

## Análise de áreas queimadas utilizando imagens Sentinel-2 no Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza (Ceará)

Mauricio Alejandro Perea-Ardila<sup>1\*</sup>, Sebastián Isaias Muñoz<sup>2</sup>, Carlos Henrique Sopchaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doutorando em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Brasil. (\*mauricio.perea@alu.ufc.br)

<sup>2</sup>Doutorando em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

<sup>3</sup>Doutor Professor em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Brasil

*Histórico do Artigo:* Submetido em: 18/10/2023 – Revisado em: 20/11/2023 – Aceito em: 14/12/2023

### RESUMO

As unidades de conservação são espaços destinados à proteção dos recursos naturais no ambiente urbano. Apesar de sua importância, essas unidades sofrem constantes perturbações, principalmente por queimadas (incêndios), que trazem efeitos negativos à saúde do ecossistema e dos moradores próximos. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo analisar áreas queimadas por meio de imagens Sentinel-2 no Parque Estadual do Cocó (PEC), Região Metropolitana de Fortaleza. Foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto e índices espectrais (NBR e NDVI) derivados de imagens Sentinel-2, em período anterior e posterior a uma queimada no PEC em novembro de 2021. Foi obtida uma área queimada de 45,55 ha, localizada na parte oeste do PEC, e foi identificada uma diminuição na refletância da vegetação de 29,14%, bem como uma severidade moderada-alta e moderada-baixa para NBR e NDVI de 41,7% e 33,6% respectivamente da área queimada. Por outro lado, a série temporal mostrou uma mudança na cobertura vegetal para solo descoberto um ano após o evento, o que demonstrou a dinâmica da vegetação após a queimada. Esses resultados apresentam um precedente no uso do sensoriamento remoto para o estudo de áreas queimadas na região de Fortaleza, especificamente na área do PEC, o que poderia ser uma ferramenta de apoio aos tomadores de decisão na gestão, restauração de áreas com altos níveis de degradação e conservação do patrimônio ambiental do nordeste brasileiro.

**Palavras-Chaves:** Fogo. Incêndios florestais. Índices espectrais. Sensoriamento remoto. Séries temporais.

## Analysis burned areas using Sentinel-2 images in Cocó State Park, Metropolitan Region of Fortaleza (Ceará)

### ABSTRACT

Conservation units are areas created to safeguard natural resources in urban environments. Despite their importance, these units are constantly disturbed, mainly by burns (fires), which have negative effects on the health of the ecosystem and its population. In this context, this study aimed to analyze burned areas using Sentinel-2 images in the Cocó State Park (PEC), in the Metropolitan Region of Fortaleza. Remote sensing techniques and spectral indices (NBR and NDVI) were used to analyze the effects of a fire that occurred in the PEC in November 2021. The burned area was 45.55 ha, located in the western part of the PEC, and a decrease in vegetation reflectance of 29.14% was identified, as well as moderate-high and moderate-low severity for NBR and NDVI of 41.7% and 33.6% of the burned area respectively. However, the time series indicates that one year after the event, there was a change in vegetation cover to bare soil, showing the dynamics of post-burn vegetation. This result represents a precedent in the use of remote sensing to study burned areas in the Fortaleza region, particularly in the PEC area, which could be a tool to support decision-makers in the management, restoration of areas with high levels of degradation and conservation of the environmental heritage of northeastern Brazil.

**Keywords:** Fire. Wildfire. Spectral indices. Remote sensing. Time series.

Perea-Ardila, M.A., Muñoz, S.I., Sopchaki, C.H. (2023). Análise de áreas queimadas utilizando imagens Sentinel-2 no Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza (Ceará). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.4, n.3, p.67-83.



## 1. Introdução

O fogo é um fenômeno natural de perturbação dos ecossistemas e das comunidades, que pode ser usado tanto de forma positiva, por exemplo, para o gerenciamento de terras agrícolas, quanto de forma negativa, afetando a biodiversidade e os serviços de ecossistema (Bolaño-Díaz et al., 2022; Moritz et al., 2014). O risco de propagação descontrolada de incêndios florestais aumentou nos últimos anos devido a fatores decorrentes da mudança climática (UNEP, 2022). Prevê-se que a gravidade e a duração dos regimes de incêndios florestais podem aumentar globalmente até o final do século XXI (Tyukavina et al. 2022).

O Brasil é atualmente um dos países sul-americanos mais afetados por incêndios florestais. Estima-se que em 2019 ocorreram mais de 80 mil incêndios, queimando aproximadamente 906 mil hectares de terra em todo o território brasileiro (Wu et al., 2023). Nessa região, o fogo é utilizado para diversas finalidades, como manejo de pastagens, eliminação de resíduos, controle de pragas e limpeza de terras agrícolas (Marinho et al., 2021). Da mesma forma, os incêndios florestais no Brasil ocorrem em áreas prioritárias para conservação e interesse ecológico, ameaçando a integridade e o patrimônio natural do país (Lucas, et al., 2023).

As Unidades de Conservação (UCs) são um instrumento legal de conservação ambiental e protegem áreas naturais, que podem ser de caráter municipal, estadual ou federal, e que possuem características naturais relevantes para a conservação da diversidade biológica (SEMA, 2023). No entanto, vários tipos de perturbação, como incêndios florestais, são uma das principais fontes de degradação, o que compromete o objetivo de conservação dessas áreas (Morelli, Setzer, & Cristina, 2009).

O Parque Estadual do Cocó (PEC) é uma das maiores UCs urbanas do norte-nordeste do Brasil, sendo o mais importante parque urbano localizado na Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará (Queiroz & Garcez, 2021). O PEC é caracterizado por sua representatividade ecológica, pois dentro de seus limites preserva um grande complexo estuarino com a presença de manguezais, savanas ou cerrados costeiros, campos praianos de dunas, vegetação ripária aluvial e lacustre de tabuleiro, entre outros (Pasquini, 2020). Devido ao seu contexto geográfico, próximo a áreas urbanas, o PEC fica suscetível a incidentes predominantemente antropogênicos que não favorecem o estado do parque e colocam em risco sua conservação, contribuindo para o desmatamento e a ocorrência de incêndios florestais dentro e nos limites urbanos do PEC (Eufrásio, Filho, & Araújo, 2021).

Nesse sentido, o Sensoriamento Remoto torna-se a ferramenta fundamental para monitorar tais situações, pois fornece um meio de analisar as condições e monitorar as mudanças no solo e na vegetação antes e depois de um incêndio (Szpakowski & Jensen, 2019). Os incêndios podem ser monitorados e analisados em tempo hábil por meio do uso de imagens de satélite, o que permite a obtenção de informações necessárias para o planejamento e a recuperação das áreas afetadas (Sunar & Özkan, 2001). As imagens Sentinel-2 têm sido usadas para identificar áreas afetadas por incêndios e permitem a realização de uma análise com uma resolução de 10 m e com uma revisita ao mesmo ponto de menos de 5 dias fornecendo melhores informações para a avaliação da área queimada e tem sido intensamente usado para essa aplicação (Salvoldi et al., 2020).

