

Quantificação das emissões de gases de efeito estufa no incêndio do Parque Estadual do Cocó 2024 utilizando sensoriamento remoto

Quantification of greenhouse gas emissions from the 2024 wildfire in Cocó State Park using remote sensing

Perea-Ardila, Mauricio Alejandro (1)

Pertenencia institucional

(1) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

Correspondencia

mauricio.perea@alu.ufc.br

ORCID

Perea-Ardila
0000-0003-4561-0251

Resumen

Os manguezais urbanos constituem ecossistemas estratégicos de Carbono Azul, desempenhando papel relevante na mitigação das mudanças climáticas. No entanto, quando são perturbados por incêndios florestais, esses ambientes podem converter-se rapidamente de sumidouros em fontes de gases de efeito estufa (GEE). Este estudo teve como objetivo estimar as emissões de GEE associadas ao incêndio ocorrido em 2024 no Parque Estadual do Cocó (PEC), em Fortaleza. A metodologia integrou dados de sensoriamento remoto de alta resolução (PlanetScope, 3 m) para delimitação da área queimada e estratificação da severidade do fogo e com as equações propostas pelas diretrizes do IPCC. As emissões de CO₂, CH₄, N₂O, CO e NO_x foram calculadas a partir da área queimada, carga de biomassa, fatores de combustão e fatores de emissão específicos para bosques de manguezais e outras formações vegetais. Os resultados indicam que o incêndio resultou na liberação total de 507,5 t de CO₂, sendo a classe "Outra Vegetação" responsável por aproximadamente 60% das emissões, em função da elevada eficiência de combustão da biomassa seca. Em contraste, os manguezais apresentaram maior contribuição relativa de metano (CH₄), associada à combustão incompleta. A severidade moderada respondeu por cerca de 87% das emissões totais, evidenciando que a extensão da área queimada foi o principal fator de impacto climático. Conclui-se que a integração entre sensoriamento remoto de alta resolução e parâmetros biofísicos específicos é essencial para inventários precisos de GEE em ecossistemas costeiros urbanos, fornecendo subsídios técnicos para o manejo preventivo do fogo e a proteção dos estoques de Carbono Azul.

Palabras clave: Carbono azul; Severidade; Mudanças climáticas

Abstract

Urban mangroves constitute strategic Blue Carbon ecosystems, playing a relevant role in climate change mitigation. However, when disturbed by wildfires, these environments can rapidly shift from carbon sinks to sources of greenhouse gas (GHG) emissions. This study aimed to estimate GHG emissions associated with the 2024 fire event in Cocó State Park (PEC), Fortaleza, Brazil. The methodology integrated high-resolution remote sensing data (PlanetScope, 3 m) to delineate the burned area and stratify fire severity, combined with the equations proposed by the IPCC guidelines. Emissions of CO₂, CH₄, N₂O, CO, and NO_x were calculated based on burned area, biomass load, combustion factors, and emission factors specific to mangrove forests and other vegetation types. The results indicate that the fire resulted in a total release of 507.5 t of CO₂, with the "Other Vegetation" class accounting for approximately 60% of total emissions due to the high combustion efficiency of dry biomass. In contrast, mangrove areas exhibited a higher relative contribution of methane (CH₄), associated with incomplete combustion processes. Moderate fire severity accounted for approximately 87% of total emissions, highlighting that the spatial extent of burned areas was the primary driver of climatic impact. It is concluded that the integration of high-resolution remote sensing and ecosystem-specific biophysical parameters is essential for accurate GHG inventories in urban coastal ecosystems, providing robust technical support for preventive fire management and the protection of Blue Carbon stocks.

Key words: Blue carbon; Severity; Climate change

Quantificação das emissões de gases de efeito estufa no incêndio do Parque Estadual do Cocó 2024 utilizando sensoriamento remoto

Quantification of greenhouse gas emissions from the 2024 wildfire in Cocó State Park using remote sensing

Mauricio Alejandro Perea-Ardila

Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil,
mauricio.perea@alu.ufc.br

Resumo

Os manguezais urbanos constituem ecossistemas estratégicos de Carbono Azul, desempenhando papel relevante na mitigação das mudanças climáticas. No entanto, quando são perturbados por incêndios florestais, esses ambientes podem converter-se rapidamente de sumidouros em fontes de gases de efeito estufa (GEE). Este estudo teve como objetivo estimar as emissões de GEE associadas ao incêndio ocorrido em 2024 no Parque Estadual do Cocó (PEC), em Fortaleza. A metodologia integrou dados de sensoriamento remoto de alta resolução (PlanetScope, 3 m) para delimitação da área queimada e estratificação da severidade do fogo e com as equações propostas pelas diretrizes do IPCC. As emissões de CO₂, CH₄, N₂O, CO e NO_x foram calculadas a partir da área queimada, carga de biomassa, fatores de combustão e fatores de emissão específicos para bosques de manguezais e outras formações vegetais. Os resultados indicam que o incêndio resultou na liberação total de 507,5 t de CO₂, sendo a classe “Outra Vegetação” responsável por aproximadamente 60% das emissões, em função da elevada eficiência de combustão da biomassa seca. Em contraste, os manguezais apresentaram maior contribuição relativa de metano (CH₄), associada à combustão incompleta. A severidade moderada respondeu por cerca de 87% das emissões totais, evidenciando que a extensão da área queimada foi o principal fator de impacto climático. Conclui-se que a integração entre sensoriamento remoto de alta resolução e parâmetros biofísicos específicos é essencial para inventários precisos de GEE em ecossistemas costeiros urbanos, fornecendo subsídios técnicos para o manejo preventivo do fogo e a proteção dos estoques de Carbono Azul.

