

# IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS FORESTALES EN EL PARQUE ESTATAL DE COCÓ, FORTALEZA, BRASIL

## *IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIOS FLORESTAIS NO PARQUE ESTADUAL DO COCÓ, FORTALEZA, BRASIL*

### *IDENTIFICATION OF PRIORITY AREAS FOR FOREST FIRE PROTECTION IN THE COCÓ STATE PARK, FORTALEZA, BRAZIL*

**Mauricio Alejandro Perea-Ardila**

Doctorando en Geografía, Programa de posgrado en Geografía  
Universidade Federal de Ceará (UFC)  
mauricio.perea@alu.ufc.br

#### **RESUMEN**

El Parque Estatal de Cocó (PEC) es crucial para la biodiversidad local, sin embargo, enfrenta amenazas constantes de incendios forestales. Este estudio busca identificar áreas prioritarias para la protección contra incendios del PEC. Usando criterios de peligro (combustibles), riesgo (edificaciones, vías, focos históricos y pendientes) y valor ecológico (zonificación), se emplearon técnicas de geoprocésamiento y análisis espacial para crear cuatro escenarios que identifiquen áreas prioritarias. Se identificaron 749,55 ha con combustibles vegetales y 39.991 predios a 500 metros del PEC, además de 2.630 vías cercanas. Desde 2000 hasta mediados de 2024, se registraron 35 focos de calor, el 40% dentro del PEC. La zonificación reveló 595,82 ha destinadas a la preservación, con 551,48 ha de combustibles en alto peligro y 45,11 ha de edificaciones en alto riesgo, mientras que 656,99 ha tuvieron un alto valor de conservación. El barrio Edson Queiroz se destacó con más del 30% de áreas de alta prioridad identificadas en todos los escenarios. Las áreas identificadas deben guiar medidas preventivas y de manejo, como vigilancia intensificada, técnicas de prevención de incendios, promoción de prácticas sostenibles y mejoras en políticas de conservación, asegurando la integridad ecológica del PEC y mitigando riesgos humanos en estos ecosistemas.

**PALABRAS CLAVE:** algebra de mapas; criterios; fuego; ponderación; sistemas de información geográfica.

#### **RESUMO**

O Parque Estadual de Cocó (PEC) é crucial para a biodiversidade local, mas enfrenta ameaças constantes de incêndios florestais. Este estudo visa identificar áreas prioritárias para a proteção contra incêndios do PEC. Utilizando critérios de perigo (combustíveis), risco (edificações, vias, focos históricos e declividades) e valor ecológico (zoneamento), foram usadas técnicas de geoprocessamento e análise espacial para criar quatro cenários que identificam áreas prioritárias. Foram identificados 749,55 ha com combustíveis vegetais e 39.991 propriedades a 500 metros do PEC, além de 2.630 vias próximas. De 2000 até meados de 2024, foram registrados 35 focos de calor, dos quais 40% ocorreram dentro do PEC. O zoneamento revelou 595,82 ha destinados à preservação, com 551,48 ha de combustíveis em alto perigo e 45,11 ha de edificações próximas em alto risco, enquanto 656,99 ha apresentaram alto valor de conservação. O bairro Edson Queiroz destacou-se com mais de 30% das áreas de alta prioridade identificadas em todos os cenários. As áreas identificadas devem orientar medidas preventivas e de manejo, como vigilância intensificada, técnicas de prevenção de incêndios, promoção de práticas sustentáveis e melhorias nas políticas de conservação, garantindo a integridade ecológica do PEC e mitigando os riscos relacionados à atividade humana nesses ecossistemas sensíveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** álgebra de mapas; critérios; fogo; ponderação; sistemas de informações geográficas.

#### **ABSTRACT**

The Cocó State Park (PEC) is crucial for local biodiversity but faces constant threats from forest fires. This study aims to identify priority areas for fire protection within the PEC. Using criteria of hazard (fuels), risk (buildings, roads, historical fire hotspots, and slopes), and ecological value (zoning), geoprocessing and spatial analysis techniques were employed to create four scenarios to identify priority areas. A total of 749.55 ha with vegetative fuels and 39,991 properties within 500 meters of the PEC were identified, along with 2,630 nearby roads. From 2000 to mid-2024, 35 heat sources were recorded, 40% of which occurred within the PEC. Zoning revealed 595.82 ha designated for preservation, with 551.48 ha of fuels at high hazard levels and 45.11 ha of nearby buildings at high risk, while 656.99 ha had high conservation

value. The Edson Queiroz neighborhood stood out with over 30% of high-priority areas identified in all scenarios. The identified areas should guide preventive and management measures, such as intensified surveillance, fire prevention techniques, promotion of sustainable practices, and improvements in conservation policies. These actions aim to ensure the ecological integrity of the PEC and mitigate human-related risks in these sensitive ecosystems.