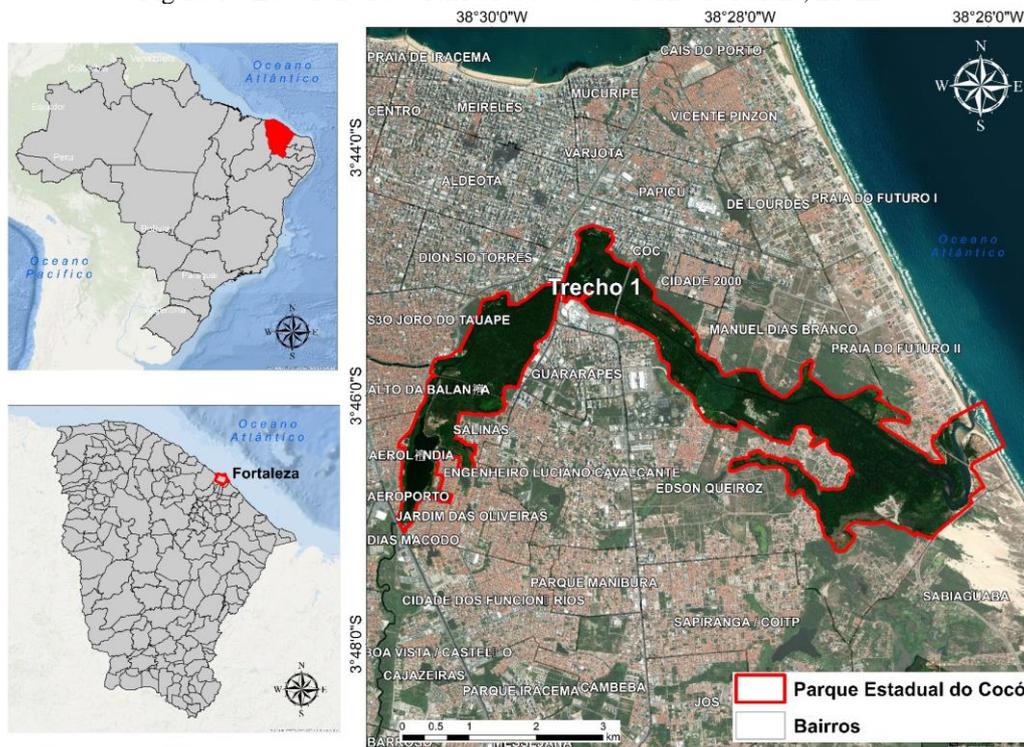
Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi o de analisar áreas queimadas utilizando imagens Sentinel-2 no Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza, (Ceará). Especificamente, pretendeu-se: I) utilizar imagens Sentinel-2 para a caracterização e delimitação de uma área queimada resultante do incêndio ocorrido em novembro de 2021, II) utilizar índices espectrais (NBR e NDVI) para determinar a severidade do incêndio e III) analisar a cicatriz pós-queimada por meio de uma série temporal (NDVI) e sua validação visual. Os resultados deste estudo fornecem um pano de fundo para o uso do sensoriamento remoto na análise de queimadas na região de Fortaleza, especificamente na área do PEC, representando parte do patrimônio natural do nordeste do Brasil.

## 2. Material e Métodos

### 2.1 Área do estudo

Para o estudo de caso, a área da pesquisa corresponde ao trecho 1 do Parque Estadual do Cocó (PEC), localizado a noroeste da cidade de Fortaleza, estado do Ceará, na República Federativa do Brasil (Figura 1). Tem uma área de 10,81 km<sup>2</sup> e está localizado entre as coordenadas geográficas 3° 44' 37,44" e 3° 47' 15,41" de latitude sul e entre 38° 30' 45,96 e 38° 25' 52,36 de longitude oeste. Seu clima é semiárido, com temperaturas médias de 26°C e precipitação média de 1.600 mm/ano (Branco, 2014). O PEC é caracterizado por sua localização na bacia do Rio Cocó, com a presença de planícies fluvio-marinhas e um grande complexo estuarino que suporta manguezais que desempenham funções ecológicas que regulam os ambientes da região costeira tropical (Pastrana, Gomes & Olivera, 2023; Sousa & Santos, 2016).

**Figura 1** - Localização do Trecho 1 do Parque Estadual do Cocó - Fortaleza, Brasil.  
 Figure 1 - Location of section 1 of Cocó State Park - Fortaleza, Brazil.



**Fonte:** Base cartográfica e limites administrativos (IBGE, 2022 & IDE-SIFIN, 2023)  
 Source: Cartographic base and administrative boundaries (IBGE, 2022 & IDE-SIFIN, 2023)

### 2.2 Identificação de queimadas

Em novembro de 2021, um incêndio florestal foi registrado no PEC. Para caracterizar esse evento, duas imagens do Sentinel-2 foram obtidas através do Copernicus Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Uma imagem pré-queimada no mês de outubro e a segunda imagem pós-queimada no mês de novembro (Tabela 1). Essas imagens foram acessadas no nível de processamento 1C, que incluiu correções radiométricas (refletância TOA) e geométricas.

Tabela 1 - Parâmetros técnicos das imagens do Sentinel-2.  
Table 1 - Technical parameters of Sentinel-2 images.

Atributo	Pré-queimada	Pós-queimada	
ID	S2A_MSIL1C_20211015T130251_N030_1_R095_T24MWA_20211015T144931	S2B_MSIL2A_20211119T130249_N0500_R095_T24MWA_20221229T192741	
Data	15/10/2021	19/11/2021	
Nuvens	35,59%	33,50%	
Ângulo solar	19,52°	24,18°	
Path/Row	24MWA		
EPSG	31984: SIRGAS 2000 UTM Zona 24S		
	<b>Nome de banda</b>	<b>longitude de onda (µm)</b>	<b>Resolução (m)</b>
	1 Spray costeiro	0,43-0,45	60
	2 Azul	0,45-0,52	10
	3 Verde	0,54-0,57	10
	4 Vermelho	0,65-0,68	10
	5 Borda vermelha 1	0,69-0,71	20
	6 Borda vermelha 2	0,73-0,74	20
	7 Borda vermelha 3	0,77-0,79	20
Banda	8 Infravermelho próximo (NIR) 1	0,78-0,90	10
	8A Infravermelho próximo (NIR) 2	0,85-0,87	20
	9 Vapor de água	0,93-0,95	60
	10 Cirrus	1,36-1,39	60
	11 SWIR 1	1,56-1,65	20
	12 SWIR 2	2,10-2,28	20

**Fonte:** Elaboração própria com base nos metadados do produto (2023)  
Source: Own elaboration based on product metadata (2023)

Para cada imagem, uma combinação de bandas espectrais foi usada para identificar visualmente os atributos do incêndio, usando cor verdadeira (RGB 4-3-2), cor infravermelha (RGB 8-4-3) e cor falsa (RGB 12-8-2). Uma amostra de 200 pontos aleatórios foi coletada no local do incêndio antes e depois da queimada para identificar as alterações na refletividade das características da paisagem e a assinatura espectral subsequente.

### 2.3 Índices espectrais

Foi usado o Índice de Área Queimada Normalizada (NBR) (Equação 1), um índice projetado para destacar de forma espectral as áreas queimadas e para facilitar a identificação de mudanças nos elementos da paisagem (García & Caselles, 1991). A equação é semelhante ao NDVI, mas combina o infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR). A banda SWIR foi redimensionada para ter uma resolução de 10 metros.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR 2}{NIR + SWIR 2} \quad (1)$$

Onde

NIR: Corresponde à banda do infravermelho próximo [banda 8].