Palavras-chave: Carbono azul, Severidade, Mudanças climáticas

Abstract

Urban mangroves constitute strategic Blue Carbon ecosystems, playing a relevant role in climate change mitigation. However, when disturbed by wildfires, these environments can rapidly shift from carbon sinks to sources of greenhouse gas (GHG) emissions. This study aimed to estimate GHG emissions associated with the 2024 fire event in Cocó State Park (PEC), Fortaleza, Brazil. The methodology integrated high-resolution remote sensing data (PlanetScope, 3 m) to delineate the burned area and stratify fire severity, combined with the equations proposed by the IPCC guidelines. Emissions of CO₂, CH₄, N₂O, CO, and NO_x were calculated based on burned area, biomass load, combustion factors, and emission factors specific to mangrove forests and other vegetation types. The results indicate that the fire resulted in a total release of 507.5 t of CO₂, with the “Other Vegetation” class accounting for approximately 60% of total emissions due to the high combustion efficiency of dry biomass. In contrast, mangrove areas exhibited a higher relative contribution of methane (CH₄), associated with incomplete combustion processes. Moderate fire severity accounted for approximately 87% of total emissions, highlighting that the spatial extent of burned areas was the primary driver of climatic impact. It is concluded that the integration of high-resolution remote sensing and ecosystem-specific biophysical parameters is essential for accurate GHG inventories in urban coastal ecosystems, providing robust technical support for preventive fire management and the protection of Blue Carbon stocks.

Keywords: Blue carbon, Severity, Climate change.

INTRODUÇÃO

A mitigação das mudanças climáticas antropogênicas representa um dos desafios mais prementes do século XXI, exigindo uma compreensão detalhada dos ciclos biogeoquímicos globais e das fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) (McLeod et al., 2011). O consenso científico global, consolidado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), estabelece que a redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) é imperativa para limitar o aquecimento global a níveis seguros (IPCC, 2007). Neste cenário, os ecossistemas costeiros vegetados, particularmente os manguezais, desempenham um papel importante. Conhecidos como ecossistemas de "Carbono Azul", estas zonas úmidas sequestram carbono a taxas significativamente superiores às das florestas terrestres, armazenando-o em sedimentos profundos por milênios (Donato et al., 2011; Macreadie et al., 2019).

No entanto, a estabilidade desses estoques de carbono está sob ameaça. Quando perturbados por mudanças no uso do solo ou incêndios florestais, esses ecossistemas podem transitar de sumidouros eficientes para fontes significativas de emissões de GEE (Adame et al., 2021). A liberação de carbono armazenado na biomassa e no solo durante a combustão contribui diretamente para o forçamento radiativo da atmosfera, exacerbando o efeito estufa (Hamilton & Friess, 2018). Portanto, a quantificação precisa dessas emissões não é apenas uma questão de inventário acadêmico, mas uma necessidade política e ambiental para o cumprimento de acordos internacionais, como o Acordo de Paris (Soares et al., 2022).

Dada a vasta extensão e a difícil acessibilidade de muitas áreas protegidas, os métodos tradicionais de inventário de campo tornam-se logisticamente inviáveis para o monitoramento contínuo de incêndios (Chuvieco, 2008). O sensoriamento remoto orbital emergiu como a ferramenta metodológica padrão para a detecção, monitoramento e quantificação de distúrbios florestais em múltiplas escalas espaciais e temporais (Wooster et al., 2021). A evolução das plataformas orbitais permitiu uma transição de análises puramente visuais para abordagens quantitativas automatizadas, fundamentadas na física da radiometria óptica. A disponibilidade de bandas espectrais específicas, (por exemplo: NIR ou SWIR), é crucial para discriminar entre vegetação saudável, corpos d'água e cicatrizes de queimadas.

O comportamento espectral da vegetação queimada é caracterizado por uma queda drástica na reflectância do NIR (devido à destruição da estrutura celular das folhas) e um aumento na reflectância do SWIR (devido à perda de umidade e exposição do solo/cinzas) (Key & Benson, 2006). Para operacionalizar essa discriminação espectral, índices de vegetação e de queima foram desenvolvidos. Enquanto o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) tem sido amplamente utilizado para avaliar o vigor da vegetação e mudanças fenológicas, índices mais específicos como o Normalized Burn Ratio (NBR) demonstraram maior eficácia na detecção de áreas queimadas e na avaliação da severidade do fogo, pois exploram a sensibilidade das bandas SWIR aos materiais carbonizados (Silva & Beltrão, 2021).

