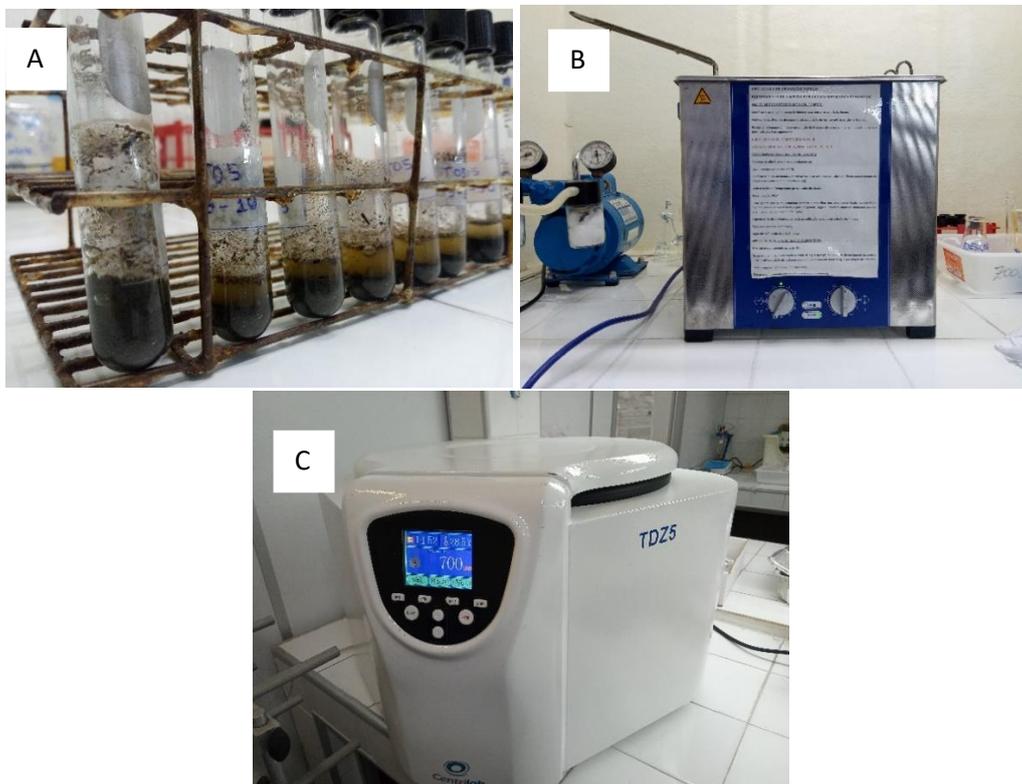
Fonte: Registro do autor.

Para verificar a presença de carbonato as amostras de solo foram submetidas às seguintes etapas:

Teste para presença significativa de carbonato: Adicionou-se algumas gotas de HCl (1M) a uma pequena amostra de sedimento. Caso houvesse a formação de bolhas de CO₂ a presença de carbonato seria confirmada e a amostra deveria ser submetida às próximas etapas:

- 1 – Adicionou-se HCl 1M ao recipiente (tubos de ensaio) até cobrir a amostra de sedimento (1g) e agitou-se por 15 minutos (manualmente ou com banho ultrassônico) (Figuras 11A e 11B);
- 2 – Descanso das amostras (18 a 24h);
- 3 – Adicionou-se mais HCl 1M e agitou-se por 15 minutos para provocar a reação com quantidades de carbonato remanescentes;
- 4 – Centrifugou-se as amostras e removeu-se o ácido com pipeta (Figura 11C);
- 5 – Após remoção do ácido, as amostras foram lavadas com água destilada e centrifugadas. A lavagem foi repetida duas vezes;
- 6 – Secagem em estufa a 60 °C;
- 7 – As amostras foram armazenadas em eppendorf de 2 mL e enviadas ao LABCEN.

Figura 11 – Amostras de solo imersas em HCl (A); Amostras em banho ultrassônico (B) e centrífuga utilizada previamente à da remoção do ácido (C).



Fonte: Registros do autor.

4.5. Cálculo do estoque total de carbono orgânico do solo

Com as informações sobre profundidade, densidade e teor de carbono orgânico do solo seguiu-se as etapas abaixo para se estimar o estoque total de carbono do solo para a profundidade de 1 metro:

Passo 1: calculou-se a densidade de carbono orgânico para cada intervalo de profundidade do testemunho da seguinte forma:

$$(4) \quad \text{Densidade de carbono do solo (g/cm}^3\text{)} = \text{densidade do solo (g/cm}^3\text{)} * (\% C_{\text{org}}/100)$$

Passo 2: Calculou-se a quantidade de carbono nas 8 sub amostras do testemunho multiplicando-se cada valor de densidade de carbono no solo (passo 1) pela medida do intervalo da amostra (cm):

$$(5) \quad \text{Quantidade de carbono da sub amostra (g/cm}^2\text{)} = \text{Densidade de carbono do solo (g/cm}^3\text{)} * \text{intervalo da amostra (cm)}.$$

Passo 3: Somou-se a quantidade de carbono de cada intervalo, totalizando 1 metro de profundidade:

Exemplo: Testemunho T01 = Quantidade de carbono de 0-5 cm (g/cm²) + Quantidade de carbono de 5-10 cm (g/cm²) + ... + Quantidade de carbono em >50 cm (g/cm²)

Passo 4: Converteu-se o carbono total do testemunho (passo 3), expresso em g/cm², para as unidades comumente utilizadas em dados de estimativa de estoque de carbono (MgC/hectare ou t/hectare) de acordo com os seguintes fatores de conversão (1 Mg (Megagrama) = 1 000 000 g; e 1 ha (hectare) = 100 000 000 cm²). Portanto os valores de cada testemunho foram convertidos segundo a equação:

$$(6) \quad \text{Quantidade de carbono no testemunho (MgC/hectare)} = \text{Soma do carbono de cada intervalo de profundidade (g/cm}^2\text{)} * (1 \text{ Mg}/1.000.000 \text{ g)} * (100.000.000 \text{ cm}^2/1 \text{ ha}).$$

Passo 5: Para obter a quantidade de carbono do solo para toda a área de estudo, multiplicou-se a média de carbono de cada tratamento pela área correspondente (em hectares).

$$(7) \quad \text{Carbono orgânico do solo para a área de estudo (MgC)} = [(C \text{ médio para o Apicum (Mg C/ha)} * (\text{Área de apicum}) + (C \text{ médio para a área em Recuperação (Mg C/ha)} * (\text{Área em Recuperação}) + (\text{Carbono médio para a área Preservada (Mg C/ha)} * (\text{Área de mangue preservado}))]$$

Para as estimativas de emissão de CO₂ equivalente multiplicou-se o estoque de carbono por 3,67 (razão molar de CO₂/C) (Howard *et al.*, 2014).

4.6. Análises estatísticas

Testes estatísticos e gráficos foram executados utilizando-se o *software* R versão 4.0.5 (R Foundation for Statistical Computing, 2021) e o Excel (Microsoft, 2016). Comparou-se as medianas dos valores de densidade, teor de carbono orgânico e de estoques de carbono no solo pelos testes de Kruskal-Wallis e Wilcoxon. Comparações pareadas foram obtidas pelo teste de *Dunn* e ajustadas pelo método de *Bonferroni*. Comparou-se os valores de densidade do solo, teor e estoque de carbono orgânico com relação aos testemunhos e aos intervalos de profundidade.

Além disso, gerou-se um modelo de regressão linear pelo método de Spearman para o estabelecimento de uma relação entre matéria orgânica e carbono orgânico para o manguezal do Rio Pacoti, com base nos valores obtidos por analisador elementar.

5. RESULTADOS

5.1. Granulometria

Os percentuais médios de sedimentos finos (silte e argila) e grossos (areia) de cada testemunho foram calculados para cada intervalo de profundidade (Figura 23). O percentual de finos teve mínimo de 4,7% abaixo de 50 cm de profundidade, em T03 (plantas recém estabelecidas, na área em recuperação); e máximo de 67%, também abaixo de 50 cm, em T05 (mangue de franja). A classificação dos sedimentos analisados variou de areia fina (T03) a silte fino (T05), de acordo com Folk & Ward (1957).

Figura 12 – Percentuais médios de sedimentos grossos (areia) e finos (silte e argila) para os intervalos de profundidade amostrados de cada testemunho coletado no manguezal do Rio Pacoti, CE.

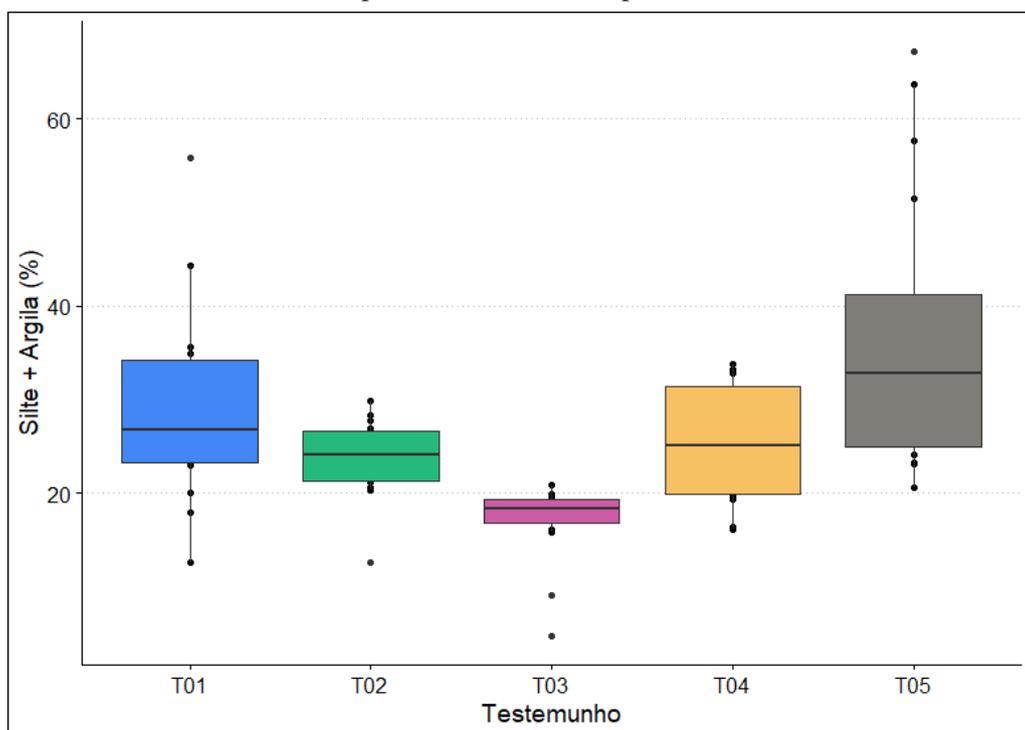


Fonte: Gráficos elaborados pelo autor.

Diferença significativa ($p < 0,05$) foi observada entre os testemunhos, com relação ao percentual de finos (silte e argila) (Figura 24). A área ocupada por plantas de mangue

recém estabelecidas, correspondente ao testemunho T03, possui os menores percentuais de silte e argila da área de estudo. Enquanto que, entre os outros testemunhos, não houve diferença significativa ($p > 0,05$).

Figura 13 – Boxplot do percentual de silte e argila, por testemunho (1 m de profundidade), no manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (testemunho). A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

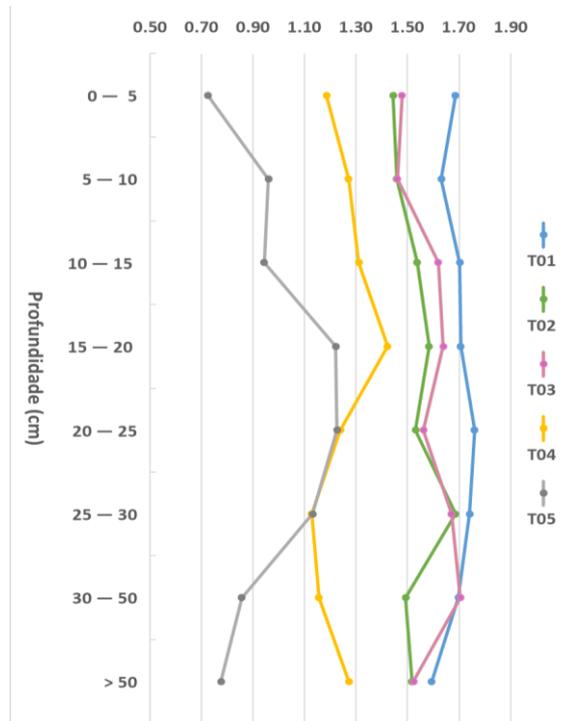
5.2. Densidade do solo (*dry bulk density*)

Os valores de densidade do solo, considerando todos os 5 testemunhos coletados e todos os intervalos de profundidade amostrados, apresentaram valor mínimo de $0,60 \text{ g/cm}^3$ (T05; mangue de franja) e máximo de $1,83 \text{ g/cm}^3$ (T01; apicum degradado) (Figura 12). O valor médio, com desvio padrão, foi de $1,41 \pm 0,30 \text{ g/cm}^3$ (verificar Tabela 5 para valores médios por profundidade amostrada em cada tratamento).