SWIR2: Corresponde à banda infravermelho de ondas médias [banda 12].

Foi utilizado também o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Equação 2). É um indicador do verde, da densidade e da saúde da vegetação (Rouse et al. 1974). Ele foi usado para visualizar as mudanças na vegetação antes e depois da queimada. O NDVI relaciona as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho, podendo obter valores entre -1 e +1, sendo que aqueles mais próximos de +1 indicam áreas vegetadas (Fatemi & Narangifard, 2019).

$$NDVI = \frac{NIR - Vermelho}{NIR + Vermelho} \quad (2)$$

Onde

NIR: Corresponde a banda do infravermelho próximo [banda 8].

Vermelho: Corresponde a banda vermelha [banda 4].

## 2.4 Severidade de queimadas

Além disso, foi determinada a gravidade do fogo, que consistiu em determinar a magnitude dos impactos do fogo na vegetação após um incêndio (Keeley, 2009). Para isso, o Delta NBR (dNBR) e o Delta NDVI (dNDVI) foram determinados (Equações 3 e 4) e calculados a partir da diferença entre os índices calculados para antes e depois da queimada (Gómez-Sánchez *et al.*, 2017; Suarez & Medina, 2022).

$$dNBR = NBR_{pré} - NBR_{pós} \quad (3)$$

$$dNDVI = NDVI_{pré} - NDVI_{pós} \quad (4)$$

Onde:

NBR<sub>pré</sub>: NBR calculado para a imagem antes da queimada.

NBR<sub>pós</sub>: NBR calculado para a imagem depois da queimada.

NDVI<sub>pré</sub>: NDVI calculado para a imagem antes da queimada.

NDVI<sub>pós</sub>: NDVI calculado para a imagem depois da queimada.

A severidade do fogo foi classificada de acordo com os valores delta dos índices (Tabela 2). Para o dNBR e o dNDVI, o índice foi classificado de acordo com os intervalos estabelecidos por Key & Benson (2006) e Montorio et al., (2013). Por fim, o software ArcGIS 10.8 foi usado para representar as informações e analisar as informações geográficas.

Tabela 2 – Classificação de severidade do incêndio  
Table 2 - Fire severity classification

Severidade NBR	Intervalo de dNBR
Sem queimada	-0.100 - +0.099

Baixo	+0.100 - +0.269
Moderada-baixa	+0.270 - +0.439
Moderada-alta	+0.440 - +0.659
Alta	+0.660 - +1.300

**Fonte:** Intervalos estabelecidos por (Key & Benson, 2006)  
 Source: Ranges established by (Key & Benson, 2006)

### 2.5 Análise de a cicatriz pós-queimada

Para esse processo, foi programado um script usando o Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), que consistiu em uma série temporal de medições de NDVI da área afetada com imagens Sentinel-2 com um máximo de 30% de cobertura de nuvens, desde a data da queimada em novembro de 2021 e pós-queimada até dezembro de 2022. A fim de entender a dinâmica da cicatrização versus a ausência da vegetação no local. Esse processo permitiu detalhar visualmente as mudanças registradas em cada imagem pós-queimada disponível.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1 Identificação de queimadas

Primeiramente, foi identificado que o evento da queimada, estava localizado na parte oeste do PEC, indicado com a cor amarelo na Figura 2, que fica próximo aos bairros: Salinas, Aerolândia e Alto da Balança. As duas cicatrizes tinham uma área de 45,55 ha ( $45,3 \pm 0,26$ ) com uma cicatriz grande e uma cicatriz menor tamanho.

**Figura 2 - Identificação das áreas queimadas no PEC**  
 Figure 2 - Identification of burned areas in the PEC



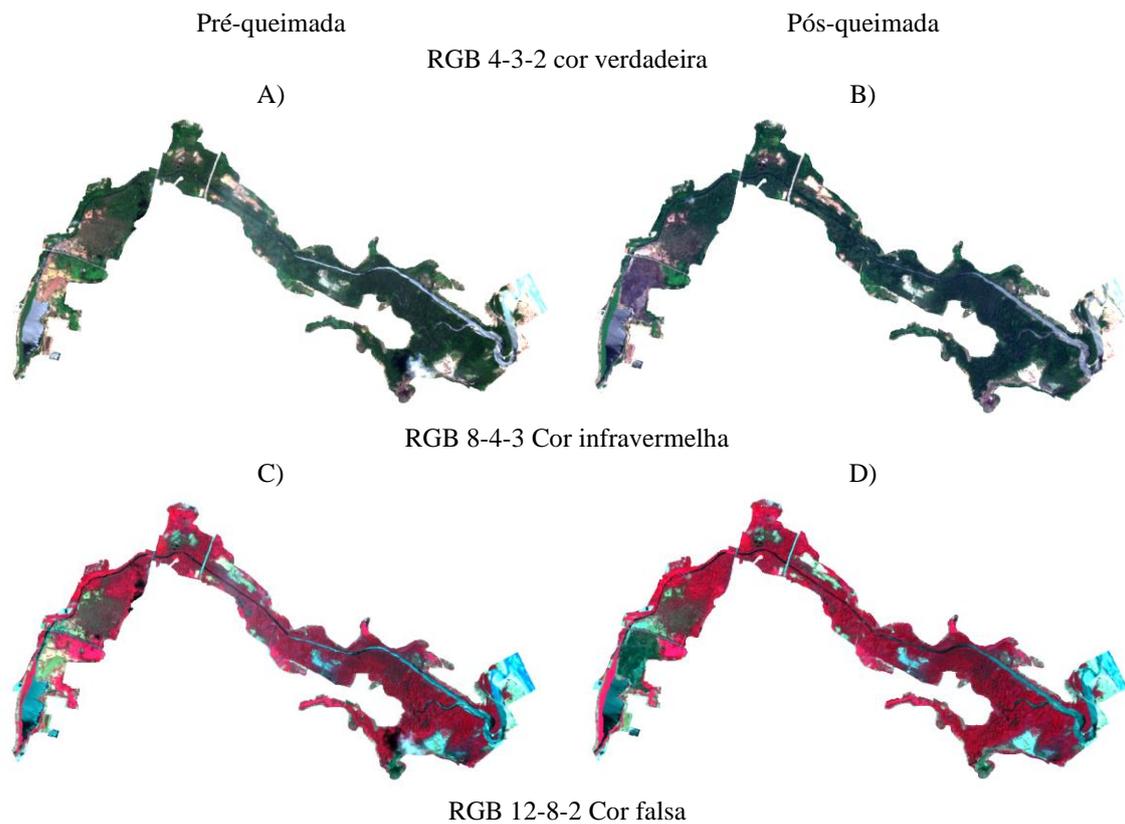
**Fonte:** Os autores (2023)  
 Source: The authors (2023)