A ecologia do fogo varia drasticamente entre biomas. Enquanto ecossistemas como o Cerrado brasileiro possuem adaptações evolutivas que lhes permitem conviver com regimes de fogo

periódicos, os ecossistemas de manguezal e florestas úmidas costeiras são sensíveis e independentes do fogo (Dookie et al., 2025; Hoffmann et al., 2020). Nestes ambientes, a vegetação não possui cascas espessas ou estruturas subterrâneas de rebrota rápida adaptadas a altas temperaturas. Consequentemente, mesmo incêndios de baixa intensidade ou superficiais podem resultar em alta mortalidade arbórea, alterando permanentemente a estrutura do ecossistema e sua capacidade de prestar serviços ambientais (Saoum & Sarkar, 2024).

A situação torna-se ainda mais complexa em Unidades de Conservação (UCs) inseridas em matrizes urbanas (Ramos et al., 2016). As pressões antrópicas, como a especulação imobiliária, o descarte irregular de resíduos e o vandalismo, aumentam exponencialmente a frequência de ignições (Do Carmo, 2020). Nessas áreas, o fogo deixa de ser um evento estocástico natural para se tornar um distúrbio crônico causado pelo homem. O fogo em UCs urbanas não apenas destrói a biodiversidade e libera GEE, mas também gera impactos diretos na saúde pública das populações vizinhas devido à fumaça e material particulado, além de comprometer o patrimônio paisagístico e econômico das cidades (Freitas et al., 2005; Torres et al., 2017).

O Parque Estadual do Cocó (PEC), localizado na Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará, exemplifica a tensão entre a conservação de ecossistemas frágeis e a expansão urbana (Freires et al., 2014). Abrangendo extensos manguezais, dunas e matas de tabuleiro, o PEC é um dos maiores parques urbanos da América Latina e atua como um regulador microclimático essencial para a cidade (Ferreira Lima Júnior et al., 2024). Contudo, o histórico de incêndios no PEC é alarmante. Dados pretéritos indicam centenas de ocorrências nas últimas décadas, concentradas predominantemente no segundo semestre do ano, período de menor precipitação e ventos fortes, o que favorece a propagação das chamas (Ferreira Filho & Costa Araújo, 2021).

Eventos recentes, como o incêndio ocorrido em janeiro de 2024, destacam a vulnerabilidade contínua do PEC. Embora áreas classificadas como "Zona de Preservação" (ZP) no Plano de Manejo devessem estar isentas de intervenção humana direta, evidências de sensoriamento remoto de alta resolução (como imagens PlanetScope) revelaram padrões geométricos de ignição e degradação que sugerem ação antrópica deliberada (Perea-Ardila & Muñoz, 2024). A recorrência desses eventos em zonas de manguezal levanta preocupações urgentes sobre a perda de estoques de carbono azul e a eficácia das medidas de proteção atuais (Beloto, 2025).

Apesar da abundância de estudos sobre detecção de áreas queimadas no Brasil (Pivello et al., 2021), existe uma lacuna significativa quando se trata de quantificar as emissões específicas de GEE em manguezais urbanos. A maioria dos inventários nacionais e estudos locais aplica fatores de emissão genéricos ou foca predominantemente em biomas terrestres como a Amazônia e o Cerrado (Sobreira et al., 2025). Portanto, é imperativo aplicar metodologias de cálculo propostas pelo IPCC, integrando dados de área queimada de alta precisão obtidos via satélite com coeficientes de biomassa e fatores de emissão ajustados para a realidade das zonas úmidas tropicais.

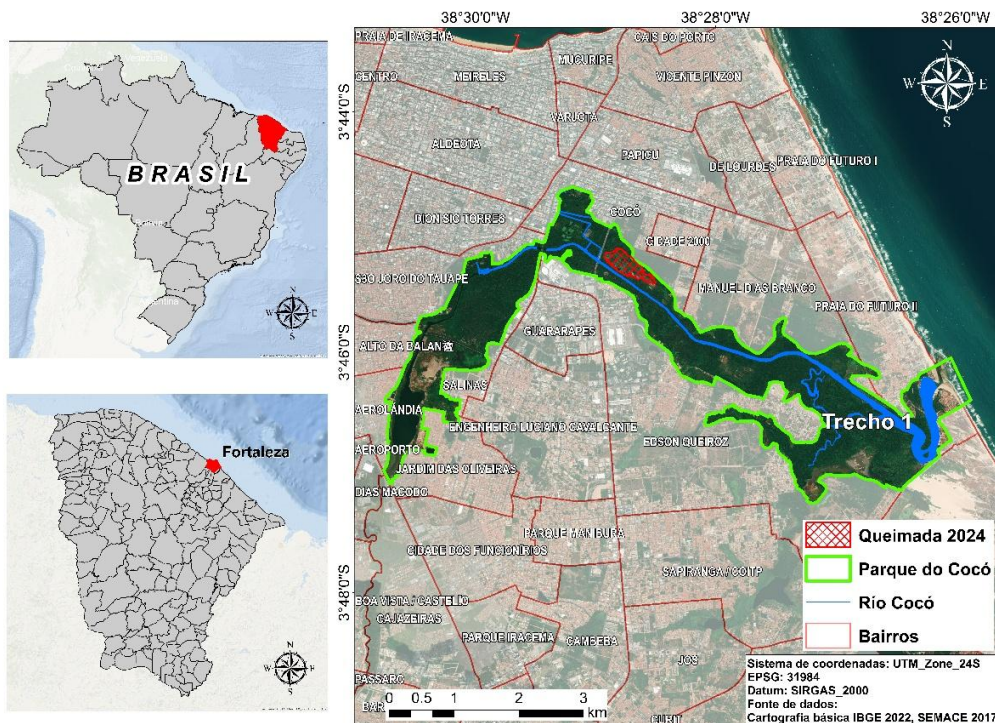
Diante do exposto, este estudo tem como objetivo principal estimar as emissões de GEE resultantes do incêndio florestal em 2024 no PEC. Especificamente, este trabalho visa quantificar a massa de GEE emitida, aplicando as equações das Diretrizes do IPCC com parâmetros de carga de combustível (M_B) e fatores de combustão (C_F) para o bioma de manguezal. Esta pesquisa busca fornecer subsídios técnicos robustos para a gestão do PEC, permitindo que gestores ambientais compreendam a magnitude climática dos incêndios locais e fortaleçam as estratégias de prevenção e combate ao fogo em zonas de preservação permanente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo concentra-se no Parque Estadual do Cocó (PEC), uma Unidade de Conservação (UC) de proteção integral localizada na cidade de Fortaleza, Brasi. O PEC protege um dos maiores ecossistemas de manguezal em área urbana da América Latina. O clima da região é tropical quente (Köppen Aw), com temperaturas médias de 26°C e precipitação média anual de 1.600 mm, concentrada entre fevereiro e maio (Pasquini, 2020). A vegetação predominante inclui manguezais (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Laguncularia racemosa*), matas de tabuleiro e áreas de dunas, ecossistemas que, embora não adaptados ao fogo, sofrem pressão constante de incêndios antropogênicos, especialmente durante a estação seca no segundo semestre (Moro, 2025).