Observou-se densidade do solo significativamente maior no testemunho T01 (apicum degradado), quando comparado aos testemunhos T04 e T05 (área preservada) ($p < 0,05$) (Figura 13). Os testemunhos T02 e T03 (área em recuperação) também apresentaram densidades significativamente maiores que T05 ($p < 0,05$). Por outro lado, não houve diferença significativa de densidade do solo entre os diferentes intervalos de

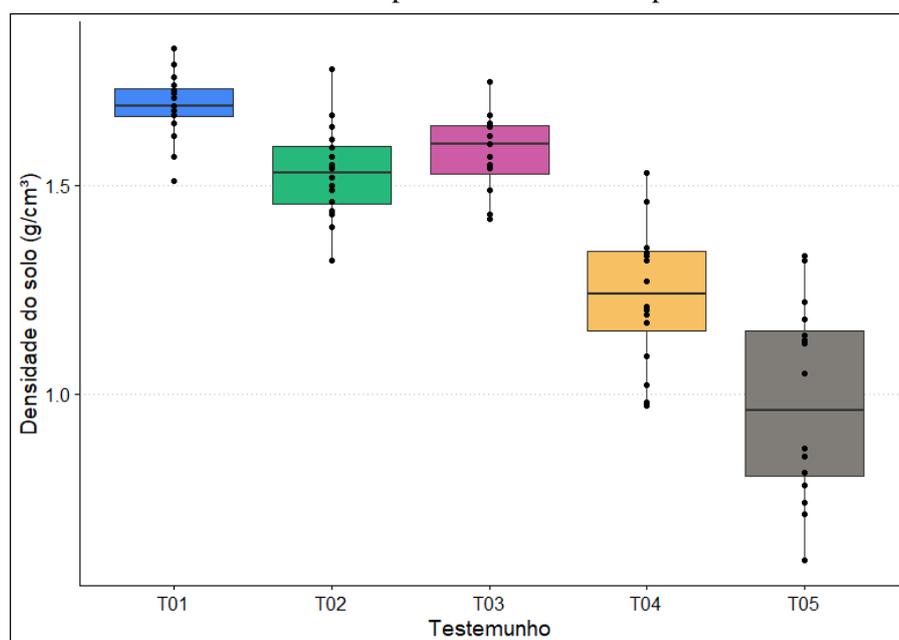
profundidade ($p > 0,05$), apesar de ser possível observar um aumento de 0,60 para 1,13 g/cm^3 da camada superficial até a camada de 20 – 25 cm em T05 (Figura 12).

Figura 14 – Densidade do solo (g/cm^3) média, por intervalo de profundidade (cm), dos testemunhos (T01 a T05) coletados no manguezal do Rio Pacoti, CE.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

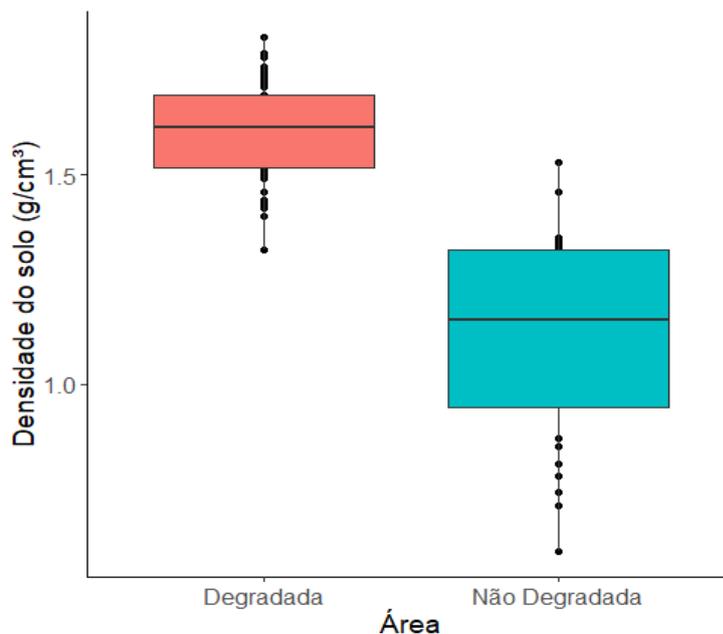
Figura 15 – Boxplot dos valores de densidade do solo (g/cm^3) por testemunho no manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (testemunho), para 1 m de profundidade. A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

Ao agrupar os dados de densidade do solo correspondentes às áreas degradadas e não degradadas verifica-se diferença significativa ($p < 0,05$) entre as medianas (Figura 14).

Figura 16 – Boxplot dos valores de densidade do solo (g/cm^3) para a área degradada (T01, T02 e T03) e área não degradada (T04 e T05) do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (tratamento), para 1 m de profundidade. A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

5.3. Teor de carbono orgânico (%Corg)

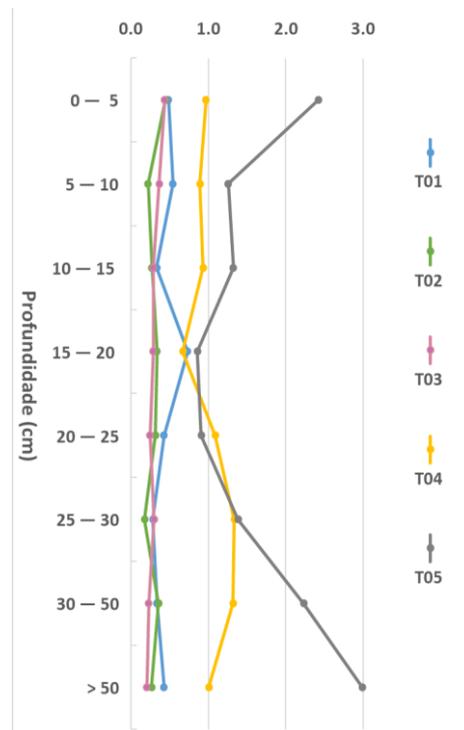
5.3.1. Relação para manguezais do semiárido (Nóbrega *et al.*, 2015)

A partir da aplicação da relação entre percentual de matéria orgânica e teor de carbono orgânico estabelecida por Nóbrega *et al.* (2015) obteve-se valor médio, com desvio padrão de $0,75 \pm 0,69\%$ Corg, com mínimo de 0,09% (T02; área em Recuperação) e máximo de 2,93% (T05; área Preservada) (Figura 15), considerando todos os intervalos de profundidade dos 5 testemunhos coletados.

Além disso observou-se uma diferença significativa de %Corg entre os testemunhos. Os testes não paramétricos indicaram maior teor de carbono orgânico em T05, com relação a T01, T02 e T03 ($p < 0,05$) (Figura 16); maior % Corg em T04, quando comparado a T02 e T03 ($p < 0,05$) e maior % Corg em T01, comparado ao T02 ($p < 0,05$). Nota-se a presença de *outlier* em uma das camadas amostradas em T01 (15 – 20 cm), o que faz com que não haja diferença entre o teor de carbono de T01 e de T04. Por fim, não

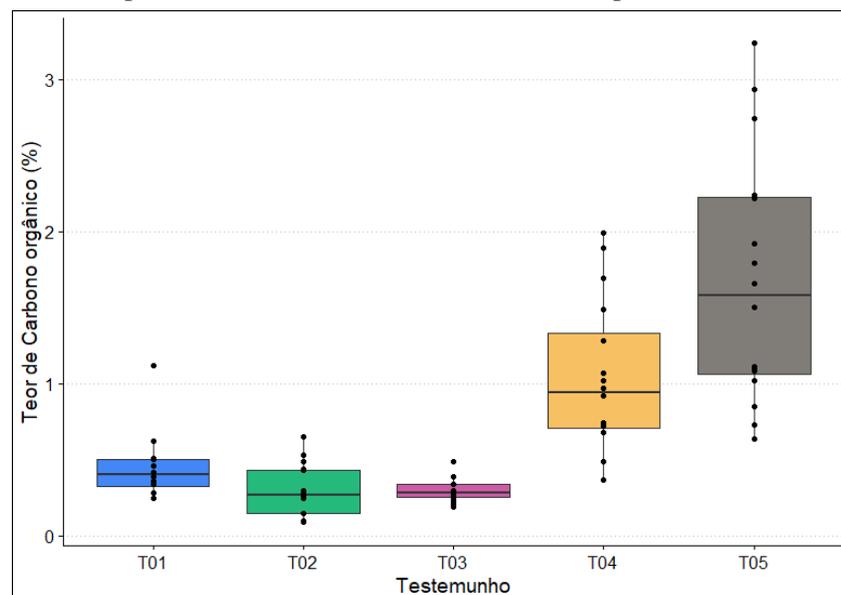
houve diferença significativa de percentual de carbono orgânico entre os intervalos de profundidade dos testemunhos ($p > 0,05$).

Figura 17 – Teor de carbono orgânico (%Corg), obtido pelo fator de conversão de Nóbrega *et al.* (2015), por intervalo de profundidade (cm) dos testemunhos (T01 a T05) coletados no manguezal do Rio Pacoti, CE.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

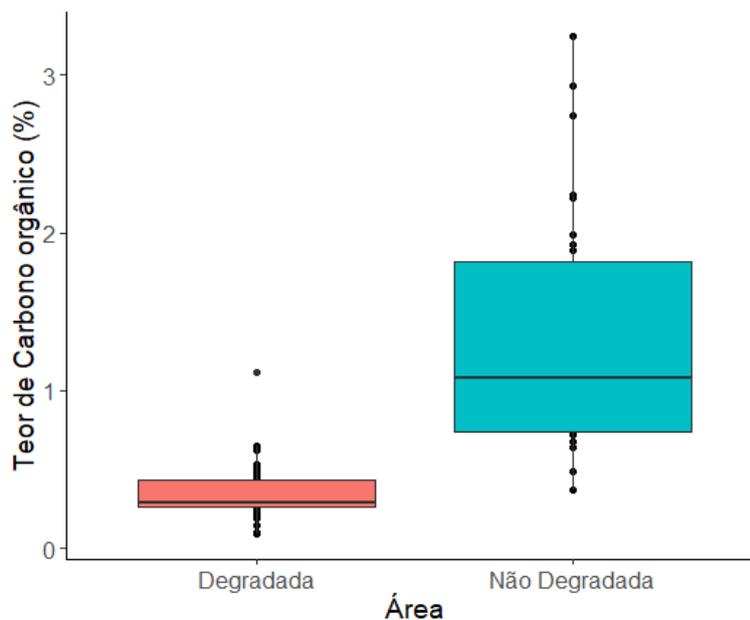
Figura 18 – Boxplot dos teores de carbono orgânico (% Corg) por testemunho, obtidos pelo fator de conversão de Nóbrega *et al.* (2015) no manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (testemunho), para 1 m de profundidade. A linha horizontal representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

O gráfico da figura 17 mostra os percentuais de carbono separados por área, quanto à degradação ambiental e evidencia diferença significativa ($p < 0,05$).

Figura 19 – Boxplot dos percentuais de carbono obtidos pelo fator de conversão de Nóbrega *et al.* (2015), para a área degradada (T01, T02 e T03) e área não degradada (T04 e T05) do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (tratamento), para 1 m de profundidade. A linha horizontal representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.