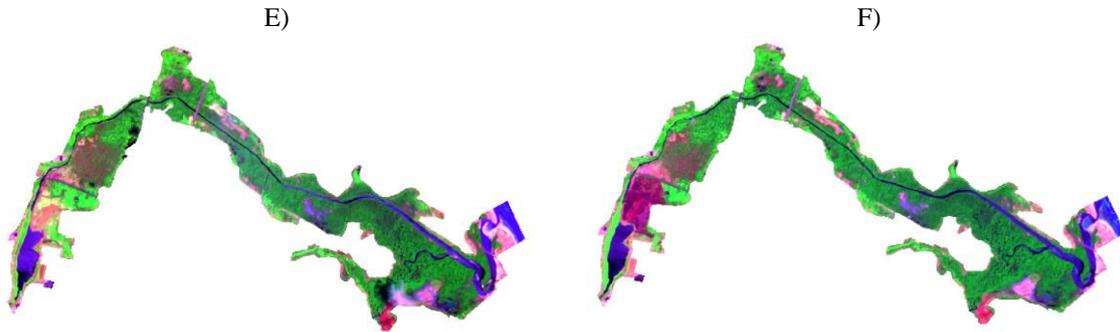
Na imagem gerada a partir da combinação de cores verdadeira, pode-se observar que, antes da queimada, a vegetação densa era verde-escura (Figura 3A-B). Uma grande massa florestal foi observada ao longo do rio até sua foz. Na parte oeste do parque, foi observado um tipo diferente de vegetação, mais arbustiva e não muito densa; no entanto, na imagem pós-queimada nessa combinação, tons escuros associados à carbonização do material vegetal puderam ser distinguidos a oeste da área.

Por outro lado, a combinação infravermelha realçou os elementos associados à massa florestal em tons vermelhos intensos em áreas onde a densidade florestal é maior e tons vermelhos menos intensos onde os elementos de vegetação são menos densos ou abundantes (Figura 3C-D). Da mesma forma, na imagem pós-queimada, o contraste da cicatriz do incêndio com os demais elementos que compunham a paisagem foi observado a oeste.

Para a combinação de cores falsas, foi possível identificar claramente a cicatriz da queimada, nesse caso, o tom obtido foi o contraste de tons avermelhados que demarcam claramente a área afetada, em contraste com o pré-queimada, que tem cores esverdeadas referentes à presença de vegetação (Figura 3E-F). Com a cor falsa, há um forte contraste e realça as características da área queimada para uma melhor interpretação visual (Idratmoko & Rizqihandari, 2019; Perez-Cabello et al., 2017).

**Figura 3** - Combinação colorida para visualização de cicatrizes de queimadas no PEC  
 Figure 3 - Color combination for visualizing burn scars on the PEC



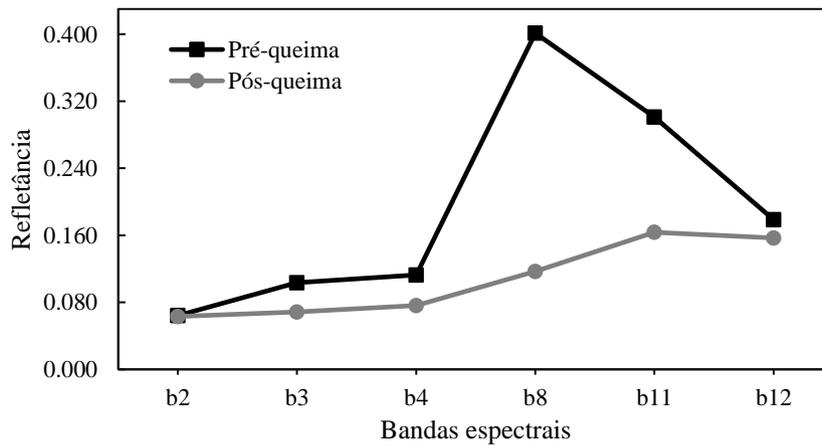


Fonte: Os autores (2023)  
Source: The authors (2023)

Como resultado da comparação da assinatura espectral, foi obtida a curva de vegetação típica da vegetação não perturbada, nesse caso o estado referente à pré-queima (Figura 4). Na banda 8, foram registrados níveis médios de refletância de 0,401 ( $0,651 \pm 0,139$ ). Na imagem pós-queimada, foi observada uma diminuição da refletividade na banda 8 de 29,14% e um aumento da refletividade nas bandas 11 e 12 (SWIR), indicando algum tipo de dano à cobertura vegetal presente na área. As bandas de infravermelho e de ondas curtas permitem a identificação de mudanças na condição da vegetação devido à ação do fogo (Boschetti, Stroppiana & Brivio, 2010; Silva et al., 2004).

La reacción espectral típica ante áreas quemadas incluye una disminución en la reflectancia de a banda 8. En condiciones ventosas y lluviosas, escasa biomasa y suelos arenosos, las cenizas desaparecen, exponiendo el suelo con alta reflectancia en a banda b11-12 (Libonati et al. 2010). As assinaturas espectrais coincidem com os resultados obtidos por Pereira et al. (2016), em que ele comparou a resposta espectral da vegetação pré e pós-queimada com imagens Landsat em o ecossistema do Cerrado.

**Figura 4** - Comparação das assinaturas espectrais pré e pós-queimada no PEC  
Figure 4 - Comparison of pre and post-burn spectral signatures in the PEC



Fonte: Os autores (2023)  
Source: The authors (2023)

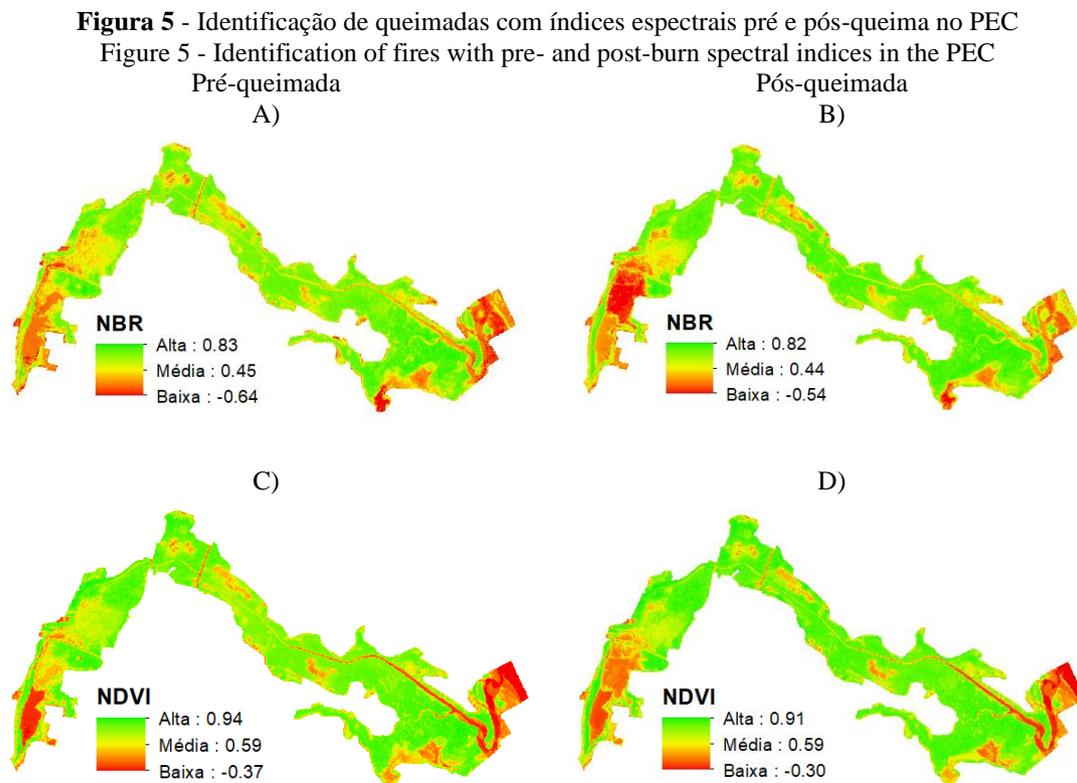
Historicamente, o PEC apresenta estações de risco de incêndios florestais no segundo semestre do ano, sendo que o mês de novembro representa o maior risco de incidentes de incêndios florestais (Eufrásio, Filho & Araújo. 2021). A maioria dos incêndios no PEC é causada pelo mau manejo do lixo que atinge a vegetação nativa e provoca queimadas (Pasquini, 2020).