**KEYWORDS:** algebra of maps; criteria; Fire; Weighting; geographic information systems.

## 1. INTRODUCCION

Los incendios forestales influyen en la dinámica de los ecosistemas y en la gestión del territorio; además de repercutir en los procesos globales, pueden tener efectos ecológicos positivos. Sin embargo, sus efectos destructivos, junto con las pérdidas humanas y materiales, generalmente los hacen indeseables y requieren una mitigación (Szapkowski; Jensen, 2019). Se calcula que en todo el mundo los incendios queman más de 400 millones de hectáreas al año (60 millones de hectáreas en América Latina y el Caribe) principalmente debido a las actividades humanas, causando importantes daños medioambientales y económicos (FAO, 2023).

Uno de los países más afectados por los incendios en todo el mundo es Brasil. Los cambios en el uso y la cubierta del suelo, la deforestación y el uso del fuego para convertir los bosques en tierras de agropecuarias son las principales causas de estos incendios (Mataveli *et al.*, 2018; Pinto *et al.*, 2021). Asimismo, se ha demostrado que el periodo con mayor probabilidad de incendios de vegetación en Brasil es de agosto a noviembre. Sin embargo, la temporada de incendios varía regionalmente, siendo septiembre y octubre los meses con mayor concentración de incendios en todas las regiones del país (Pinto *et al.*, 2021).

En Brasil, las Unidades de Conservación (UC) se describen como un área territorial con recursos ambientales representativos, legalmente establecida, con objetivos de conservación y gestión para garantizar su protección a lo largo del tiempo (SEMA, 2023). Sin embargo, a pesar de estos atributos, los incendios forestales están presentes en este tipo de áreas (Costa *et al.*, 2009). Se estima que entre 2006 y 2012, el número total de incendios y el área quemada en las UC de Brasil fue de 1.873 incendios y 853.230,61 ha quemadas (Pinto *et al.*, 2021). Aunque, las UC tienen por objeto proteger la biodiversidad, estas zonas siguen sufriendo una gran degradación debido al uso inadecuado del fuego para renovar los pastos y eliminar los residuos de los cultivos (Pereira; Fiedler; Medeiros, 2004). Los incendios en las UC son una de las principales causas de alteración y destrucción de la biodiversidad, poniendo en peligro sus recursos naturales (Morelli; Setzer; Cristina, 2009).

El Parque Estatal de Cocó (PEC) es una de las principales UC integrales del estado de Ceará, dedicada a preservar la biodiversidad y garantizar las funciones ambientales, centrándose especialmente en la protección del principal río de la cuenca del Cocó (Vasconcelos *et al.*, 2019). El PEC, localizado en la ciudad de Fortaleza/CE, experimenta con frecuencia conflictos con los seres humanos, que se manifiestan en zonas deforestadas y una elevada incidencia de incendios forestales, tanto dentro del PEC, como en sus límites con el entorno urbano (Ferreira Filho; Costa Araújo, 2021).

Dos grandes incendios ocurridos en el interior del PEC (noviembre de 2021 y enero de 2024) afectaron a una superficie de 62,5 hectáreas, lo que demuestra la vulnerabilidad y el impacto negativo de estos sucesos (Perea-Ardila; Muñoz, 2024; Perea-Ardila; Muñoz; Sopchaki, 2023). Por este motivo, la identificación de las zonas prioritarias para la gestión de los incendios forestales es esencial a la hora de planificar la protección de los recursos naturales (Gutiérrez López *et al.*, 2019). Las áreas prioritarias permiten cartografiar los sitios vulnerables a los incendios y garantizar la asignación precisa de recursos y equipos para la prevención y el control de incendios. (Juvanhol *et al.*, 2021).

La mayoría de los mapas que definen zonas prioritarias para la protección contra incendios forestales utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que son cruciales en la gestión forestal gracias a sus capacidades de modelización informática, que emplean diversas técnicas para evaluar eficazmente el riesgo de incendios (Flores Garnica *et al.*, 2016a; Jaiswal *et al.*, 2002). Incluyen variables sobre la topografía, vegetación, uso del suelo, población y asentamientos (Dong *et al.*, 2005). En conjunto, estas herramientas se utilizan cada vez más en todos los aspectos relacionados a la gestión de los incendios forestales (Gigović *et al.*, 2018).