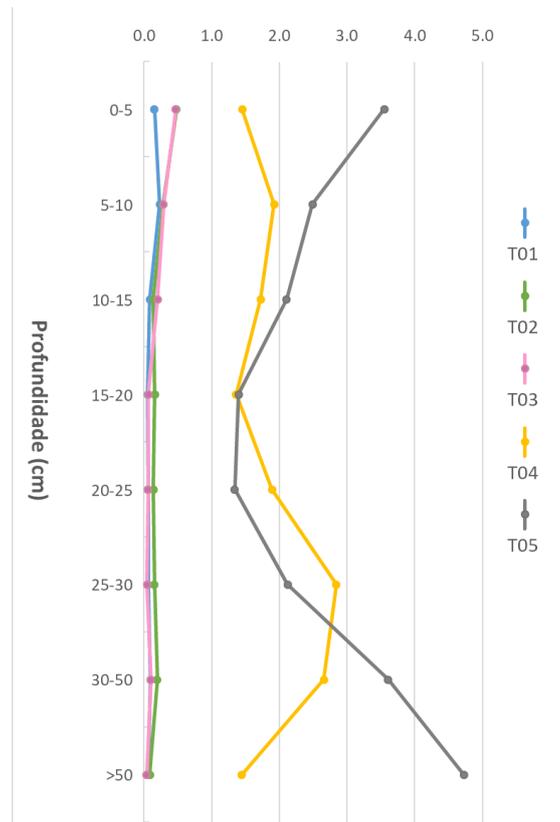


Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

5.3.2. Analisador elementar

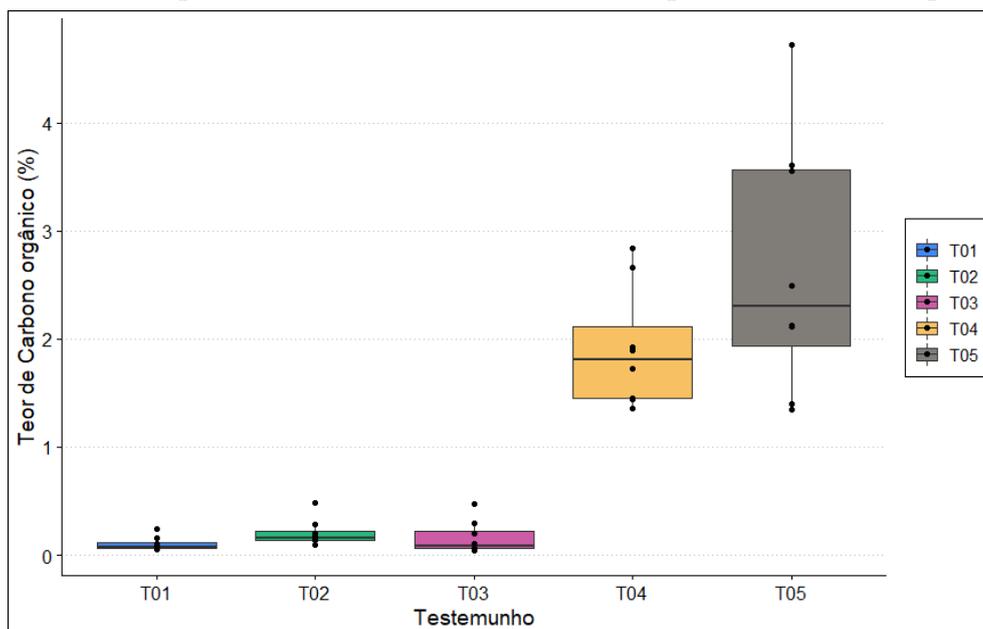
Em seguida encontram-se descritos os resultados obtidos pelo analisador elementar. O valor médio de % C_{org}, com desvio padrão, para a área de estudo foi de $1,01 \pm 1,22\%$, com valor mínimo de 0,04% (T03; área em Recuperação) e máximo de 4,72% (T05; área inundada do mangue de franja) (Figura 18), considerando todos os intervalos de profundidade dos 5 testemunhos coletados. Houve variação do teor de carbono entre os testemunhos, sendo significativamente maior em T05, quando comparado aos testemunhos T01, T02 e T03 ($p < 0,05$) (Figura 19). T04, referente à área de mangue de franja mais elevada (menos inundada), apresentou maiores concentrações de carbono que T01 e T03 ($p < 0,05$), mas não diferiu de T02 e nem da área mais inundada (T05) adjacente.

Figura 20 – Teor de carbono orgânico (%Corg), obtido por analisador elementar, para cada intervalo de profundidade (cm) dos testemunhos (T01 a T05) coletados no manguezal do Rio Pacoti, CE.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Figura 21 – Boxplot dos teores de carbono orgânico (% Corg) por testemunho (1 m de profundidade), obtidos por analisador elementar, para o manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (testemunho). A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.

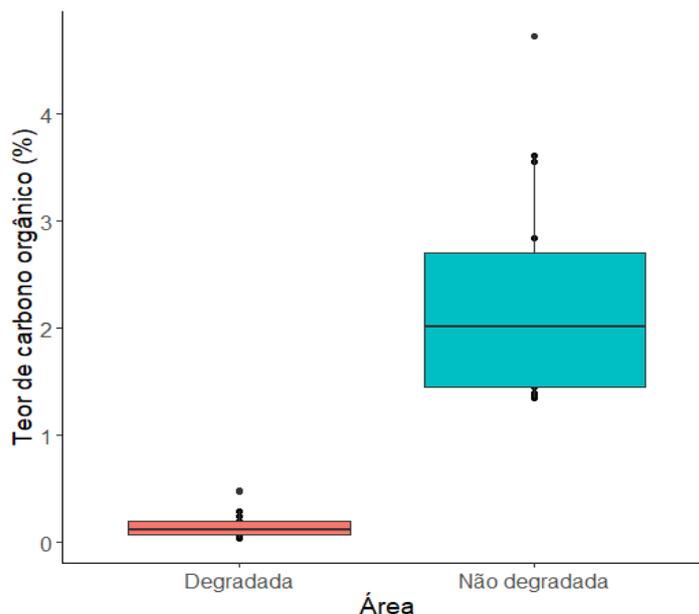


Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

A Figura 20 compara os percentuais de carbono das áreas degradadas (T01, T02 e T03) com as áreas não degradadas (T04 e T05) e evidencia diferença significativa ($p < 0,05$).

Figura 22 – Boxplot dos percentuais de carbono obtidos pelo fator de conversão de Nóbrega *et al.* (2015), por área, com relação à degradação ambiental, do manguezal do Rio Pacoti, CE.

Cada “caixa” corresponde aos dados observados por categoria (tratamento), para 1 m de profundidade. A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana. As linhas verticais representam os desvios-padrão.



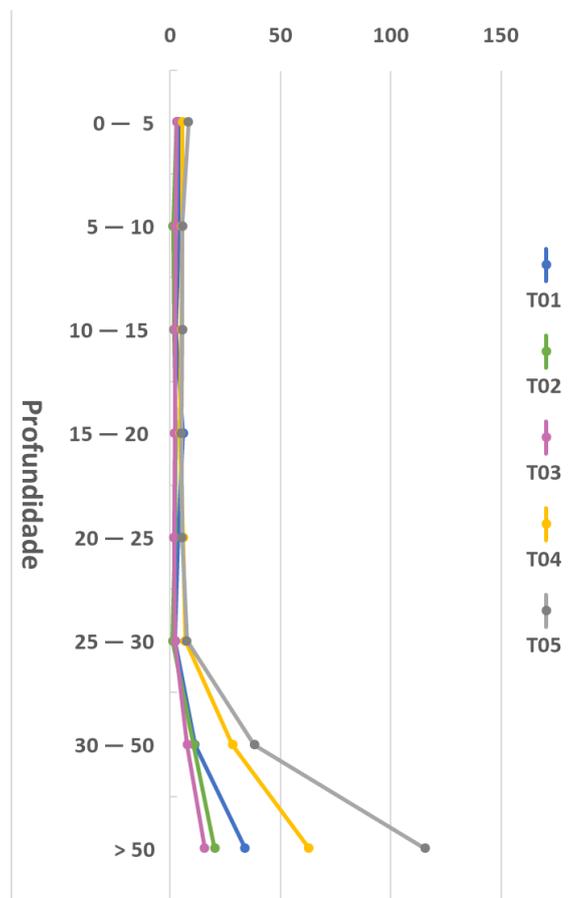
Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

5.4. Estoques de carbono orgânico do solo

5.4.1. Relação para manguezais do semiárido (Nóbrega *et al.*, 2015)

O gráfico da Figura 21 mostra os estoques de carbono orgânico por intervalo de profundidade estimados para cada testemunho coletado no manguezal do Pacoti, CE. Não houve variação estatisticamente significativa ao longo da coluna de solo amostrada ($p < 0,05$). No entanto houve diferença de estoques entre os testemunhos, considerando todas as profundidades (Figura 22). O testemunho T01 apresentou maiores estoques que T02 e T03 ($p < 0,05$). Esses últimos, por sua vez, tiveram os menores estoques de carbono orgânico da área de estudo ($p < 0,05$). Em contrapartida estimou-se, para T05, estoques significativamente maiores que todos os outros testemunhos ($p < 0,05$), com exceção do T04 ($p > 0,05$). Não houve diferença entre os estoques em T04 e T01 ($p > 0,05$).

Figura 23 – Estoques de carbono orgânico (Mg/ha) em 1 metro de profundidade no solo do manguezal do Rio Pacoti, CE, por intervalo de profundidade (cm). Valores obtidos pela relação de Nóbrega *et al.* (2015)

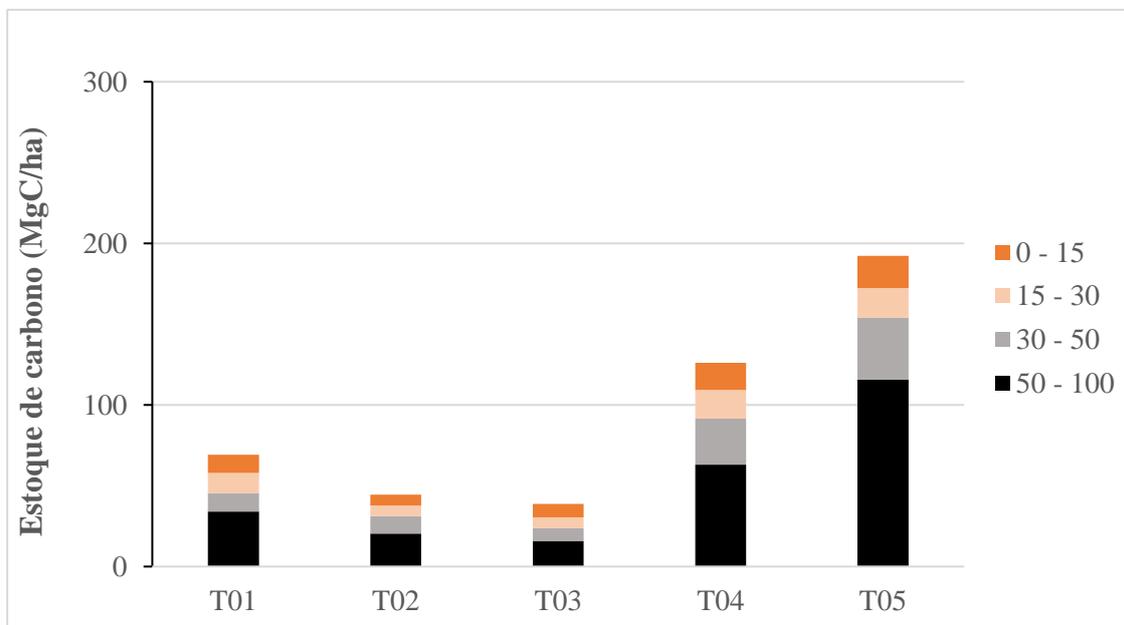


Os estoques de carbono médio, com desvios padrão, calculados para 1 m de profundidade foram de $69,27 \pm 11,2$ Mg/ha para T01; $44,46 \pm 12,6$ Mg/ha para T02; $38,73 \pm 0,9$ Mg/ha para T03; $126,16 \pm 45,8$ Mg/ha para T04 e $192,28 \pm 9,7$ Mg/ha para T05 (Figura 22). A média, com desvio padrão, de carbono orgânico nos testemunhos é de $94,18 \pm 63,3$ Mg C/ha para a área de estudo. A área preservada (T04 e T05) apresentou o maior estoque médio de carbono em 1 m de solo ($159,22 \pm 46,7$ Mg C/ha) e, para a área degradada (T01, T02 e T03), calculou-se o menor estoque médio ($50,82 \pm 16,2$ Mg C/ha) (Figura 23).