Figura 1. Localização da área de estudo



Fonte da queimada: Perea-Ardila & Muñoz, (2024)

Avaliação de severidade e estratificação da vegetação

A caracterização da severidade do fogo foi integralmente baseada nos resultados de Perea-Ardila & Muñoz, (2024), que utilizaram imagens PlanetScope pré- e pós-fogo para delimitar a cicatriz e classificar a severidade em três níveis (baixa, moderada e alta). A partir desse produto vetorial de severidade, realizou-se neste estudo uma interpretação visual manual sobre imagens PlanetScope (3 m) para discriminar duas tipologias de cobertura vegetal: (i) Manguezal e (ii) Outra vegetação (estratos herbáceo-arbustivos, ambientes brejosos e campos salinos). Essa estratificação visual foi fundamentada em diferenças texturais, tonais e contextuais observáveis nas imagens de alta resolução, bem como no conhecimento prévio da distribuição fitofisionômica do PEC, conforme descrito por Pasquini (2020) e Moro (2025).

Estimativa de emissões de gases de efeito estufa

A quantificação das emissões de Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄) e Óxido Nitroso (N₂O) e Dióxido de nitrogênio (NO_x) foi realizada integrando dados de atividade espacialmente explícitos com fatores de emissão específicos por fitofisionomia. A metodologia seguiu as equações estabelecidas pelas Diretrizes do IPCC, (2019), conforme a Equação 1.

$$E_{fogo} = (A \times M_b \times C_f \times G_f) \times 10^{-3} \quad (1)$$

Onde: E_{fogo} : Emissão total do gás de efeito estufa específico (em toneladas); A: Área queimada (em hectares) para cada classe de severidade; M_b : Biomassa combustível disponível para combustão (em Mg/ha). Este parâmetro foi definido utilizando a média de biomassa estimada pelo produto global de Santoro & Cartus, (2021) para o ano de 2022, selecionando-se os pixels correspondentes às coordenadas do incêndio para cada tipo de vegetação; C_f : Fator de combustão (adimensional), que representa a fração da biomassa efetivamente consumida pelo fogo; G_{ef} : Fator de emissão (g.kg^{-1} de matéria seca), específico para cada gás e tipo de vegetação.

Os parâmetros de entrada utilizados no modelo, incluindo os fatores de combustão e emissão obtidos da literatura especializada no contexto de De Santis et al., (2010); IPCC, (2019); Vidal et al., (2017), estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de entrada para a quantificação das emissões de GEE