Os resultados detalham os danos causados pelo evento registrado em novembro de 2021 em termos de localização e extensão da cicatriz, conhecendo as informações relacionadas a queimadas e danos típicos desse tipo de fenômeno, fornece ferramentas para entender a dinâmica do fogo e ajuda a tomar decisões informadas, bem como o planejamento e a mitigação de incêndios no PEC (Miranda et al., 2022).

### 3.2 Índices espectrais

A NBR apresentou uma diferença média de 0,1 para pré e pós queimada na área de estudo (Figura 5A e B). Especificamente, a cicatriz pós-queimada teve um valor médio de -0,18 ( $0,57 \pm 0,47$ ). Se os pixels apresentarem um NBR negativo, eles indicam um estresse hídrico considerável na vegetação, e é importante considerar que os resultados do fogo tendem a variar de "0" a valores fortemente negativos (Key & Benson, 2006).

O NDVI em todo o trecho 1 apresentou um valor médio para ambas as imagens de 0,59 (Figura 5C e D). Também demonstrou uma diferença na imagem pós-queimada com valores médios de 0,59 ( $0,91 \pm 0,30$ ). Para a imagem pós-queimada, a redução nos valores de NDVI sobre a cicatriz do incêndio foi de 0,17 ( $0,74 \pm 0,01$ ). Identificando a presença de valores mais baixos na área afetada pelo incêndio. Os valores de NDVI pós-queimada estão de acordo com os relatados por Prudente & Rosa (2016), que observaram que os valores de NDVI da vegetação afetada pelo fogo podem variar de 0,1 a 0,3.



Fonte: Os autores (2023)

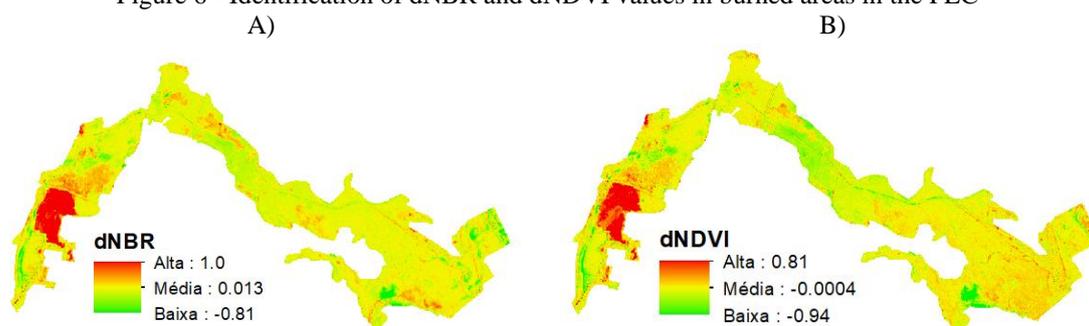
Source: The authors (2023)

### 3.3 Severidade de queimadas

A área de estudo apresentou valores máximos para dNBR e dNDVI de 1 e 0,81, respectivamente (Figura 6A e B). Da mesma forma, para o local correspondente à queimada, os valores médios para o dNBR médio foram 0,55 ( $1 \pm -0.02$ ), em que os valores positivos corresponderam à magnitude da severidade.

E para o dNDVI foram 0,38 ( $0,78 \pm -0,28$ ), valores positivos altos se traduzem em áreas extremadamente queimadas (Xulu, Mbatha & Kabir, 2021). Em este caso, los valores positivos corresponderían a áreas tipo arbustivas, es más común encontrar un delta fuertemente positivo, ya que en estas zonas los incendios tienden a generar cambios más perdurables en la biomasa, resultando en una vegetación sucesiva más temprana (Key & Benson, 2006; Silva & Beltrão, 2021).

**Figura 6** - Identificação dos valores de dNBR e dNDVI em áreas queimadas no PEC  
Figure 6 - Identification of dNBR and dNDVI values in burned areas in the PEC

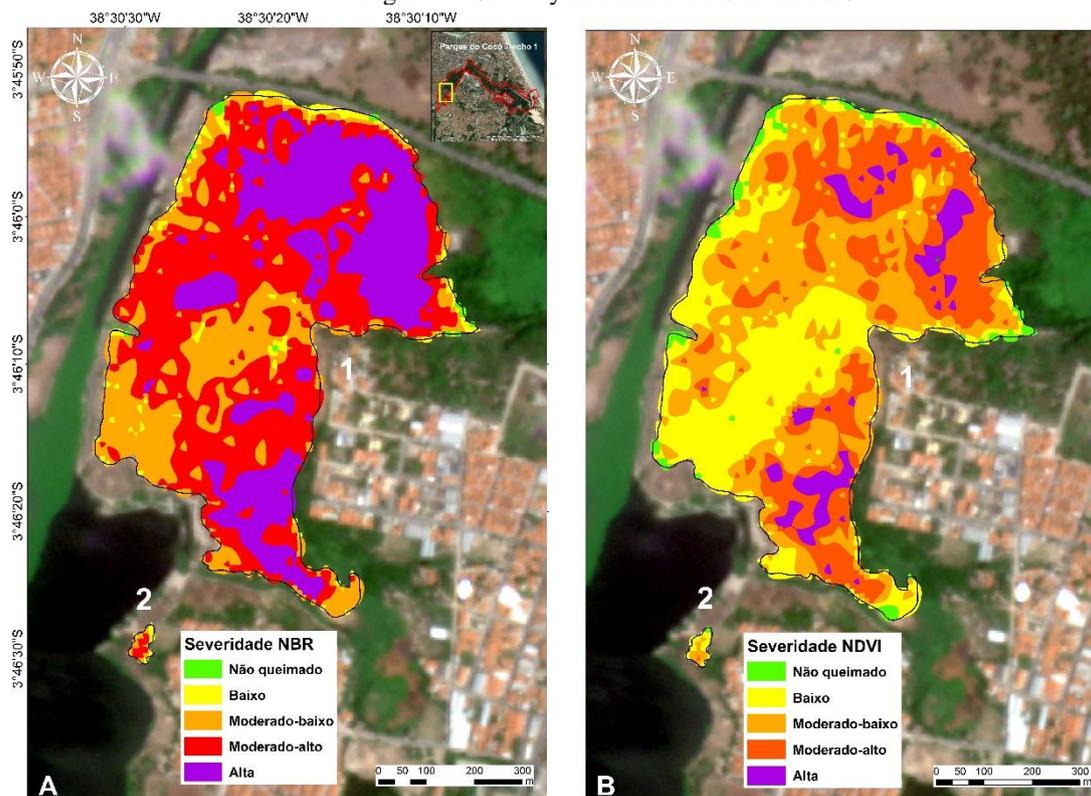


Fonte: Os autores (2023)  
Source: The authors (2023)