Considerando uma área total de aproximadamente 27,3 hectares, dos quais considera-se 2 ha sendo área de apicum, 4,42 ha de área em recuperação e 20,92 ha de área Preservada, calcula-se, para profundidade de 1 metro, um estoque de carbono orgânico de $3.235,81 \pm 64,85$ Mg para o solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. É

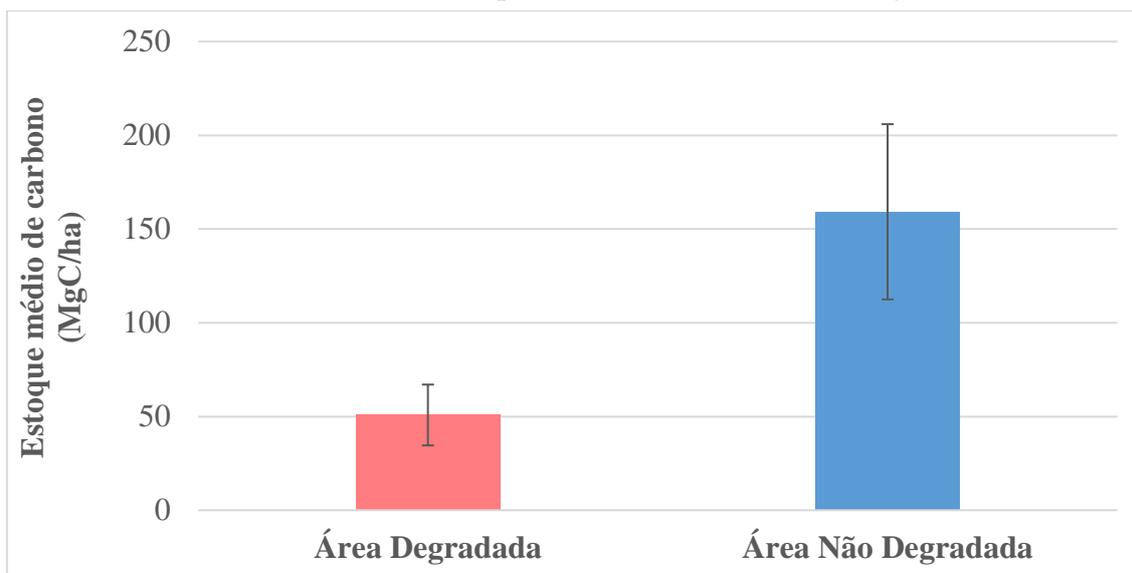
importante frisar que a área preservada tem cobertura multiespecífica, no entanto há predominância de *Rhizophora mangle*.

Figura 24 – Estoques de carbono orgânico, em Mg/ha, por testemunho (T01 a T05), obtidos pela relação de Nóbrega *et al.* (2015), em 1 metro de profundidade no solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada cor representa um intervalo de profundidade amostrado.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Figura 25 – Estoque médio de carbono (MgC/ha), com desvio padrão, das áreas degradada (T01, T02 e T03) e não degradada (T04 e T05) para a camada de 1m do solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. Valores calculados pelo fator de conversão de Nóbrega *et al.* (2015).

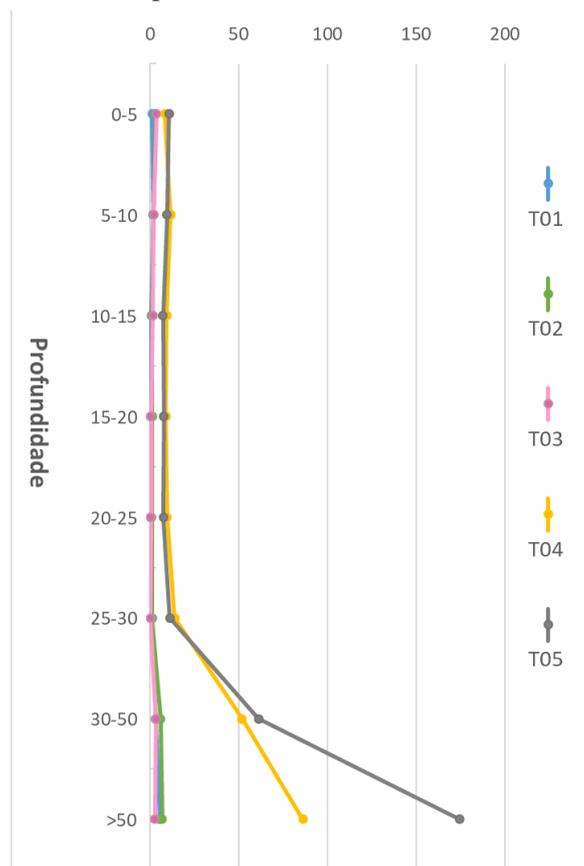


Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

5.4.2. Analisador elementar

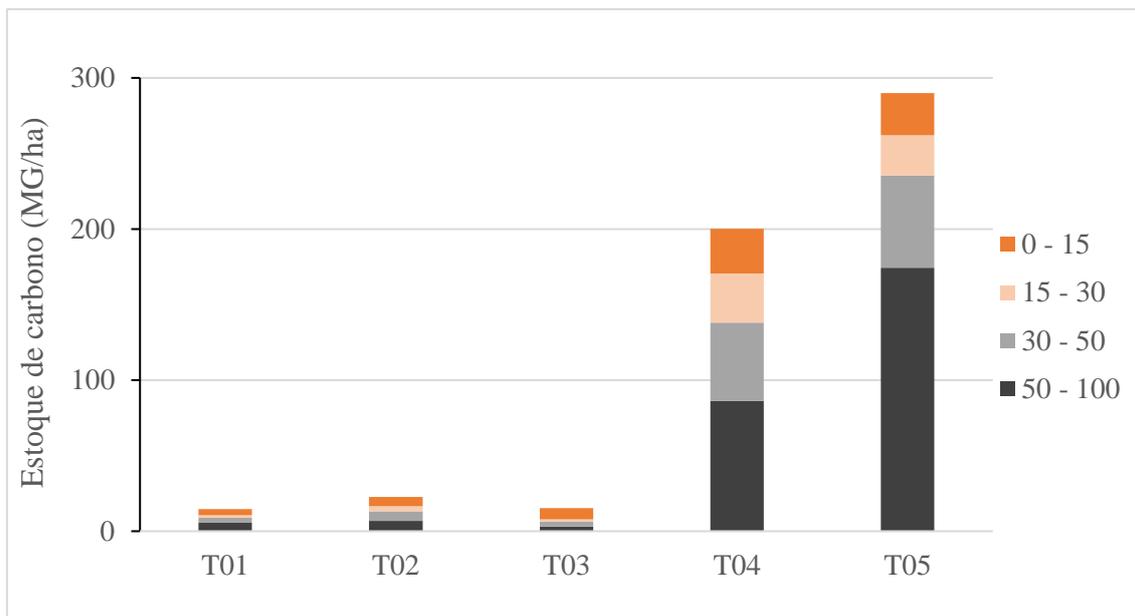
Os estoques de carbono orgânico calculados para cada intervalo de profundidade são exibidos na Figura 24. Para a coluna de 1 metro foram estimados estoques de 14,57 Mg/ha (T01); 22,76 Mg/ha (T02); 15,34 Mg/ha (T03); 200,23 Mg/ha (T04) e 290 Mg/ha (T05) (Figura 25). A média, com desvio padrão, dos estoques é de $108,58 \pm 128,66$ MgC/ha para a área de estudo. Houve variação significativa dos valores de estoque de carbono entre os testemunhos ($p < 0,05$) (Figura 25). Os testemunhos correspondentes à área não degradada de mangue de franja (T04 e T05) possuem estoques significativamente maiores que os testemunhos T01, T02 e T03 (área degradada) (Figura 26). Estes últimos não apresentaram diferenças significativas entre seus estoques ($p < 0,05$).

Figura 26 – Variação dos estoques de carbono orgânico (Mg/ha) em 1 m de profundidade, exibidos por intervalo de profundidade (cm), no manguezal do Rio Pacoti, CE. Valores obtidos pelo analisador elementar



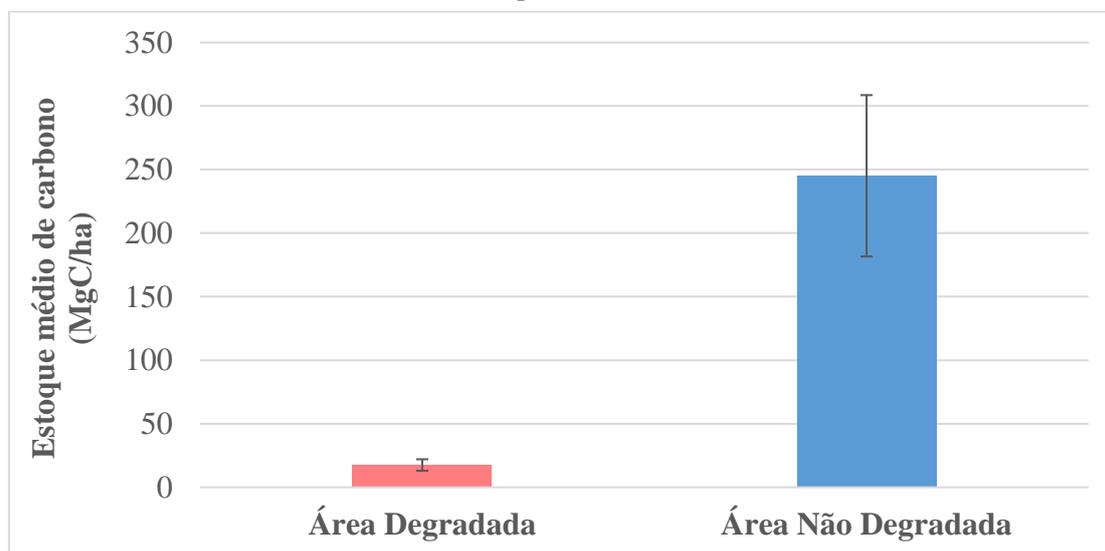
Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Figura 27 – Estoques de carbono orgânico, em Mg/ha, por testemunho (T01 a T05), obtidos pelo analisador elementar, em 1 metro de profundidade no solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. Cada cor representa um intervalo de profundidade amostrado.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Figura 28 – Estoque médio de carbono (MgC/ha), com desvio padrão, das áreas degradada (T01, T02 e T03) e não degradada (T04 e T05) para a camada de 1m do solo do manguezal do Rio Pacoti, CE. Valores calculados a partir dos resultados do analisador elementar.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Considerando uma área de aproximadamente 27,3 hectares no manguezal do Rio Pacoti, dos quais 2 ha correspondem a área de apicum degradado; 4,42 ha são referentes a área em recuperação e cerca de 20,92 ha são de mangue preservado, estima-se um estoque de carbono orgânico do solo de 5.240,54 Mg em 1 m de profundidade. Ao

considerar esse valor, calcula-se uma quantidade de CO₂ equivalente a 19.232,78 Mg. Esse valor representa a quantidade de CO₂ liberada para a atmosfera caso haja degradação do solo (camada de 1m) na área de estudo analisada.

Com o objetivo de extrapolar as estimativas de estoque não somente para a área de estudo, mas para toda a região estuarina do Pacoti, considerou-se uma área total de cobertura de mangue de 158 ha, considerando predominância de bosques de *Rhizophora* (SEMACE, 2010). Ao utilizar o estoque médio calculado para áreas não degradadas deste estudo (245,11 MgC/ha), na camada de 1 m do solo, obtém-se um valor de 40.149 Mg C (~ 0,04 Tg C). Para essa área estima-se um potencial de emissão de CO₂ equivalente a 147.348 Mg (~ 0,14 Tg¹ CO₂ e).

¹ Tg = 10⁶ Mg

6. DISCUSSÃO

6.1. Estoques de carbono e características do solo no manguezal do Rio Pacoti, CE

Os valores obtidos para densidade do solo nos diferentes tratamentos do manguezal do Rio Pacoti evidenciam a heterogeneidade espacial — seja por fatores abióticos e ecológicos, seja pelos impactos antropogênicos — desses ecossistemas. A área de Apicum (T01) e a área em Recuperação (T02 e T03) — ambas degradadas — apresentaram densidades do solo significativamente maiores que T05 (mangue de franja), o que pode ser resultado da conversão do solo do manguezal em salinas, décadas atrás. Sasmito *et al.* (2019), Eid *et al.* (2019) e Grellier *et al.* (2017) observaram, juntamente com a perda de estoque de carbono, o aumento de densidade do solo de manguezais ao longo dos primeiros 100 cm de profundidade em áreas impactadas. De modo parecido, Kauffman *et al.* (2018b) verificaram solos compactados (mais densos) em tanques de cultivo de camarão.

Para a área de apicum (*hypersaline tidal flat*) (T01) e para a área em Recuperação (T02 e T03) do manguezal do Rio Pacoti, há uma variação de 1,32 a 1,75 g/cm³ para a densidade do solo (média e desvio padrão de 1,60 ± 0,11 g/cm³). Kauffman *et al.* (2018b) obtiveram médias próximas para o solo de tanques de produção de camarão no estuário do Rio Acaraú, CE (1,50 ± 0,07 g/cm³; 1,47 ± 0,1 g/cm³). Em uma área de manguezal adjacente à tanques de carcinicultura o mesmo estudo de Kauffman *et al.* (2018b) mostra médias de densidade do solo de 0,86 ± 0,04 e 0,74 ± 0,07 g/cm³ para profundidades de 50 – 100 cm. Similarmente, para o manguezal do Rio Pacoti, calculou-se um valor de 0,81 g/cm³ na área de manguezal preservado (T05).