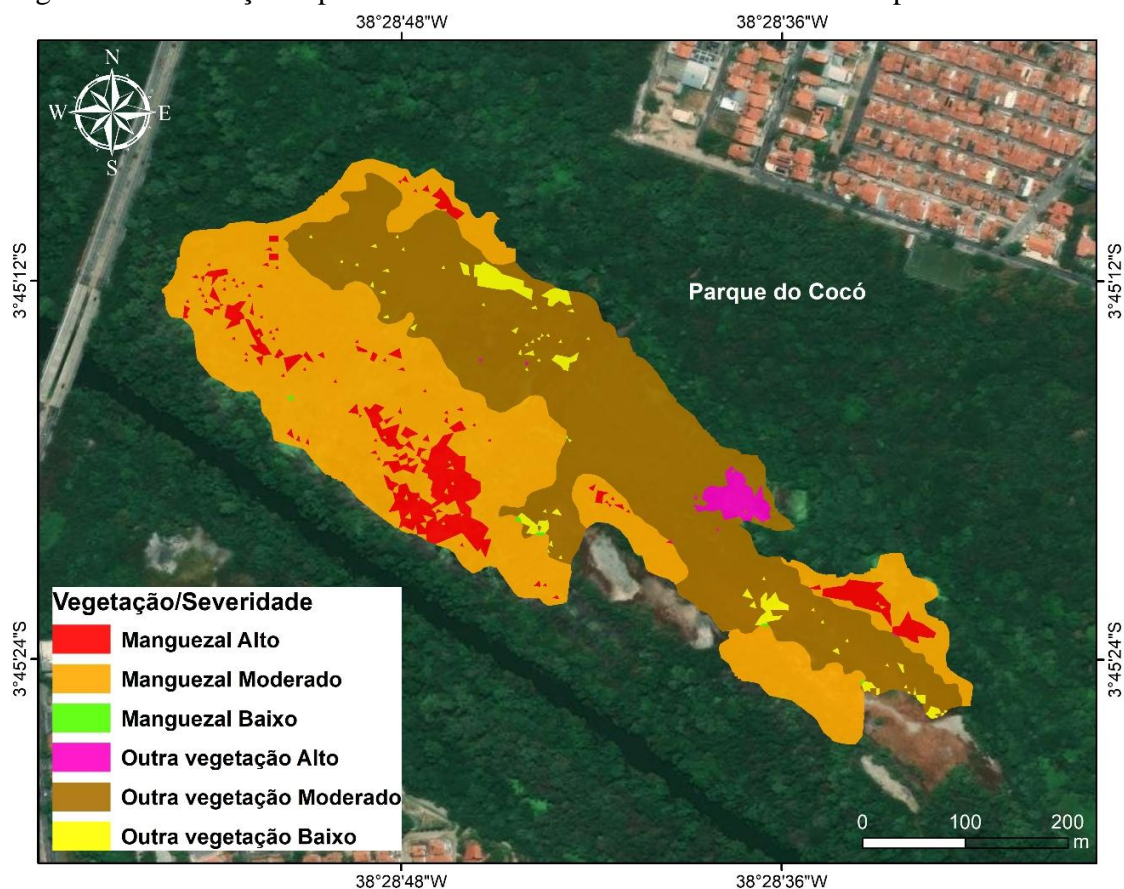
Severidad	A	M_b	C_f	G_{ef}				
				CO_2	CO	CH_4	N_2O	NO_x
Manglar – alta	1,08	30,7	0,50	1580 ± 90	104 ± 20	$6,8 \pm 2,0$	0,20	$1,6 \pm 0,7$
Manglar – moderada	8,08	34,4	0,40	1580 ± 90	104 ± 20	$6,8 \pm 2,0$	0,20	$1,6 \pm 0,7$
Manglar- baixa	0,01	-	0,25	1580 ± 90	104 ± 20	$6,8 \pm 2,0$	0,20	$1,6 \pm 0,7$
Otra vegetación – alta	0,21	36,7	0,98	1613 ± 95	65 ± 20	$2,3 \pm 0,9$	$0,21 \pm 0,10$	$3,9 \pm 2,4$
Otra vegetación – moderada	7,18	26,7	0,90	1613 ± 95	65 ± 20	$2,3 \pm 0,9$	$0,21 \pm 0,10$	$3,9 \pm 2,4$
Otra vegetación - baixa	0,31	32,5	0,93	1613 ± 95	65 ± 20	$2,3 \pm 0,9$	$0,21 \pm 0,10$	$3,9 \pm 2,4$

Onde, CO_2 : Dióxido de Carbono, CO: Monóxido de Carbono, CH_4 : Metano, N_2O : Óxido Nitroso, NO_x : dióxido de nitrogênio.

RESULTADOS

A espacialização dos danos, ilustrada na Figura 2, revela uma clara zoneamento da severidade condicionado pela cobertura vegetal. Observa-se que a matriz predominante da cicatriz é composta pela classe de severidade Moderada (representada em tons de laranja para o Manguezal e marrom para Outra Vegetação), que atua como o tecido conectivo de todo o polígono queimado. No entanto, a distribuição dos danos não é uniforme: nota-se a formação de núcleos de alta severidade (hotspots) bem definidos. No setor sudoeste e central, aglomerados da classe 'Manguezal Alto' (em vermelho) indicam zonas onde o fogo consumiu biomassas mais densas, possivelmente devido ao acúmulo de material lenhoso seco ou serapilheira. Em contraste, o setor norte/nordeste é dominado pela classe 'Outra Vegetação', onde a severidade moderada (marrom) prevalece, pontuada por fragmentos isolados de alta severidade (rosa). As áreas de baixa severidade (amarelo e verde claro) aparecem de forma periférica ou fragmentada, sugerindo zonas de transição onde o fogo perdeu intensidade ou encontrou barreiras de umidade.

Figura 2. Distribuição espacial das classes de severidade estratificadas por fitofisionomia



A quantificação final das emissões, apresentada na Tabela 2, indicam que o evento de incêndio resultou na liberação atmosférica total de 507,5 toneladas de CO₂. A análise estratificada revela uma dinâmica contrastante entre as tipologias vegetais, embora a classe 'Outra Vegetação' (herbáceas/arbustivas) tenha sido responsável pela maior parcela das emissões de dióxido de carbono (305,6 tCO₂, ou ~60% do total) devido à sua alta eficiência de combustão, o ecossistema de Manguezal apresentou um perfil emissor distinto, dominando a liberação de gases de combustão incompleta. Especificamente para o Metano (CH₄), o Manguezal emitiu mais que o dobro da vegetação adjacente (0,9 t contra 0,4 t), validando a influência dos fatores de emissão (G_{ef}) elevados para zonas úmidas, onde a queima ocorre frequentemente em fase de smoldering. Em termos de intensidade, a severidade 'Moderada' consolidou-se como o principal driver do impacto climático, respondendo por mais de 87% do CO₂ emitido em ambas as classes, o que demonstra que a extensão da área de queima moderada foi determinante para o inventário final de GEE.