Para a NBR, a severidade moderada-alta foi a mais proeminente nas cicatrizes 1 e 2, com 20,8 ha (41,7%), sendo a mais representativa da área afetada (Figura 7A). Esse tipo de severidade afeta principalmente o solo e os galhos inferiores das árvores, podendo também causar a morte de plantas herbáceas e alguns arbustos, carbonização do tronco da árvore em até 70% da altura da árvore e morte parcial da árvore (Hayes & Robeson, 2009). Por outro lado, a baixa severidade afetou 1,94 ha (4,3%) localizados na periferia das cicatrizes.

Para o NDVI, a severidade mais proeminente foi moderada-baixa na cicatriz 1, com 16,11 ha (33,6%), principalmente na zona central e nordeste da cicatriz (Figura 7B). A categoria de severidade alta obteve apenas uma área de 3,25 ha (6,6%), principalmente no nordeste e no sul da cicatriz 1. Essa severidade representa a morte de arbustos e plantas herbáceas em termos de danos produzidos (Hayes & Robeson, 2009).

**Figura 7 - Severidade das zonas queimadas no PEC**  
**Figure 7 - Severity of burned areas in the PEC**



**Fonte:** Os autores (2023)  
**Source:** The authors (2023)

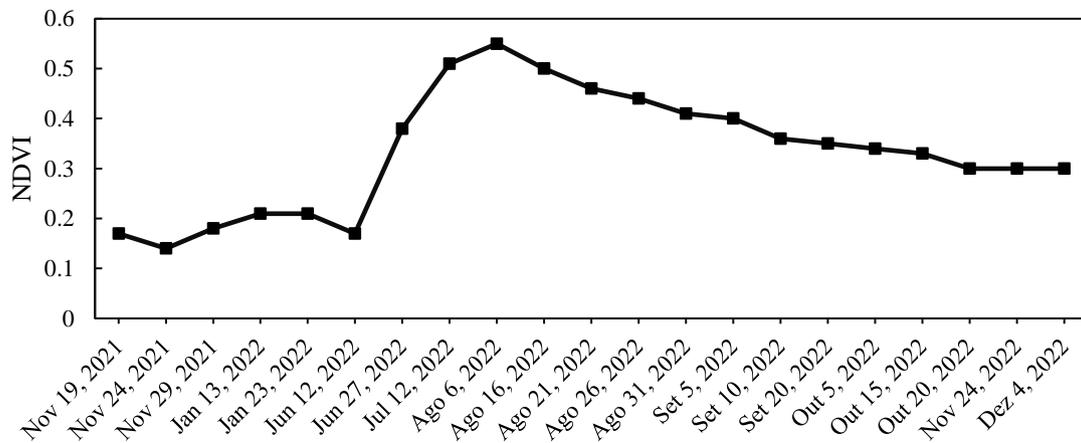
Nesse exercício, o NBR e o NDVI são complementares na análise. Enquanto o NBR é usado para detectar áreas queimadas e a severidade do fogo em termos de danos à vegetação (Key & Benson, 2006). O NDVI é usado para avaliar a abundância e o vigor da vegetação. Esses índices podem servir como um indicador da condição da vegetação pós-queimada (Lee & Chow, 2015), podendo indicar o dano causado à vegetação pelo incêndio, permitindo uma quantificação mais precisa da área afetada.

### 3.4 Análise de a cicatriz pós-queimada

A condição da vegetação pós-queimada de novembro de 2021 a junho de 2022 mostrou um aumento no valor do NDVI (Figura 8). Isso representa um padrão típico de recuperação da vegetação herbácea e arbustiva nos primeiros meses após da queimada (Lee & Chow, 2015).

Ainda de acordo com a Figura 8, entre os meses de junho e agosto de 2022, a vegetação atingiu seu valor médio máximo de NDVI de 0,55. Entretanto, de 16 de agosto a 4 de dezembro de 2022, os valores de NDVI diminuíram, indicando uma mudança no vigor da vegetação, atingindo um valor médio de NDVI de 0,3.

**Figura 8 - Série temporal de NDVI pós-queimada no PEC**  
 Figure 8 - Post-burn NDVI time series at PEC

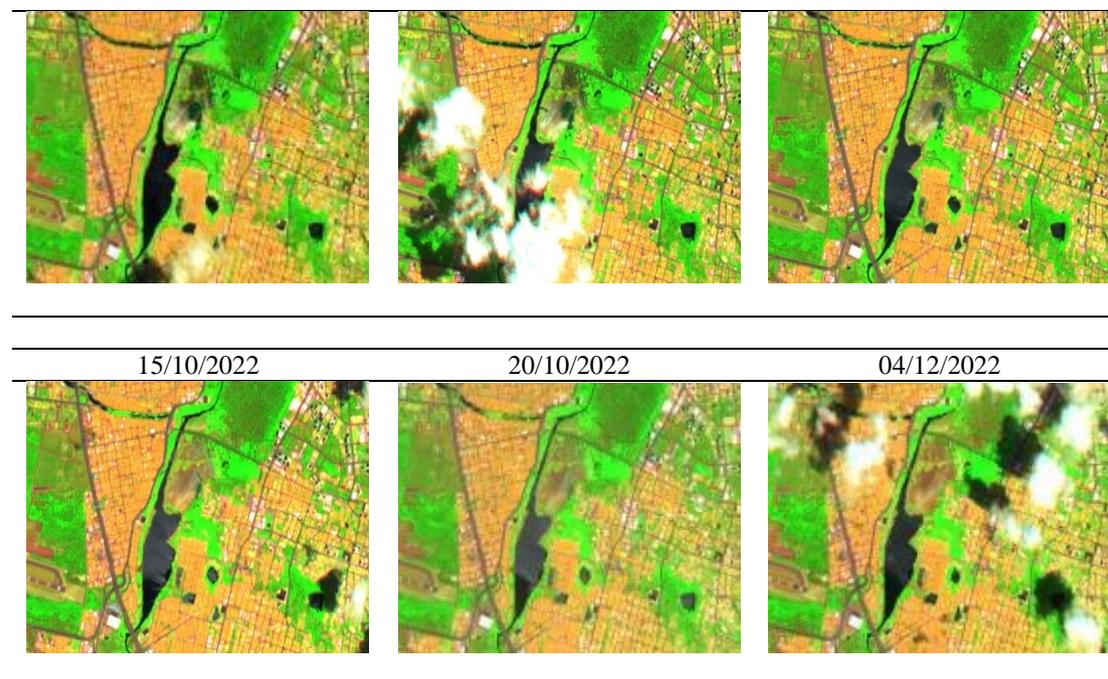


**Fonte:** Os autores (2023)  
 Source: The authors (2023)

Da mesma forma, na maior cicatriz, foi observado visualmente um evento de remoção da cobertura vegetal remanescente (Tabela 3). Especificamente, isso ficou evidente a partir de agosto de 2022, onde as sombras mostram que a cobertura vegetal foi gradualmente removida. Da mesma forma, para o mês de dezembro, foi possível identificar que a exposição do solo nu para o mês de dezembro de 2022 foi mais evidente.