Ainda sobre a área submersa de mangue preservado (T05), destaca-se uma variação da densidade do solo de 0,73 g/cm³, na camada de 0 – 5 cm, para 1,23 g/cm³, na camada de 20 – 25 cm (Figura 12). Resultado similar foi documentado por Eid *et al.* (2020), em estudos na Arábia Saudita. Esse incremento é atribuído, pelos autores, ao acréscimo provocado pela biomassa morta (restos de raízes, folhas e rejeitos do mangue) e é associado a um aumento da concentração de carbono orgânico. No entanto, para este estudo, no manguezal do Rio Pacoti, observa-se uma diminuição do teor de carbono nessas profundidades (15 – 25 cm), para a área em questão (T05) (Figura 18). Discussões acerca dessa variação no percentual de carbono ao longo da coluna sedimentar serão retomadas adiante.

Juntamente com a compactação do solo por atividades humanas (pisoteio, por exemplo), menores frequências de inundação nessas áreas, principalmente na área de Apicum, podem estar atreladas aos altos valores de densidade do solo. Por outro lado, a área Preservada (T04 e T05), por encontrar-se adjacente ao Rio Pacoti, sofre frequentes inundações durante o ciclo de maré e fica saturada com água intersticial, o que, conseqüentemente, causa diminuição da densidade do solo (Cabral *et al.*, 2020).

Com relação aos percentuais de carbono orgânico (%C_{org}) obtidos pelo analisador elementar, verifica-se valores significativamente maiores na área submersa de mangue de franja (T05), quando comparado aos testemunhos das áreas impactada e em recuperação (T01, T02 e T03) ($p < 0,05$). Esse resultado representa um forte indicativo da eficiência das plantas de mangue na produtividade primária e na estocagem de carbono no solo de florestas maduras (Howard *et al.*, 2014; Kauffman *et al.*, 2018b; Sasmito *et al.*, 2019). Para os bosques maduros, a maior proporção de carbono é também atrelada à maior presença de biomassa vegetal morta.

Marchand *et al.* (2003), ao investigarem proporções de C:N para o sedimento de bosques de *Avicennia* jovens (tais como T02 e T03, coletados no Pacoti), associam as baixas concentrações de carbono a maiores taxas de decomposição da matéria orgânica pela presença de tapetes de algas e pela bioturbação, oriunda das tocas de caranguejo. Tais fatores também podem explicar os baixos teores de carbono na área em recuperação, uma vez que se constata a presença de tocas de *Uca sp* (chama-maré) e de tapetes de algas.

A proximidade com o rio e conseqüente inundação mais frequente na área de mangue de franja preservado (T04 e T05) também contribui para condições de anoxia do solo, suportando, portanto, um maior acúmulo de carbono orgânico, em comparação com os testemunhos das áreas menos inundadas (T01, T02 e T03).

Apesar de, estatisticamente, não haver diferença significativa da quantidade de carbono entre T04 e T05 (área mais elevada e área submersa do mangue de franja, respectivamente), constata-se, na camada de 1 m do solo, um estoque maior em T05 (290 MgC/ha) que em T04 (200 MgC/ha), considerando que ambas se encontram adjacentes. Esse resultado pode evidenciar a influência da topografia do perfil de maré (e conseqüente frequência de inundação a que essas áreas são submetidas) na estocagem de carbono e no desenvolvimento dos bosques.

Ainda sobre a influência da topografia, Schile *et al.* (2017), em estudos realizados nos Emirados Árabes, reportaram um crescimento significativamente maior, juntamente com maior acúmulo de carbono, em mangues estabelecidos em áreas menos elevadas no perfil de maré. No manguezal do Rio Pacoti observa-se característica semelhante, uma vez que se constata estoques de carbono maiores no solo de bosques localizados na área menos elevada (T05).

Além dos bosques de *Rhizophora mangle* estabelecidos e desenvolvidos, os maiores percentuais de silte e argila da área do mangue de franja submersa (T05) também contribuem para maiores concentrações de carbono no sedimento (Schile *et al.*, 2017; Matus, 2021; Wang *et al.*, 2021). Por outro lado, as menores concentrações de carbono no apicum e na área em recuperação podem estar relacionadas à pequenas proporções de silte e argila, indicando uma menor estabilidade do carbono orgânico em solos impactados, tal qual evidenciado por Wang *et al.* (2021) em estudos no estuário de Zhangjiang, na China. Para o manguezal do Pacoti, a diferença de percentual de sedimentos finos (silte e argila) é bem evidente quando os testemunhos T03 e T05 são comparados. Nas camadas abaixo de 50 cm, por exemplo, obteve-se um percentual de 4,7% para T03 e de 67% para T05, correspondentes à área em recuperação e à área submersa de mangue preservado, respectivamente (Figura 27).

Uma possível relação entre a granulometria e o acúmulo de carbono também pode ser feita para explicar menores concentrações nas camadas de 15–25 cm na área mais inundada do mangue de franja (T05). Nesse intervalo de profundidade observa-se os menores percentuais de silte e argila (aproximadamente 25%) associados a teores de 1,3 a 1,4% de carbono do testemunho coletado (Figura 27). Por outro lado, na camada de 50–100 cm, onde o teor de carbono é de 4,7%, o percentual de finos é de, aproximadamente, 50%.

A quantificação do impacto de atividades antrópicas fica explícita ao considerar o estoque médio referente aos testemunhos T01, T02 e T03, coletados nas áreas degradadas, e o estoque médio para T04 e T05, coletados na área de mangue preservado. A partir dessa comparação constata-se uma quantidade média de carbono cerca de 14 vezes maior na área de mangue de franja que nas áreas degradadas (apicum e área em recuperação).

Os testemunhos T02 e T03 — ambos da área em recuperação e compostos pela mesma espécie de mangue (*Avicennia germinans*) — não diferiram significativamente com relação à quantidade de carbono ($p > 0,05$). No entanto, T02, por possuir plantas mais desenvolvidas (estágio de sucessão ecológica mais avançado que em T03), por estar mais próxima do Rio Pacoti e por ser mais frequentemente inundada, pode apresentar um maior *input* e acúmulo de carbono em seu sedimento, através da biomassa morta soterrada (Eid *et al.*, 2020; Xiong *et al.*, 2018; Schile *et al.*, 2017; Alongi, 2014).

A maior densidade de plantas de mangue desenvolvidas em T02 também pode explicar o maior percentual de silte e argila calculado para a área, em comparação com a área com menor densidade de mangue adjacente (T03). Esses sedimentos são trazidos pelas correntes de maré que, ao interagirem com os caules e raízes das plantas, causam estagnação da água e permitem a flocculação das partículas mais finas (Furukawa *et al.*, 1997). Calcula-se que cerca de 80% dos sedimentos em suspensão, trazidos pelas marés, fica retido nos manguezais. Essa maior proporção de finos pode, portanto, atribuir maior estabilidade ao carbono e, como consequência, contribuir para uma maior estocagem (Matus 2021; Wang *et al.*, 2021; Furukawa *et al.*, 1997).

Ambos os testemunhos T02 e T03 demonstram, através de seus estoques de carbono (cerca de 14 vezes menores que os da área não degradada), que a área ainda não possui quantidades comparáveis com áreas de mangues maduros e preservados. Nessa porção do manguezal do Rio Pacoti, a elevada densidade do solo, a menor frequência de inundação, as altas salinidades e temperaturas do clima semiárido são perceptíveis como fatores de estresse para o estabelecimento e desenvolvimento das plantas de mangue (Schaeffer-Novelli *et al.*, 1990).

Devido à essas condições ambientais limitantes e tendo em vista que, primariamente e predominantemente, o incremento de carbono no solo se dá pela matéria orgânica produzida pelo manguezal (autóctone), não se observa aumento significativo dos estoques para os trechos impactados do estuário do Pacoti (apicum e área em recuperação) (kusumaningtyas *et al.*, 2019; Xiong *et al.*, 2018).

Lunstrum & Shen (2014), ao investigarem o acúmulo de carbono em florestas jovens, demonstram não haver diferença significativa entre áreas desprovidas de vegetação e bosques juvenis de mangue (6 anos de idade), com relação à concentração de carbono no solo. Por outro lado, florestas com 70 anos de idade apresentaram estoques

significativamente maiores em seu solo, o que evidencia, portanto, o tempo necessário para o restabelecimento dos estoques em áreas impactadas. Atentando para esse cenário, sugere-se que o monitoramento de longo prazo da área do Pacoti seja imprescindível para acompanhar a evolução dos estoques de carbono juntamente com o crescimento e expansão dos bosques de mangue.

6.2. Métodos de análise e estimativa de carbono

Discute-se, a seguir, as diferenças entre os resultados do analisador elementar (AE) e os obtidos pelo fator de conversão (FC) de Nóbrega *et al.* (2015). A partir do teste pareado de Wilcoxon para os dois métodos conclui-se que houve diferença significativa para todos os testemunhos ($p > 0,01$). Referente aos resultados obtidos por FC, observa-se uma superestimação de %C para a área de apicum (T01) e uma subestimação para as áreas de mangue preservado (T04 e T05) (Tabela 4).

Tal distinção é observada devido às diferentes amostragens entre o estudo de Nóbrega *et al.* (2015) e esta pesquisa, realizada no estuário do Rio Pacoti. Apesar de investigar o solo de manguezais de três estuários do Ceará, sob diferentes graus de impacto antrópico, as coletas foram feitas somente no solo de bosques dominados por *Rhizophora* spp., ao passo que, para o manguezal do Rio Pacoti, considerou-se áreas com diferentes graus de sucessão ecológica e com diferentes espécies de mangue.

Outro fator que pode explicar os diferentes resultados entre os métodos aplicados é a composição da matéria orgânica das áreas amostradas. Estudos evidenciam diferentes proporções de carbono no sedimento de bosques de *Avicennia* de diferentes idades, sendo menores em solos de bosques recém estabelecidos (Marchand *et al.*, 2003). Esse menor acúmulo, associado a maior disponibilidade de oxigênio pelas raízes e pela bioturbação provocada por caranguejos, também é demonstrado na área em recuperação do manguezal do Pacoti (T02 e T03). Dessa forma, o fator de conversão de Nóbrega *et al.* (2015), por não contemplar bosques de mangue jovens em seu estudo, superestima as concentrações de carbono para o sedimento dessa área, no Pacoti.

Com relação ao apicum, enquanto que para os resultados do fator de conversão (FC) houve uma variação de 0,28 a 0,73 no percentual de carbono ao longo da coluna sedimentar, os resultados do analisador elementar (AE) mostram um mínimo de 0,06% e

máximo de 0,24%. Já para a área de mangue de franja mais inundada (T05), na camada > 50 cm, o percentual de carbono é de 2,99 de acordo com o FC e de 4,73 de acordo com o AE (Tabela 4).

Conseqüentemente, para os valores de estoque de carbono na camada de 1 m do solo, o valor adquirido por AE foi 51% maior que o obtido pelo FC para a área de mangue de franja submersa (T05). Para o apicum (T01) o estoque foi cerca de 4,7 vezes menor ao ser calculado por AE. O estoque total estimado por AE (5.240,54 MgC), para toda a área, foi 1,4 vez maior que o calculado pelo FC (3.560,44 MgC). Essas estimativas sugerem cautela ao utilizar um fator de conversão para diferentes áreas, mesmo que localizadas no mesmo estado e sob mesmo regime climático.

Tais resultados evidenciam a importância da escolha do método a ser aplicado para estimar estoques de carbono no solo de manguezais. Ainda que a utilização do analisador elementar seja considerada a melhor escolha em termos de exatidão, o método da queima em mufla (semi-quantitativo) faz-se adequado para os objetivos da pesquisa, caso a utilização de um analisador elementar não seja possível (Kauffman & Donato, 2012; Howard *et al.*, 2014; Nóbrega *et al.*, 2015; Peñaranda *et al.*, 2019).

Tendo em consideração ainda os resultados obtidos pelo uso do FC, o estoque médio de carbono orgânico em 1 m de solo da área submersa do mangue de franja (T05) ($192,3 \pm 9,9$ Mg C/ha) foi similar ao estoque médio do solo de manguezais da região Amazônica (~ 160 Mg C/ha), considerando a mesma profundidade amostrada (Kauffman *et al.*, 2018a). Já o estoque médio estimado para T03 (área em Recuperação do Rio Pacoti com presença de mangue recém estabelecido) ($38,7 \pm 0,95$ Mg C/ha) pode ser comparado ao estoque de manguezais impactados por tanques de carcinicultura no estuário do Rio Acaraú, CE (Kauffman *et al.*, 2018b).

Tabela 4 – Valores de densidade (*bulk density*), concentração e estoques de carbono orgânico do solo do manguezal do Rio Pacoti, CE, separados por testemunho amostrado e por metodologia aplicada. (FC) – Resultados do fator de conversão de Nóbrega *et al.* (2015); (AE) – Analisador Elementar.