Tabela 2. Estimativa total das emissões de gases de efeito estufa e poluentes

Severidade	tCO ₂	tCO	tCH ₄	tN ₂ O	tNO _x
Manglar – alta	26,2	1,7	0,1	0	0
Manglar – moderada	175,7	11,6	0,8	0	0,2

Severidade	tCO ²	tCO	tCH ₄	tN ₂ O	tNO _x
Manglar- baixa	0	0	0	0	0
Total manglar	201,9	13,3	0,9	0	0,2
Otra vegetación – alta	12,2	0,5	0	0	0
Otra vegetación – moderada	278,3	11,2	0,4	0	0,7
Otra vegetación - baixa	15,1	0,6	0	0	0
Total outra vegetación	305,6	12,3	0,4	0	0,7
Total general	507,5	25,6	1,3	0,1	0,9

Onde: CO₂: dióxido de carbono, CO: monóxido de carbono, CH₄: metano, N₂O: óxido nitroso.

DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo revelam uma assinatura de carbono do incêndio no PEC. Enquanto a classe Outra Vegetação (herbáceas e arbustos) dominou as emissões absolutas de CO₂ (~60% do total) devido à alta eficiência de combustão ($C_f > 0,90$), típica de combustíveis finos e secos (Urbanski, 2014), os manguezais apresentaram um comportamento geoquímico distinto. A emissão de metano (CH₄) nas áreas de mangue, apesar da menor eficiência de queima corrobora a literatura que aponta zonas úmidas como fontes significativas de GEE com alto Potencial de Aquecimento Global quando são perturbadas (Adame et al., 2021).

Este fenômeno é explicado pelas condições edáficas do manguezal. A saturação hídrica do solo e a densidade da biomassa lenhosa favorecem a combustão incompleta (*smoldering*), fase em que a oxidação do carbono é ineficiente, resultando em maior liberação de formas reduzidas de carbono como o CH₄ e o monóxido de carbono (CO) (IPCC, 2019; Wooster et al., 2021). Portanto, embora a queima do mangue pareça visualmente "menos intensa" ou mais lenta que a de um campo seco, seu impacto climático qualitativo é amplificado pela química da combustão incompleta.

A discrepância observada entre os fatores de combustão (C_f) do Manguezal (0,40–0,50) e da Outra Vegetação (0,90–0,98) demonstra o risco de se utilizarem estimativas generalistas em inventários de carbono. Estudos anteriores que aplicam coeficientes genéricos de "Floresta Tropical" ou "Cerrado" para toda a extensão de uma queimada (Sobreira et al., 2025), tendem a superestimar o consumo de biomassa em zonas úmidas ou subestimar as emissões de traços em zonas de transição. O uso de imagens PlanetScope (3 m) para a estratificação vetorial, conforme realizado por Perea-Ardila & Muñoz (2024), provou ser determinante. Se a área tivesse sido tratada como um bloco homogêneo de manguezal, a aplicação de um C_f conservador (0,50) para toda a cicatriz teria subestimado em cerca de 40% as emissões de CO₂ provenientes da vegetação herbácea, que queima quase integralmente. Essa abordagem híbrida valida a necessidade de integrar dados de atividade de alta resolução espacial com coeficientes biofísicos específicos para cada fitofisionomia em ambientes ecotonais complexos.

A ocorrência deste incêndio em uma "Zona de Preservação", conforme o zoneamento do PEC, evidencia a fragilidade dos estoques de Carbono Azul frente às pressões antrópicas urbanas. Embora os manguezais sejam reconhecidos como sumidouros de carbono superiores

às florestas terrestres (Donato et al., 2011; Macreadie et al., 2019), eventos de fogo transformam instantaneamente esse serviço ecossistêmico em um passivo ambiental. A liberação de 507,5 toneladas de CO₂ em um único evento de pequena/média escala (16,9 ha) alerta para o efeito cumulativo dos incêndios recorrentes reportados por Ferreira Filho & Costa Araújo (2021) no PEC. Além da perda atmosférica, a mortalidade da vegetação de mangue observada nas zonas de alta severidade compromete a capacidade futura de sequestro e a estabilidade dos sedimentos, podendo levar à erosão e à remobilização de carbono antigo armazenado no solo (Hamilton & Friess, 2018; Soares et al., 2022). A restauração destas áreas não é apenas uma questão de biodiversidade, mas uma estratégia climática imperativa para evitar que o PEC transite de um sumidouro ativo para uma fonte de emissões.