**Tabela 3 – Série temporal visual pós-queimada no PEC**  
 Table 3 - Post-burn visual time series at PEC

21/08/2022	26/08/2022	31/08/2022
05/09/2022	10/09/2022	20/09/2022



**Fonte:** Os autores (2023)  
**Source:** The authors (2023)

Na imagem anterior pode-se observar que a zona pós-queimada apresenta um alto dinamismo na vegetação, o PEC está sob constante ameaça devido à sua localização geográfica. O fato de estar inserido numa zona urbana, deixa o PEC suscetível a situações relacionadas ao uso do fogo para mudanças no uso da terra, o que coloca seu patrimônio natural do PEC sob constante pressão (Eufrásio, Filho & Araújo, 2021).

Por outro lado, embora o distúrbio do fogo tenha sido detectado em 2021 por Pastrana, Gomes & Olivera (2023), essa abordagem se concentrou principalmente nas mudanças e na cobertura da terra, sem dar atenção significativa ao fenômeno do fogo em si. No entanto, este estudo fornece uma caracterização detalhada do evento de incêndio de 2021, abrangendo aspectos como a extensão da área queimada, sua severidade e uma série de dados temporais que ilustram a dinâmica da vegetação, bem como as mudanças detectadas após o incêndio.

O PEC é muito suscetível a queimadas, de acordo com o estudo de Eufrásio, Filho & Araújo, (2021) em 20 anos de monitoramento de queimadas (1999-2018) foram 178 ocorrências relacionadas ao fogo, onde o segundo semestre do ano sempre apresenta os maiores registros no PEC. No entanto, eles se limitaram apenas a gerar estatísticas dos eventos, por isso não utilizaram imagens de sensoriamento remoto para a localização e análise de cada queimada presente. Este estudo é apresentado como pano de fundo para uma possível reconstrução histórica das queimadas no PEC, onde a análise de outras variáveis pode ser incluída, como a extensão das queimadas, a severidade dos danos, a recuperação da vegetação após o incêndio, etc.

O PEC também possui um plano de manejo, cujo objetivo é estabelecer uma série de ações e atividades para a conservação dos recursos naturais do PEC. No entanto, conforme a Pasquini (2020), dentro da cobertura vegetal, a área onde ocorreu a queimada está localizada em áreas com ambientes pantanosos e com alguma presença de manguezais, a queimada que poderia ter sido na época de alto impacto para o PEC. Além disso, essa área foi identificada como uma “Zona de Adequação Ambiental”, que inclui áreas significativamente afetadas e degradadas pela intervenção humana. Nesses locais, é necessária a implementação de estratégias de gestão para conter a degradação dos recursos naturais e promover a restauração do meio ambiente. Este estudo contribui para esse objetivo, uma vez que os resultados denotam os locais com a localização das severidades,

o que pode ser uma ferramenta para auxiliar na implementação do plano de gestão e campanhas de restauração ecológica para monitoramento e verificação de ações e indicadores de gestão.

Esses resultados podem servir como informações relevantes e uma ferramenta valiosa para o gerenciamento integrado de recursos naturais. Eles também fornecem estatísticas sobre queimadas em meses de alto risco e complementam outros estudos, permitindo a identificação de padrões espaciais que podem apoiar a tomada de decisões informadas pelos gerentes ambientais para o gerenciamento integrado de incêndios no PEC.

#### 4. Conclusão

As imagens do Sentinel-2 e os produtos derivados são de grande ajuda na análise de áreas queimadas no PEC. O evento registrado em novembro de 2021 foi caracterizado por duas cicatrizes que confirmaram uma área queimada de 45,55 ha na parte oeste do PEC. Da mesma forma, a intensidade do fogo foi classificada como moderada-alta com 41,17% para o NBR e moderada-baixa com 33,6% para o NDVI onde, em termos de danos poderia ter causado a morte de plantas herbáceas, arbustos e a carbonização de árvores, além de colocar em risco a integridade do PEC como um todo.

Da mesma forma, a análise das séries temporais mostrou mudanças significativas na dinâmica da vegetação após o incêndio onde, a partir de agosto de 2022, houve uma diminuição nos valores de NDVI, que foi visualmente contrastada e expôs a evidência de mudanças para solo nu na área afetada. Recomenda-se a realização de uma análise de série temporal mais extensa para entender um padrão mais amplo das mudanças no PEC causadas pelo incêndio e complementar o trabalho com visitas de campo.

Em conclusão, os resultados deste estudo representam um avanço significativo na análise e na gestão de queimadas no PEC utilizando produtos derivados de sensoriamento remoto, o que pode ser uma ferramenta fundamental na gestão, restauração e conservação do patrimônio ambiental do PEC, além de fortalecer a preparação das instituições governamentais para lidar com esse tipo de fenômeno e mitigar possíveis consequências de queimadas em várias unidades de conservação.

#### 5. Agradecimentos

A autor principal agradece à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAPE), pela bolsa concedida no âmbito do doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFC e da chamada para a Primeira Edição do Programa de Mobilidade Internacional GCUB 001/2022.

#### 6. Referências

- Bolaño-Díaz, S., Camargo-Caicedo, Y., Soro, T., N'dri, A. B., & Bolaño-Ortiz, T (2022). Spatio-temporal characterization of fire using MODIS data (2000-2020) in Colombia. **Fire**, 5, 1-12.
- Boschetti, M., Stroppiana, D., & Brivio, P. A (2010). Mapping burned areas in a Mediterranean environment using soft integration of spectral indices from high-resolution satellite images. **Earth Interactions**, 14(17), 1-20.
- Branco, K (2014). **Microclimas e áreas verdes na cidade de Fortaleza – CE**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Fortaleza, CE, Brasil.
- Eufrásio, J., Filho, F., & 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.

Fatemi, M., & Narangifard, M (2019). Monitoring LULC changes and its impact on the LST and NDVI in District 1 of Shiraz City. **Arabian Journal of Geosciences**, 12(4), 1–12.

García, M. J. L., & Caselles, V (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. **Geocarto International**, 6(1), 31–37.

Gómez-Sánchez, E., De Las Heras, J., Lucas-Borja, M., & Moya, D (2017). Ajuste de metodologías para evaluar severidad de quemado en zonas semiáridas (SE peninsular): incendio Donceles 2012. **Revista de Teledetección**, 49(49), 103-113.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M.; Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, 202, 18-27.

Hayes, J., & Robeson, S (2009). Spatial variability of landscape pattern change following a ponderosa pine wildfire in northeastern New Mexico, USA. **Physical Geography**, 30(5), 410-429.

IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (2022). **Malha Municipal**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 15/09/2023.

IDE-SIFIN - Secretaria Das Finanças de Fortaleza (2023). **Limites Administrativos**. Disponível em: <https://ide.sefin.fortaleza.ce.gov.br/downloads>. Acesso em: 15/09/23.