T01 (Apicum) Profundidade	Densidade Solo (g/cm ³)	% Corg		Estoque C (Mg/ha)	
		FC	AE	FC	AE
0 – 5	1.69	0.49	0.16	4.11	1.29
5 – 10	1.63	0.54	0.24	4.44	1.87
10 – 15	1.70	0.34	0.09	2.84	0.78
15 – 20	1.71	0.73	0.06	6.10	0.51
20 – 25	1.76	0.43	0.06	3.75	0.59

25 – 30	1.74	0.28	0.06	2.47	0.53
30 – 50	1.70	0.34	0.10	11.45	3.40
> 50	1.59	0.43	0.07	34.11	5.59
Total em 1m				69.27	14.57

T02 (Recuperação, avançada)	Densidade Solo (g/cm³)	% Corg		Estoque C (Mg/ha)	
		FC	AE	FC	AE
Profundidade					
0 – 5	1.45	0.45	0.48	3.12	3.19
5 – 10	1.46	0.22	0.28	1.61	1.99
10 – 15	1.54	0.27	0.14	2.01	0.99
15 – 20	1.58	0.34	0.16	2.61	1.22
20 – 25	1.53	0.32	0.14	2.38	1.04
25 – 30	1.69	0.18	0.16	1.45	1.25
30 – 50	1.49	0.36	0.20	10.84	6.13
> 50	1.52	0.27	0.09	20.44	6.93
Total em 1m				44.46	22.76

T03 (Recuperação/Estágio inicial)	Densidade Solo (g/cm³)	% Corg		Estoque C (Mg/ha)	
		FC	AE	FC	AE
Profundidade					
0 – 5	1.48	0.44	0.47	3.25	3.65
5 – 10	1.46	0.37	0.29	2.68	2.20
10 – 15	1.62	0.29	0.20	2.33	1.61
15 – 20	1.64	0.29	0.07	2.35	0.55
20 – 25	1.56	0.25	0.06	1.94	0.50
25 – 30	1.67	0.30	0.05	2.51	0.36
30 – 50	1.71	0.23	0.11	7.88	3.53
> 50	1.52	0.21	0.04	15.79	2.93
Total em 1m				38.72	15.34

T04 (Mangue de franja/ Elevado)	Densidade Solo (g/cm³)	% Corg		Estoque C (Mg/ha)	
		FC	AE	FC	AE
Profundidade					
0 – 5	1.19	0.97	1.45	5.75	8.50
5 – 10	1.27	0.89	1.93	5.63	11.67
10 – 15	1.31	0.93	1.72	5.49	9.39
15 – 20	1.42	0.67	1.36	4.63	8.97
20 – 25	1.24	1.09	1.89	6.10	9.67
25 – 30	1.13	1.34	2.84	7.07	13.98
30 – 50	1.16	1.32	2.66	28.40	51.81
> 50	1.27	1.01	1.45	63.09	86.24
Total em 1m				126.16	200.23

T05 (Mangue de franja/ Submerso)	Densidade Solo (g/cm³)	% Corg		Estoque C (Mg/ha)	
		FC	AE	FC	AE
Profundidade					
0 – 5	0.73	2.43	3.55	8.50	10.72
5 – 10	0.96	1.26	2.49	5.84	9.75
10 – 15	0.94	1.32	2.11	5.69	7.49
15 – 20	1.22	0.86	1.40	5.14	7.84
20 – 25	1.23	0.91	1.34	5.50	7.57
25 – 30	1.13	1.39	2.12	7.74	11.14
30 – 50	0.86	2.23	3.61	38.28	61.10
> 50	0.78	2.99	4.73	115.59	174.39
Total em 1m				192.28	290

Além de utilizar os resultados obtidos por analisador elementar e considerar o fator de conversão estabelecido por Nóbrega *et al.* (2015) para estimar as concentrações e estoques de carbono (método semi-quantitativo) do manguezal do Rio Pacoti, este estudo também utilizou a relação entre LOI (matéria orgânica queimada em mufla) e C_{org} obtida por Kauffman *et al.* (2011), com a finalidade de comparação metodológica e para escolha do melhor fator de conversão, com base nos resultados da análise elementar (Tabela 5).

Tabela 5 – Relações entre matéria orgânica e carbono orgânico utilizadas para cálculo dos estoques de carbono para o manguezal do Rio Pacoti, CE.

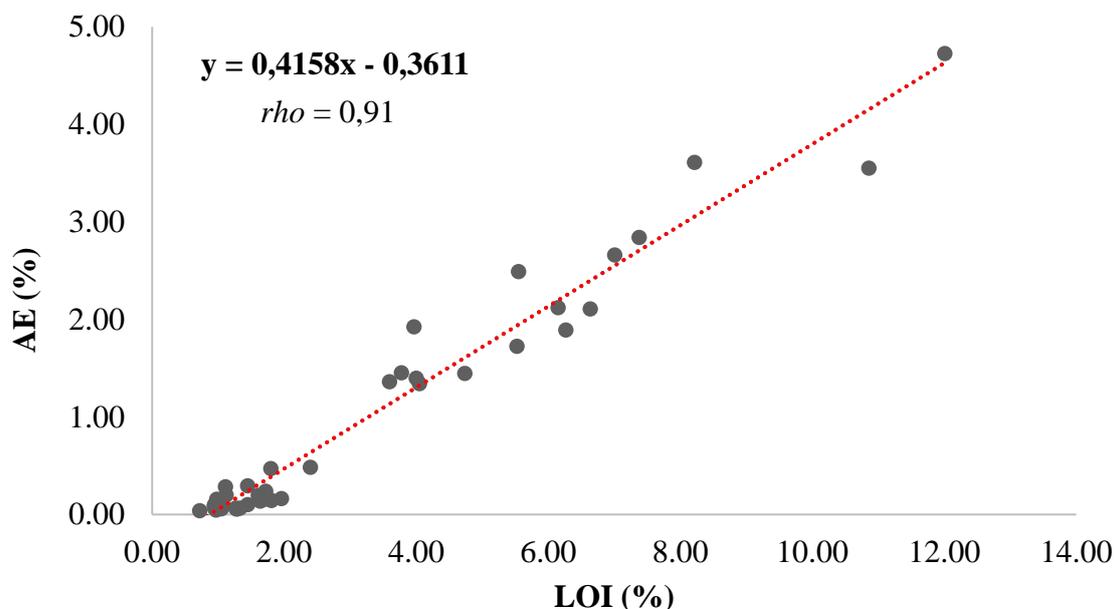
Referência	Relação entre % LOI e % Corg	Coefficiente de determinação (r^2)	Local	Clima
Kauffman <i>et al.</i> (2011)	% Corg = 0,415 * % LOI + 2,89	0,59	Palau (Pacífico ocidental)	Tropical
Nóbrega <i>et al.</i> (2015)	% Corg = 0,27 * % LOI	0,905	Ceará, Brasil	Tropical semiárido

Os estoques de carbono dos intervalos de profundidade amostrados diferiram significativamente entre as duas relações utilizadas para conversão de MO em C_{org} ($p < 0,05$). O estoque total de carbono do solo (1 m de profundidade) calculado com o fator de Kauffman *et al.* (2011) foi cerca de 6,3 vezes maior que a estimativa obtida pelo fator de Nóbrega *et al.* (2015). Tais resultados refletem as diferenças climáticas e ecossistêmicas entre as regiões para as quais foram estabelecidas as relações (Tabela 5). Além disso, novamente reforça-se o argumento de que as especificidades de cada área de manguezal requerem um fator de conversão, estabelecido a partir da comparação dos resultados da queima (LOI) com os da análise elementar.

Fundamentando-se nos resultados obtidos pelo analisador elementar para concentração de carbono foi possível estabelecer uma relação com os percentuais de matéria orgânica estimados pela queima em mufla (%LOI; método semi-quantitativo). O fator de conversão resultante é exibido no gráfico da figura 29 ($\%C_{org} = 0,41 * \%LOI - 0,36$), juntamente com o coeficiente de correlação de Spearman (ρ). A equação determinada pelo gráfico permite o uso de um fator de conversão (MO para C_{org}) mais adequado para estimativas de estoque de carbono do manguezal do Rio Pacoti,

considerando as especificidades climáticas e ecossistêmicas (fatores bióticos e abióticos) locais.

Figura 29 – Correlação entre matéria orgânica (LOI), obtida pela queima em mufla, e carbono orgânico obtido por análise elementar (AE). O coeficiente de correlação de Spearman (ρ) é exibido no gráfico.



Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

6.3. Contextualização regional e global

Ao considerar os resultados do analisador elementar (AE), obteve-se, para a área de mangue preservado (T04 e T05; $245 \pm 63,48$ MgC/ha), valor superior ao encontrado por Kauffman *et al.* (2018b) para uma área de mangue no estuário do Acaraú (CE), cujo estoque aproximado foi de 216 MgC/ha, também para a camada de 1 m (Tabela 6). Por outro lado, o estoque calculado para T02 (22,76 MgC/ha) é similar ao estimado para tanques de carcinicultura ($\sim 24,9$ MgC/ha) do mesmo estudo de Kauffman *et al.* (2018b), evidenciando a perda da capacidade de sequestro e acúmulo de carbono em áreas degradadas.

Com relação à conversão da área de mangue para a instalação de salinas no Pacoti, estima-se que houve uma liberação de cerca de 5.338,53 Mg CO₂ equivalente, o que corresponde a, aproximadamente, 836 Mg CO₂ e/ha. Emissão superior foi estimada por Kauffman *et al.* (2018b) (1390 Mg C/ha) ao investigar o impacto causado pela conversão

de áreas de mangue em tanques de carcinicultura. Essa diferença pode ser explicada pelo fato desse estudo considerar, também, os estoques de carbono na biomassa, ao passo que esta pesquisa no estuário do Pacoti investiga apenas o estoque no solo.

Tabela 6 – Estoques médios de carbono no solo (a 1m de profundidade) em áreas não degradadas de clima semiárido, comparados à média global.

Localização	Estoque de carbono Mg C/ha	Referência
Média global	283	Atwood <i>et al.</i> (2017)
Pacoti, CE, Brasil	245	Este estudo.
Acaraú, CE, Brasil	216	Kauffman <i>et al.</i> (2018b)
Mar Vermelho	292	Eid <i>et al.</i> (2019)
Oeste da África	278	Kauffman & Bhomia (2017)
Austrália	251	Serrano <i>et al.</i> , (2019)

Em comparação aos estoques de carbono orgânico do solo (a 1 m de profundidade) de manguezais do Oeste da África (278 ± 8 Mg C/ha) (Kauffman & Bhomia, 2017) e da Austrália (251 ± 155 Mg C/ha) (Serrano *et al.*, 2019), constata-se valores próximos para a área preservada do Rio Pacoti (T04 e T05; 200 MgC/ha e 290 MgC/ha, respectivamente) e que, a propósito, chegam a superar os estoques mencionados para o continente africano e para a Austrália. Tais regiões, assim com o manguezal do Rio Pacoti, são fortemente influenciadas pelo clima semiárido e pelo clima tropical, o que pode contribuir para a similaridade dos estoques de carbono.

Ainda em relação às similaridades climáticas, destaca-se o estudo de Eid *et al.* (2019) que, ao investigar estoques de carbono (a 1 m de profundidade) na costa do Mar Vermelho, sob clima semiárido, estima concentrações de 292 MgC/ha e de 20 MgC/ha para uma área de manguezal e para áreas de cultivo de camarão, respectivamente. Identicamente, para a área de mangue preservado e para a antiga área das salinas (atualmente área em recuperação) do Rio Pacoti, os estoques calculados por AE foram de 290 MgC/ha (T05) e 22 MgC/ha (T02), respectivamente. Ambas as áreas de estudo possuem regime de chuvas, temperaturas e salinidades análogos.

Considerando a camada de 1 m do solo, o estoque de carbono orgânico da área preservada do manguezal do Rio Pacoti, CE (290 Mg C/ha), calculado através de AE,

aproxima-se da média global, cujo valor estimado, com desvio padrão, é de 283 ± 193 Mg C/ha (Atwood *et al.*, 2017). Por outro lado, ao considerar a média para toda a área de estudo ($108,58 \pm 128,66$ MgC/ha), observa-se valor inferior à média global. Essa disparidade deve-se aos pequenos estoques presentes na área em recuperação e no apicium que, por sua vez, representam os trechos degradados e que, aos poucos, tendem a recuperar seu potencial de sequestro de carbono conforme observa-se o estabelecimento e desenvolvimento de coberturas vegetais (Sasmito *et al.*, 2019; Lunstrum & Shen, 2014).