Os dados indicam que a severidade "Moderada" foi o principal driver das emissões (87% do total). Isso sugere que estratégias de manejo focadas na redução da carga de combustível seco nas zonas de transição (onde a "Outra Vegetação" atua como pavio para o manguezal) poderiam mitigar significativamente o impacto de futuros eventos. A metodologia aqui apresentada, alinhada às diretrizes do IPCC (2019) e apoiada por sensoriamento remoto oferece um protocolo replicável para que a gestão do parque monitore não apenas a área queimada, mas o "custo climático" de cada incêndio, integrando essas métricas aos relatórios de sustentabilidade e conservação do estado.

Embora a abordagem (PlanetScope) tenha refinado significativamente a detecção da área queimada, este estudo apresenta limitações inerentes à modelagem indireta via sensoriamento remoto. A principal incerteza reside na utilização de dados secundários para a carga de biomassa (M_b) e fatores de emissão (G_{ef}). A aplicação de valores globais (produto Santoro & Cartus, 2021) e coeficientes do IPCC para o bioma de manguezal pode não capturar as especificidades alométricas locais do PEC, potencialmente subestimando as emissões provenientes da combustão de subsuperfície (turfa/solo orgânico), que é crítica em zonas úmidas. Além disso, a ausência de validação de campo simultânea ao evento impediu a correlação direta entre o índice espectral (dNDVI) e a biomassa consumida in situ. Apesar dessas limitações, a abordagem fornece uma estimativa conservadora.

Para superar estas lacunas, estudos futuros devem priorizar, (i) a realização de inventários florestais para calibração de equações alométricas específicas e determinação precisa do estoque de carbono no solo do PEC; (ii) o monitoramento fenológico de longo prazo da área afetada, utilizando séries temporais para avaliar a taxa de regeneração natural versus a invasão por espécies exóticas ou gramíneas; e (iii) a aplicação de tecnologias LiDAR (Light Detection and Ranging) para modelar a estrutura vertical da floresta antes e depois de eventos de fogo, refinando o cálculo do volume de biomassa perdida. Esta continuidade é essencial para transitar de estimativas globais para um sistema de monitoramento de carbono de precisão e escala local.

CONCLUSÕES

Este estudo quantificou, a liberação de 507,5 toneladas de CO₂ resultantes do evento de incêndio de 2024. Os resultados evidenciam que a classe "Outra Vegetação" dominou as emissões absolutas de CO₂ (~60%) devido à alta eficiência de combustão da biomassa seca, o ecossistema de Manguezal consolidou-se como uma fonte de metano (CH₄), emitindo o dobro da vegetação adjacente. Isso confirma que a combustão incompleta, típica de solos saturados, amplifica o impacto climático do fogo em zonas úmidas, mesmo quando a severidade aparente é menor. A estratificação vetorial via imagens de alta resolução (PlanetScope) provou ser indispensável. A aplicação de fatores de emissão específicos do IPCC para cada fitofisionomia demonstrou que tratar a área queimada como homogênea resultaria em erros significativos de inventário. Conclui-se que a predominância da severidade "Moderada" (responsável por 87% das emissões) indica que o manejo preventivo nas zonas de transição ("Outra Vegetação") é a estratégia mais eficaz para blindar os estoques de Carbono Azul. Recomenda-se que o monitoramento espectral de emissões seja integrado às políticas permanentes do PEC, transformando o sensoriamento remoto em ferramenta de ação climática.

REFERÊNCIAS

- Adame, M. F., Connolly, R. M., Turschwell, M. P., Lovelock, C. E., Fatoyinbo, T., Lagomasino, D., Goldberg, L. A., Holdorf, J., Friess, D. A., Sasmito, S. D., Sanderman, J., Sievers, M., Buelow, C., Kauffman, J. B., Bryan-Brown, D., & Brown, C. J. (2021). Future carbon emissions from global mangrove forest loss. *Global Change Biology*, 27(12), 2856–2866. <https://doi.org/10.1111/gcb.15571>
- Beloto, N. (2025). *RELATÓRIO FINAL PROJETO Levantamento da estimativa de carbono perdido com o incêndio Julho/2024–Junho/2025*. <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2025/10/Anexo-V.pdf>
- Chuvieco, E. (2008). Earth Observation of Global Change: The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment. In *Earth Observation of Global Change*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6358-9_9
- Do Carmo, M. (2020). Antigas Salinas Urbanas e sua Oportunidade para promover Cidades Verdes: O Caso do Parque Estadual do rio Cocó em Fortaleza, Ceará, Brasil. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 129, 89. <https://doi.org/10.20868/ciur.2020.129.4407>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Dookie, S., Ansari, A. A., & Jaikishun, S. (2025). Forest-fire interactions, impacts, and implications: a focus on mangroves. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 55(4), 1–21. <https://doi.org/10.33494/nzjfs552025x405x>
- Ferreira Filho, J. E., & Costa Araújo, A. (2021). Análise de ocorrências de incêndios florestais na área do Parque Estadual do Cocó , região metropolitana de Fortaleza , CE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36(3), 563–569.