Idratmoko, S., & Rizqihandari, N (2019). Burn area detection using Landsat 8 OLI TIRS. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 338(1), 1-9.

Keeley, J. E (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. **International Journal of Wildland Fire**, 18(1), 116-126.

Key, C. H., & Benson, N. C (2006). Landscape Assessment (LA). FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. (**Technical Report**), Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station

Lee, R. J., & Chow, T. E (2015). Post-wildfire assessment of vegetation regeneration in Bastrop, Texas, using Landsat imagery. **GIScience & Remote Sensing**, 52(5), 609-626.

Libonati, R., DaCamara, C. C., Pereira, J. M. C., & Peres, L. F. (2010). Retrieving middle-infrared reflectance for burned area mapping in tropical environments using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, 114(4), 831–843.

Lucas, F., Araujo, E., Fiedler, N. C., Santana, J., Tetto, A (2023). Scientific gaps on forest fires in Brazilian protected areas. **Forest Ecology and Management**, 529, 1-8.

Marinho, A. A. R., Gois, G. de, Oliveira-Júnior, J. F. de, Correia Filho, W. L. F., Santiago, D. de B., da Silva Junior, C. A., Teodoro, P. E., de Souza, A., Capristo-Silva, G. F., Freitas, W. K. de, & Rogério, J. P (2021).

Temporal record and spatial distribution of fire foci in State of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Environmental Management**, 280, 1–19.

Miranda, A., Mentler, R., Moletto-Lobos, Í., Alfaro, G., Aliaga, L., Balbontín, D., Barraza, M., Baumbach, S., Calderón, P., Cárdenas, F., Castillo, I., Contreras, G., De La Barra, F., Galleguillos, M., González, M. E., Hormazábal, C., Lara, A., Mancilla, I., Muñoz, F., ... Urrutia, V (2022). The Landscape Fire Scars Database: Mapping historical burned area and fire severity in Chile. **Earth System Science Data**, 14(8), 3599–3613.

Montorio, R., Pérez-Cabello, F., García Martín, A., & Riva, J. de la (2013). Estudio de los procesos de regeneración vegetal postincendio en parcelas experimentales mediante radiometría de campo. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, 33, 59-84.

Morelli, F., Setzer, A., Cristina, S (2009). Focos de queimadas nas unidades de conservação e terras indígenas do pantanal, 2000-2008. **Geografia**, 34, 681–695.

Moritz, M. A., Batllori, E., Bradstock, R. A., Gill, A. M., Handmer, J., Hessburg, P. F., Leonard, J., McCaffrey, S., Odion, D. C., Schoennagel, T., & Syphard, A. D (2014). Learning to coexist with wildfire. **Nature**, 515, 58–66.

Pastrana, J., Gomes, L., Olivera, J (2023). Detecção de mudanças na cobertura da terra através da implementação do algoritmo Change Vector Analysis (CVA) no Parque Estadual do Cocó – Fortaleza/CE. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, 24, 504-531.

Pasquini, B (2020). **Plano de manejo do Parque Estadual do Cocó. Fortaleza**. Disponível em: [https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2021/03/PMPC\\_01.pdf](https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2021/03/PMPC_01.pdf). Acesso em: 20/09/2023.

Pereira, A. A., Teixeira, F. R., Libonati, R., Melchiori, E. A., Marcelo, L., & Carvalho, T. (2016). Avaliação de índices espectrais para identificação de áreas queimadas no Cerrado utilizando dados Landsat TM. **Revista Brasileira de Cartografia**, 68(8), 1665–1680.

Perez-Cabello, F., de la Riva Fernandez, J., Montorio-Lloveria, R., & García-Martín, A (2017). Mapping erosion-sensitive areas after wildfires using fieldwork, remote sensing, and geographic information systems techniques on a regional scale. **Journal of Geophysical Research**, 111, 1–13.

Prudente, T., & Rosa, R. (2016). Análise dos incêndios florestais e variação temporal do NDVI no município de São Valério -TO. **Revista Formação (ONLINE)**, 2(23), 271–286.

Queiroz, B., & Garcez, D (2021). Importância do Parque Estadual do Cocó no fornecimento de serviços ecossistêmicos de provisão, regulação e culturais para moradores de Fortaleza (CE). **ENCONTROS UNIVERSITÁRIOS DA UFC 2021, Fortaleza** p. 1381. Disponível em: <http://periodicos.ufc.br/eu/article/view/74504>. Acesso em: 20/10/2023

Rouse, J. W., Haas, R. H., Shell, J. A., & Deering, D (1974). **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. NASA. Goddard Space Flight Center.

SEMA - Secretaria do Meio Ambiente e Mudança do Clima (2023). **Unidades de Conservação (UCs) – Acervo 2023**. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/unidades-de-conservacao-2/>. Acesso em: 16 de sept

de 2023.

Salvoldi, M., Siaki, G., Sprintsin, M., & Karnieli, A. (2020). Burned area mapping using multi-temporal sentinel-2 data by applying the relative differenced aerosol-free vegetation index (RdAFRI). **Remote Sensing**, 12(17), 1–22.

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.

Silva, J. M. N., Cadima, J. F. C. L., Pereira, J. M. C., & Grégoire, J. M (2004). Assessing the feasibility of a global model for multi-temporal burned area mapping using SPOT-VEGETATION data. **International Journal of Remote Sensing**, 25(22), 4889–4913.

Sousa, É. N. C., & Santos, F. A (2016). O processo de implantação do Parque Estadual do Cocó, Fortaleza (CE): conflitos e perspectivas. **Revista de Geociências Do Nordeste**, 2, 781–790.

Suarez, N., & Medina, J (2022). Estimación de áreas afectadas por incendios en la reserva forestal protectora bosque oriental de Bogotá: Usando imágenes satelitales Sentinel- 2, basado en objetos geográficos (GEOBIA). **Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação**, 54(11), 300–313.

Sunar, F., & Özkan, C (2001). Forest fire analysis with remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, 22(12), 2265–2277.

Szpakowski, D., & Jensen, J (2019). A review of the applications of remote sensing in fire ecology. **Remote Sensing**, 11(22), 1–31.

Tyukavina, A., Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A. H., Stehman, S. V., Turubanova, S., Parker, D., Zalles, V., Lima, A., Kommareddy, I., Song, X.-P., Wang, L., & Harris, N (2022). Global trends of forest loss due to fire from 2001 to 2019. **Frontiers in Remote Sensing**, 3, 1–20.

UNEP - United Nations Environment Programme (2022). **Spreading like Wildfire – The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. A UNEP Rapid Response Assessment**. Kenia: United Nations Environment Programme.

Wu, Y., Li, S., Xu, R., Chen, G., Yue, X., Yu, P., Ye, T., Wen, B., de Sousa Zanotti Stagliorio Coêlho, M., Saldiva, P. H. N., & Guo, Y (2023). Wildfire-related PM2.5 and health economic loss of mortality in Brazil. **Environment International**, 174, 1–8.

Xulu, S., Mbatha, N., & Kabir, P (2021). Burned area mapping over the southern cape forestry region, South Africa using Sentinel data within GEE cloud platform. **International Journal of Geo-Information**, 10, 1–16.