6.4. Estoques de carbono no semiárido e mudanças climáticas

O crescente aumento da concentração de CO₂ na atmosfera — atingindo uma média anual de 410 ppm (IPCC, 2021) — e o consequente esforço da ciência para propor ações para reduzir emissões, bem como restaurar ambientes naturais visando o aumento do potencial de captura de carbono (*Carbon Dioxide Removal; CDR*), tem resultado em estimativas cada vez mais robustas acerca do sequestro e estocagem de carbono por ecossistemas terrestres, costeiros e marinhos. Para os manguezais, a maioria das estimativas de carbono azul documentadas é referente a regiões úmidas de climas tropicais e temperados e, portanto, constata-se uma carência de estudos em regiões áridas e semiáridas (Eid *et al.*, 2020; Kauffman *et al.*, 2018b; Schile *et al.*, 2017; Howard *et al.*, 2014).

Manguezais adaptados a essas regiões, em termos de biogeografia e ecologia, são notórios devido às condições climáticas extremas a que são submetidos (Eid *et al.*, 2020). Além de permitirem uma maior compreensão sobre os limites de tolerância das espécies vegetais e da dinâmica do carbono, pesquisas realizadas em manguezais de regiões semiáridas, tais como o manguezal do Rio Pacoti, permitem um indício dos cenários futuros diante das mudanças climáticas globais e das pressões antrópicas (Lacerda *et al.*, 2019).

Para os manguezais da região Nordeste do Brasil, estudos apontam como principais pressões decorrentes das mudanças climáticas a redução da quadra chuvosa anual, o aumento das temperaturas e o aumento do nível do mar (Lacerda *et al.*, 2019; Godoy & Lacerda, 2015). Com relação à área estudada, é difícil concluir se a recuperação ecossistêmica é mais fortemente influenciada pela desativação das salinas e abertura de canais nas barreiras dos tanques ou pela subida do nível do mar que, por sua vez,

possibilita o mangue a colonizar áreas em direção ao continente. Por esse motivo a preservação de apicuns é fundamental para que novas plantas possam avançar e se estabelecer.

Ao calcular concentrações de carbono ao longo da camada de 1 m do solo, esta pesquisa mostra que, mesmo décadas após a desativação das salinas, o impacto ainda é perceptível ao impedir o fluxo hídrico natural e, conseqüentemente, dificultar o desenvolvimento do mangue e acúmulo de carbono. Esse quadro alerta para as conseqüências — irreparáveis a curto prazo — das constantes pressões humanas nas regiões costeiras, seja pela expansão urbana, pela carcinicultura ou produção de sal. Ademais, esta pesquisa, ao estimar a emissão de CO₂ equivalente oriunda da conversão do manguezal para tanques de salinas (836 Mg CO₂e/ha) mostra que a degradação desses ecossistemas transforma esses ambientes em fontes substanciais de carbono para a atmosfera.

As emissões potenciais de CO₂ oriundas da conversão do solo de áreas de mangue, extrapoladas para todo o estuário do Rio Pacoti (~ 0,14 Tg CO₂e), quando comparadas à estimativa de emissão pelas atividades de geração, distribuição e consumo de energia da cidade de Fortaleza, CE no ano de 2020 (~ 0,19 Tg CO₂e; Prefeitura de Fortaleza, 2021) nos permitem ter uma noção da dimensão dos impactos antrópicos sobre esses ecossistemas.

As estimativas e análises realizadas para a área do estuário do Rio Pacoti revelam que o potencial de sequestro e acúmulo de carbono no solo desse ecossistema, mesmo sob condições ambientais extremas (e.g. salinidade, temperatura, fluxo hídrico, impactos antrópicos), pode ser comparado ao de regiões úmidas e com características mais favoráveis ao desenvolvimento do mangue — e.g. região amazônica (Kauffman *et al.*, 2018a). Esse potencial, juntamente com o valor intrínseco e os outros serviços ecossistêmicos, justificam a urgência de proteção eficaz não somente às áreas de florestas de mangue, mas também às áreas adjacentes e transitórias, tais como os apicuns.

No que diz respeito às leis de proteção ambientais, os apicuns não recebem a mesma atenção e reconhecimento de sua importância como as áreas com florestas de mangue, as quais são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP). Dessa forma, essas planícies hipersalinas, que influenciam e são diretamente influenciadas pelo manguezal, não são consideradas como parte desse ecossistema. Por conta dessa

interpretação, o novo Código Florestal do Brasil ainda permite uma ocupação de até 35% do território de apicuns dos estados (exceção para a região amazônica, cuja permissão é de até 10%) por tanques de produção de camarão e por salinas (Brasil, 2012). Essa regulamentação torna os apicuns extremamente vulneráveis aos impactos oriundos de atividades humanas (Albuquerque et al., 2014).

Além do reforço às leis de proteção desses ambientes, o estudo aponta para a necessidade de compreender a dinâmica e as peculiaridades ecossistêmicas de cada área amostrada para, em conjunto com estimativas de estoques de carbono, melhor conduzir projetos de recuperação/restauração de manguezais e apicuns. Dessa forma, compreender como as atividades humanas e as mudanças climáticas perturbam esses ambientes é indispensável para as tomadas de decisões com relação à proteção e preservação de manguezais para atuais e futuras gerações.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho consiste na primeira estimativa de estoque de carbono do solo realizada para o estuário do Rio Pacoti, no estado do Ceará. Além de investigar os impactos da conversão do solo em um manguezal do semiárido nordestino, apresenta-se, também, um fator de conversão da matéria orgânica em carbono orgânico específico para a área de estudo, o que permite estimativas de concentração de carbono por métodos semi quantitativos.

Os resultados desse estudo retratam a heterogeneidade espacial que manguezais apresentam com relação à dinâmica flúvio-marinha, às características do solo e à ecologia. Associado à essa heterogeneidade tem-se o impacto causado pela instalação de salinas décadas atrás na área de estudo. Tal mudança do uso do solo, por sua vez, é responsável por alterações nos padrões de circulação hídrica e impõe dificuldades para o estabelecimento de novas plantas de mangue.

A variação dos parâmetros no estuário do Pacoti é evidenciada pela diferença de densidade do solo, que é significativamente maior nas áreas de apicum e em recuperação, ambas degradadas; pelo teor de carbono, sendo maior nas áreas de bosques preservados e maduros; e, conseqüentemente, pelos estoques de carbono, que chegam a ter um valor 14 vezes maior no solo do mangue de franja (*Rhizophora mangle*), quando comparado ao solo das áreas impactadas.

A diferença entre as áreas preservadas e as áreas degradadas, quanto às concentrações e estoques de carbono, destacam a importância da hidrodinâmica e do grau de preservação e desenvolvimento do mangue no acúmulo de carbono no solo. Adicionalmente, os estoques da área preservada do Pacoti, por serem próximos aos estoques em manguezais da região amazônica (considerando a mesma profundidade amostrada) denotam a eficiência dos manguezais do semiárido em sequestrar carbono da atmosfera e em recolonizar áreas antes devastadas por atividades humanas, uma vez que as condições hidrodinâmicas sejam recuperadas.

Os estoques de carbono estimados para a área de apicum (*hypersaline tidal flats*), mesmo indicando pouco acúmulo, reforçam a necessidade de inclusão dessas áreas em inventários de carbono azul, assim como em projetos de recuperação e preservação ecossistêmica. Isso porque essas áreas são diretamente ligadas e influentes às florestas de mangue, e contribuem, assim, para a preservação da biodiversidade, servindo como uma

zona de amortecimento e de futura migração de cobertura de mangue perante o aumento do nível do mar. Além disso, são ambientes ameaçados pelas crescentes pressões antrópicas e consequentes devastações, pelo fato de não estarem sujeitos às mesmas leis que protegem florestas de mangue.

Este estudo reforça, ainda, a importância de estimar estoques de carbono à nível local como alternativa às extrapolações feitas para grandes áreas. Por meio da comparação realizada entre as metodologias aplicadas (semi-quantitativa e análise elementar) e das diferenças demonstradas, ficam evidentes as especificidades de cada manguezal. Dessa forma, sugere-se priorizar estimativas a partir de coletas de campo e utilizar fatores de conversão estabelecidos conforme as características ecossistêmicas e climáticas de cada área.

Os estoques e concentrações de carbono orgânico estimados para o manguezal do Pacoti fornecem importantes informações a respeito da estocagem de carbono no solo de manguezais impactados e que passam por processo de recuperação. Contudo, faz-se necessário, ainda, estimar os estoques de carbono na biomassa viva e morta (acima e abaixo do solo) e em maiores profundidades do solo, a fim de se permitir um cálculo do estoque de carbono total do ecossistema.

Como perspectivas de pesquisa aponta-se a necessidade de estimativas de carbono na biomassa de áreas preservadas e, principalmente, de áreas em processo de recuperação ecossistêmica, a fim de monitorar as taxas de sequestro de carbono à medida que espécies de mangue colonizam novas áreas.

Os resultados desta pesquisa podem auxiliar projetos de recuperação de manguezais, seja no estuário do Rio Pacoti ou em outras áreas do semiárido, ao identificar áreas com grande acúmulo de carbono (*hotspots*) e avaliar características do solo tais como a densidade e a granulometria. Tais parâmetros são necessários para selecionar áreas de plantio de mangue mais adequadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. G. B. M. et al. **Hypersaline tidal flats (apicum ecosystems): the weak link in the tropical wetlands chain**, *Environmental Reviews*, 22(2), 99–109, doi:10.1139/er-2013-0026, 2014.

ALONGI, D. M. **Carbon sequestration in mangrove forests**, *Carbon Management*, 3(3), 313–322, doi:10.4155/cmt,12,20, 2012.

ALONGI, D. M. (2002). **Present state and future of the world's mangrove forests**, *Environmental Conservation*, 29(03), doi:10.1017/s0376892902000231

ALONGI, D. M. (2014). **Carbon Cycling and Storage in Mangrove Forests**, *Annual Review of Marine Science*, 6(1), 195–219, doi:10.1146/annurev-marine-010213-135020

Atlas dos manguezais do Nordeste do Brasil: avaliação das áreas de manguezais dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar e outros, Fortaleza: SEMACE, 2006.

ATWOOD, T. B. et al. **Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses**, *Nature Climate Change*, 7(7), 523–528, doi:10.1038/nclimate3326, 2017.

BARBIER E. B. et al. **The value of estuarine and coastal ecosystem services**, *Ecological Monographs* 81: 169–193, 2011.

BRACHO, C. V. et al. **Facilitation in degraded mangrove ecosystems through herbaceous species in northeastern Brazil**, 2021. Submt.

BRASIL. 2012. **Medida provisória N°571, de 28 de maio de 2012, que altera a Lei N° 12.651, de 25 de maio de 2012**. Brasília, DF: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 28 maio 2012. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=node01o6e260uq6heo12757lfxr1y3c12499768.node0?codteor=1045331&filename=MPV+571/2012. Acesso em: 10 de maio de 2021.

BROWN, D. R. et al. **Hypersaline tidal flats as important “blue carbon” systems: a case study from three ecosystems**, *Biogeosciences*, 18, 2527–2538, <https://doi.org/10.5194/bg-18-2527-2021>, 2021.

CABRAL, R. L. et al. **How Do Plants and Climatic Conditions Control Soil Properties in Hypersaline Tidal Flats?** *Applied Sciences*, 10(21), 7624–. doi:10.3390/app10217624, 2020.

DINIZ, C. et al. **Brazilian Mangrove Status: Three Decades of Satellite Data Analysis**. *Remote Sensing*, 11(7), 808–. doi:10.3390/rs11070808, 2019.

DNH (2021), Tábuas de marés, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>, Acesso em 29/04/2021, às 19:22.

DONATO, D. C. et al. **Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics**, *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297, doi:10.1038/ngeo1123, 2011.

DUARTE, C. M. et al. **The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation**, *Nature Climate Change*, 3(11), 961–968, doi:10.1038/nclimate1970, 2013.

DUARTE, C. M.; MIDDELBURG, J. J.; CARACO, N. **Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle**, *Biogeosciences*, 2(1), 1–8, doi:10.5194/bg-2-1-2005, 2005.

DUKE, N. C.; BALL, M. C.; ELLISON, J. C. **Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves**, *Global Ecology and Biogeography*, Vol, 7, 27–47, 1998.

EID, E. M. et al. **Evaluation of carbon stock in the sediment of two mangrove species, *Avicennia marina* and *Rhizophora mucronata*, growing in the Farasan Islands, Saudi Arabia**. *Oceanologia*, S0078323419300958–. doi:10.1016/j.oceano.2019.12.001, 2020.

ESTRADA, G. C. D. et al. **Analysis of the structural variability of mangrove forests through the physiographic types approach**, *Aquatic Botany*, 111, 135–143, doi:10.1016/j.aquabot.2013.06.003, 2013.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007, **The world's mangroves 1980-2005**, FAO Forestry Paper, Rome.