- Ferreira Lima Júnior, A., Ribeiro, I., & Humberto Amorim, J. (2024). PARQUES URBANOS E ILHAS DE FRESCOR: A importância do Parque do Cocó para o conforto térmico na cidade de Fortaleza/CE. *Geo UERJ*, 45, 1–26. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2024.80373>
- Freires, E. V., Gomes, D. D. M., Sabadia, J. A. B., Duarte, C. R., & Souto, M. V. S. (2014). Análise da evolução urbana no entorno do estuário do Rio Cocó – Fortaleza / Ceará nos anos de 1985, 1996 e 2007. *Geografia Ensino & Pesquisa*, 17(3), 153–174. <https://doi.org/10.5902/223649948141>
- Freitas, S. R., Longo, K. M., Diasb, M., Diasb, P. L. S., Chatfield, R., Prins, E., Artaxo, P., Grell, G. A., & Recuero, F. S. (2005). Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *ENVIRONMENTAL FLUID MECHANICS*, 5(1–2), 135–167. <https://doi.org/10.1007/s10652-005-0243-7> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Hamilton, S. E., & Friess, D. A. (2018). Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change*, 8(3), 240–244. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0090-4>
- Hoffmann, T. B., Dutra, A. C., Shimabukuro, Y. E., Arai, E., Godinho Cassol, H. L., Di Girolamo Neto, C., & Duarte, V. (2020). Fire Occurrence in the Brazilian Savanna Conservation Units and their Buffer Zones. *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4263–4266. <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324164>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2019). Generic methodologies applicable to multiple land-use categories. In E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, & S. Federici (Eds.), *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (pp. 1–96). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_GenericMethods.pdf
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods. In *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR*. <https://www.fs.usda.gov/research/treearch/24066>
- Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., ... Duarte, C. M. (2019). The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R. (2011). 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(10), 552–560.

<https://doi.org/10.1890/110004>

- Moro, M. F. (2025). *Fitossociologia do manguezal no trecho atingido por um incêndio no Parque Estadual do Cocó*. <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2025/10/Anexo-VII.pdf>
- Pasquini, B. (2020). *Plano de manejo do Parque Estadual do Cocó* (p. 625). https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2021/03/PMPC_01.pdf
- Perea-Ardila, M. A., & Muñoz, S. I. (2024). Caracterização de uma nova queimada utilizando sensoriamento remoto do Parque Estadual do Cocó , Região Metropolitana de Fortaleza/CE, Brasil. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 14(1), 858–869. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v14i1.261692>
- Pivello, V. R., Vieira, I., Christianini, A. V., Ribeiro, D. B., da Silva Menezes, L., Berlinck, C. N., Melo, F. P. L., Marengo, J. A., Tornquist, C. G., Tomas, W. M., & Overbeck, G. E. (2021). Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(3), 233–255. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005>
- Ramos, R. M., Fonseca, R. L., & Morello, T. F. (2016). Unidades de Conservação e Proteção contra Incêndios Florestais: Relação entre Focos de Calor e Ações Articuladas pelas Brigadas Contratadas. *Biodiversidade Brasileira*, 6(2), 135–148.
- Santoro, M., & Cartus, O. (2021). *ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the years 2010, 2017 and 2018*, v3. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. <http://dx.doi.org/10.5285/5f331c418e9f4935b8eb1b836f8a91b8>
- Saoum, M. R., & Sarkar, S. K. (2024). Monitoring mangrove forest change and its impacts on the environment. *Ecological Indicators*, 159, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111666>
- Silva, A. B. N. da, & Beltrão, N. E. S. (2021). Metodologias de sensoriamento remoto para análise de queimadas com base em índices espectrais e diagnóstico de severidade. *Ciência Geográfica*, 25(3), 968–982. https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/revista/anoXXV_3/agb_xxv_3_web/agb_xxv_3-10.pdf
- Soares, M. O., Bezerra, L. E. A., Copertino, M., Lopes, B. D., Barros, K. V. de S., Rocha-Barreira, C. A., Maia, R. C., Beloto, N., & Cotovicz, L. C. (2022). Blue Carbon Ecosystems in Brazil: Overview and an Urgent Call for Conservation and Restoration. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.797411>
- Sobreira, E., Lázaro, W. L., Vitorino, B. D., Frota, A. V. B., Young, C. E. F., Campos, D. V. de S., Viana, C. R. S., Oliveira, E. de, López-Ramírez, L., Souza, A. R., Silva, D. J. da, Ignotti, E., Hacon, S., Ignácio, Á. R. A., Muniz, C. C., & Filho, M. dos, J. A. (2025). Wildfires and their toll on Brazil : Who's counting the cost? *Perspectives in Ecology and Conservation*, 23, 214–217. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2025.06.003>
- Torres, F. T. P., Lima, G. S., Costa, A. das G., Félix, G. de A., & da Silva Júnior, M. R.

(2017). Perfil dos incêndios florestais em unidades de conservação brasileiras no período de 2008 a 2012. *Floresta*, 46(4), 531–541. <https://doi.org/10.5380/rf.v46i3.44199>

Urbanski, S. (2014). Forest Ecology and Management Wildland fire emissions , carbon , and climate : Emission factors. *Forest Ecology and Management*, 317, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.045>

Wooster, M. J., Roberts, G. J., Giglio, L., Roy, D., Freeborn, P., Boschetti, L., Justice, C., Ichoku, C., Schroeder, W., Davies, D., Smith, A., Setzer, A., Csiszar, I., Strydom, T., Frost, P., Zhang, T., Xu, W., de Jong, M., Johnston, J., ... San-Miguel, J. (2021). Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements. *Remote Sensing of Environment*, 267, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112694>