FERREIRA, A. C. & LACERDA, L. D. **Degradation and conservation of Brazilian mangroves, status and perspectives**, *Ocean & Coastal Management*, 125, 38–46, doi:10.1016/j.ocecoaman.2016.03.011, 2016.

Ferreira, A. C. et al. **Mangrove restoration of an abandoned saltwork at neotropics (northeast brazil) and perspectives face to climate change**, 2021. No prelo.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 2021, Disponível em: <<http://www.funceme.br/app/calendario/produto/macrorregioes/media/anual>> Acesso em: 30 de abril de 2021.

FURUKAWA, K., et al. **Currents and Sediment Transport in Mangrove Forests**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Volume 44, Issue 3, Pages 301-310, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0120>, 1997.

GATTUSO J. P. et al. **Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems**. *Frontiers in Marine Science* 5:337, 2018

- GATTUSO, J. P. et al. **The Potential for Ocean-Based Climate Action: Negative Emissions Technologies and Beyond**. *Front. Clim.* 2:575716. doi: 10.3389/fclim.2020.575716, 2021.
- GIRI, C. et al. **Status and distribution of mangrove forests of the world using earthobservation satellite data**, *Global Ecology and Biogeography*, 20, 154–159, 2011.
- GODOY, M. D. P.; LACERDA, L. D. **Mangroves Response to Climate Change: A Review of Recent Findings on Mangrove Extension and Distribution**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87(2), 651–667. doi:10.1590/0001-3765201520150055, 2015.
- GRELLIER, S. et al. **Changes in soil characteristics and C dynamics after mangrove clearing (Vietnam)**. *Science of The Total Environment*, 593-594(), 654–663. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.204, 2017.
- HADLICH, G. M.; CELINO, J. J.; UCHA, J. M. **Diferenciação físico-química entre apicuns, manguezais e encostas na Baía de Todos os Santos, Nordeste do Brasil**, *UNESP, Geociências*, v, 29, n, 4, p, 633-641, 2010.
- HAMILTON, S. E. & CASEY, D. **Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21)**, *Global Ecology and Biogeography*, 25(6), 729–738, doi:10.1111/geb.12449, 2016.
- HAMILTON, S. E. & FRIESS, D. A. **Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012**. *Nature Climate Change*, (), –. doi:10.1038/s41558-018-0090-4, 2018.
- HERR, D. & LAFFOLEY, D. **Blue Carbon Policy Framework: Based on the discussion of the International Blue Carbon Policy Working Group, IUCN, Gland, Switzerland and Arlington, USA**, 2012.
- HORI, M.; BAYNE, C. J.; KUWAE, T. **Blue Carbon: Characteristics of the Ocean's Sequestration and Storage Ability of Carbon Dioxide**, *Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems*, 1–31, doi:10.1007/978-981-13-1295-3_1, 2018.
- HOWARD, J. et al. **Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses**, Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, Arlington, Virginia, USA, 2014.
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Atlas dos Manguezais do Brasil**. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018. 176 p. : il ISBN 978-85-61842-75-8
- IPCC, 2021: **Summary for Policymakers**. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A.

Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press. No prelo, 2021.

IPECE. **Caracterização Territorial - Características Geográficas, Recursos Naturais e Meio Ambiente** (Fortaleza, Ceará, Brasil), 2010.

KAUFFMAN, J. B. et al. **Ecosystem Carbon Stocks of Micronesian Mangrove Forests**, *Wetlands*, 31(2), 343–352, doi:10.1007/s13157-011-0148-9, 2011.

KAUFFMAN JB, BHOMIA RK. **Ecosystem carbon stocks of mangroves across broad environmental gradients in West-Central Africa: Global and regional comparisons**, *PLoS ONE* 12(11): e0187749, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187749>, 2017.

KAUFFMAN, J.B. & DONATO, D.C. **Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests**. Working Paper 86. CIFOR, Bogor, Indonesia. 2012.

KAUFFMAN, J. B. et al. **Carbon stocks of mangroves and salt marshes of the Amazon region, Brazil**, *Biol, Lett*, 14: 20180208, <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2018.0208>, 2018a.

KAUFFMAN, J. B. et al. **Shrimp ponds lead to massive loss of soil carbon and greenhouse gas emissions in northeastern Brazilian mangroves**, *Ecology and Evolution*, 8(11), 5530–5540, doi:10.1002/ece3.4079, 2018b.

KIDA, M. et al. **High salinity leads to accumulation of soil organic carbon in mangrove soil**, *Chemosphere*, 177, 51–55, doi:10.1016/j.chemosphere.2017.02.074, 2017.

KUSUMANINGTYAS, M. A. et al. **Variability in the organic carbon stocks, sources, and accumulation rates of Indonesian mangrove ecosystems**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, (), S0272771418304207–. doi:10.1016/j.ecss.2018.12.007, 2018.

LACERDA, L. D. et al. **Neotropical mangroves: Conservation and sustainable use in a scenario of global climate change**. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, (), aqc.3119–. doi:10.1002/aqc.3119, 2019.

LACERDA, L. D., MENEZES, M. O. T., MOLISANI, M. M. **Alteração na cobertura de manguezais ao longo do estuário do Rio Pacoti, CE, NE do Brasil devido a mudanças ambientais entre 1958 e 2004**. *Biota Neotrop*, vol. 7, no. 3 <http://www.biotaneotropica.org.br/v7n3/pt/abstract?article+bn00807032007>, ISSN 1676-0603, 2007.

LUNSTRUM, A., & CHEN, L. **Soil carbon stocks and accumulation in young mangrove forests**. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 223–232. doi:10.1016/j.soilbio.2014.04.008, 2014.

MAHER, D. T., SANTOS, I. R., GOLSBY-SMITH, L., GLEESON, J., & EYRE, B. D. **Groundwater-derived dissolved inorganic and organic carbon exports from a mangrove tidal creek: The missing mangrove carbon sink?** *Limnology and Oceanography*, 58(2), 475–488, doi:10.4319/lo.2013.58.2.0475, 2013.

MARCHAND, C.; LALLIER-VERGÈS, E.; BALTZER, F. **The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana.** , 56(1), 119–130. doi:10.1016/s0272-7714(02)00134-8, 2003.

MARINS, R. V. et al. **Caracterização hidroquímica, distribuição e especiação de mercúrio nos estuários dos rios Ceará e Pacoti, Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará, Brasil,** *Geochimica Brasiliensis* 16, 37e48, 2002.

MATUS, F. J. **Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis.** *Scientific Reports*, 11(1). doi:10.1038/s41598-021-84821-6, 2021.

MCLEOD, K. W. 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* 9:552–560, 2012, 2011.

NELLEMANN, C. et al. **Blue Carbon, A Rapid Response Assessment,** United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no, 2009.

NEHEMIA, A. et al. **Ecological impact of salt farming in mangroves on the habitat and food sources of *Austruca occidentalis* and *Littoraria subvittata*.** *Journal of Sea Research*, 146(), 24–32. doi:10.1016/j.seares.2019.01.004, 2019.

NGUYEN, H. T., et al. **The effects of stand-age and inundation on carbon accumulation in mangrove plantation soil in Namdinh, Northern Vietnam, Tropics,** 14(1), 21–37, doi:10.3759/tropics,14,21, 2004.

NÓBREGA, G. N. et al. **Evaluation of methods for quantifying organic carbon in mangrove soils from semi-arid region.** *Journal of Soils and Sediments*, 15(2), 282–291. doi:10.1007/s11368-014-1019-9, 2015.

NÓBREGA, G. N. et al. **Edaphic factors controlling summer (rainy season) greenhouse gas emissions (CO₂ and CH₄) from semiarid mangrove soils (NE-Brazil),** *Science of The Total Environment*, 542, 685–693, doi:10.1016/j.scitotenv,2015,10,108, 2016.

OUYANG, X., LEE, S. Y., & CONNOLLY, R. M. **The role of root decomposition in global mangrove and saltmarsh carbon budgets,** *Earth-Science Reviews*, 166, 53–63, doi:10.1016/j.earscirev,2017,01,004, 2017.

PELLEGRINI, J. A. C. **Caracterização da planície hipersalina (apicum) associada a um bosque de mangue em Guaratiba, Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro, RJ, 2000,** 101 p, Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PEÑARANDA, M. L. P., et al. **Carbon stocks in mangrove forests of the Colombian Pacific**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Volume 227. 106299, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106299>, 2019.

PENDLETON, L. et al. **Estimating Global “Blue Carbon” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems**. *PLoS ONE* 7(9): e43542. doi:10.1371/journal.pone.0043542, 2012.

PREFEITURA DE FORTALEZA. **4º Inventário de Emissões de Gases do Efeito Estufa**, 2021.

SANDERS, C. J. et al. **Are global mangrove carbon stocks driven by rainfall?** *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 121, 2600–2609, doi:10.1002/2016JG003510, 2016.

SASMITO, S. D. et al. **Effect of land-use and land-cover change on mangrove blue carbon: A systematic review**. *Global Change Biology*. doi:10.1111/gcb.14774, 2019.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. et al. **Variability of mangrove ecosystems along the Brazilian coast**. *Estuaries* 13, 204–218. <https://doi.org/10.2307/1351590>, 1990.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y., CINTRÓN-MOLERO; G., SOARES, M. L. G., DEROSA, T. **Brazilian mangroves**, *Aquatic Ecosystem Health and Management Society*, v, 3, n, 4, p, 561-570, 2000.

SCHILE, L. M., et al. **Limits on carbon sequestration in arid blue carbon ecosystems**. *Ecological Applications*, 27(3), 859–874. doi:10.1002/eap.1489, 2017.

SCHMIDT, A. J., BEMVENUTI, C. E., DIELE, K. **Sobre a definição da zona de apicum e sua importância ecológica para populações de caranguejo-uçá *Ucides cordatus* (Linnaeus, 1763)**, *Bol, Téc, Cient, CEPENE, Tamandaré - PE* - v, 19, n, 1, p, 9-25, 2013.

SOARES, M. L. G. et al. **Mangrove forests associated with salt flats: a case study from southeast Brazil**. *Brazilian Journal of Oceanography*, 65(2), 102–115. doi:10.1590/s1679-87592017083006502, 2017.

ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DO RIO PACOTI. Secretaria do Meio Ambiente do Ceará, 2010. Disponível em <<https://www.semace.ce.gov.br/2010/12/08/area-de-protecao-ambiental-do-rio-pacoti/>> Acesso em: 4 de março de 2022.

SERRANO, O., LOVELOCK, C. E. B., ATWOOD, T., MACREADIE, P. I., CANTO, R., PHINN, S., ... DUARTE, C. M. **Australian vegetated coastal ecosystems as global hotspots for climate change mitigation**, *Nature Communications*, 10(1), doi:10.1038/s41467-019-12176-8, 2019.

SHEN, C., ZHANG, C., XIN, P., KONG, J., & LI, L. **Salt dynamics in coastal marshes: Formation of hypersaline zones**, *Water Resources Research*, 54, <https://doi.org/10.1029/2017WR022021>, 2018.

SPALDING, M., M. KAINUMA, and L. COLLINS. **World atlas of mangroves**, London: Earthscan/James and James, 2010.

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*, 213(), 551–559. doi:10.1016/j.geoderma.2013.08.007, 2014.

TURNER, W. R., OPPENHEIMER, M., & WILCOVE, D. S. **A force to fight global warming**, *Nature*, 462(7271), 278–279, doi:10.1038/462278a, 2009.

UNFCCC. **The Paris Agreement**. (FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1). New York, NY: UNFCCC, 2015.

VALIELA, I., BOWEN, J. L., & YORK, J. K. **Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments**, *BioScience*, 51(10), 807, doi:10.1641/0006-3568(2001)051[0807:mfootw]2, 2001.

WANG, Q. et al. **Effect of land-use and land-cover change on mangrove soil carbon fraction and metal pollution risk in Zhangjiang Estuary, China**, *Science of The Total Environment*, Volume 807, Part 3, , 150973, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150973>, 2022.

WANG, Q. et al. **Coastal soil texture controls soil organic carbon distribution and storage of mangroves in China**. *CATENA*, 207, 105709. doi:10.1016/j.catena.2021.105709, 2021.

WYLIE, L., SUTTON-GRIER, A. E., & MOORE, A. **Keys to successful blue carbon projects: Lessons learned from global case studies**, *Marine Policy*, 65, 76–84, doi:10.1016/j.marpol.2015.12.020, 2016.

WORTHINGTON, T. & SPALDING, M. **Mangrove Restoration Potential: A global map highlighting a critical opportunity**. <https://doi.org/10.17863/CAM.39153>, 2018.

XIONG, Y., et al. **Mangrove vegetation enhances soil carbon storage primarily through in situ inputs rather than increasing allochthonous sediments**. *Marine Pollution Bulletin*, 131(), 378–385. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.04.043, 2018.