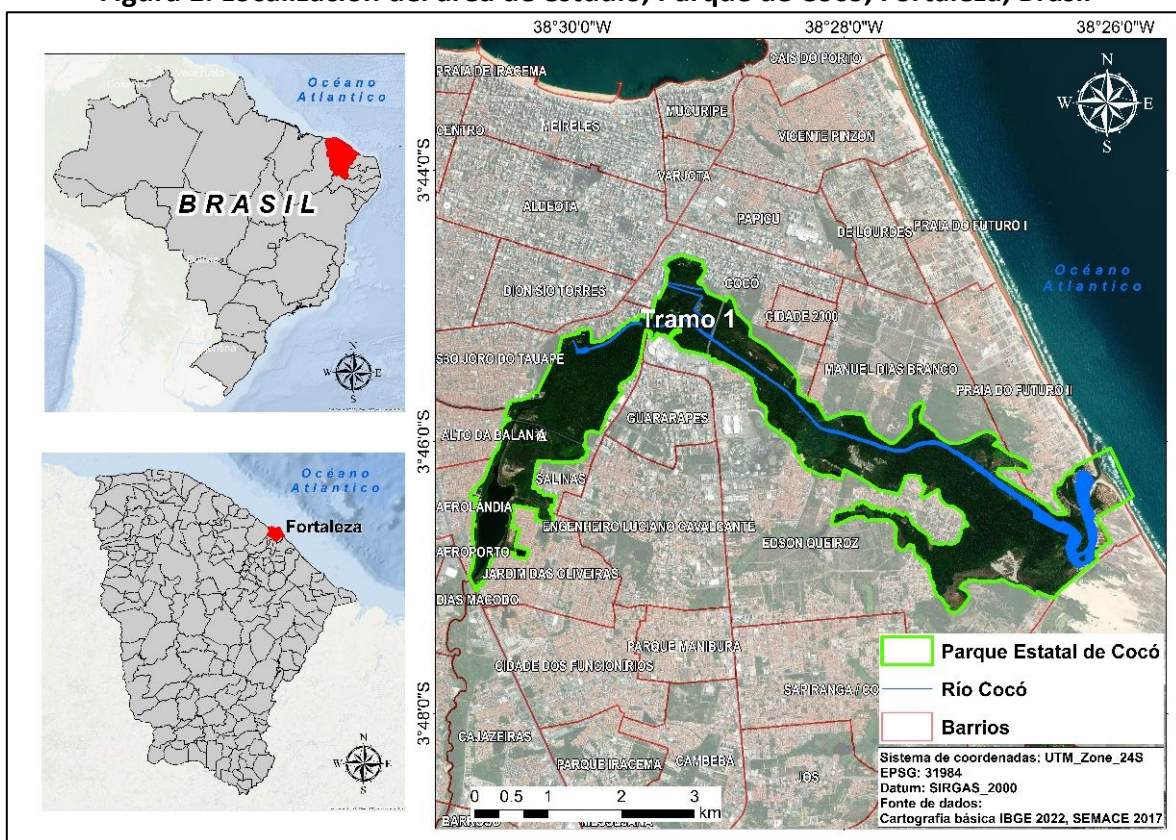
En este contexto, este estudio pretende identificar áreas prioritarias para la protección contra incendios forestales del PEC en Fortaleza/CE, utilizando geoprosesamiento, análisis espacial y relacionando variables que tengan en incorporen el peligro, el riesgo y el valor ecológico del PEC. Se espera que los resultados de este estudio proporcionen a los responsables de la toma de decisiones un enfoque integral para la gestión de incendios y la conservación del PEC.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

El PEC (Tramo 1) está situado en el área metropolitana de Fortaleza, estado de Ceará, Brasil (Figura 1). Se encuentra entre las coordenadas geográficas  $3^{\circ} 44' 37,44''$  y  $3^{\circ} 47' 15,41''$  latitud sur y entre los  $38^{\circ} 30' 45,96''$  y  $38^{\circ} 25' 52,36''$  longitud oeste (Perea-Ardila; Muñoz; Sopchaki, 2023). El clima de la región es tropical semihúmedo, con temperaturas medias de  $26^{\circ}\text{C}$  y una precipitación media anual de 1.600 mm (Branco, 2014). El clima está clasificado según Köppen como "Aw" (caluroso durante todo el año, con una temporada seca), con los meses más lluviosos entre febrero y mayo (Branco, 2014; Pasquini, 2020). El PEC destaca por la presencia de extensas zonas de manglares, un gran complejo estuarino y llanuras fluvio-marinas (Sousa; Santos, 2016). El PEC se destaca por el segundo semestre del año con la "temporada normal de incendios forestales" en concreto, noviembre es el mes con mayor número de incidentes y mayor riesgo de incendios forestales (Ferreira Filho; Costa Araújo, 2021).

**Figura 1: Localización del área de estudio, Parque de Cocó, Fortaleza, Brasil**



Fuente: Elaborado por el autor (2024).

La identificación de las áreas de protección contra los incendios forestales tiene por objeto determinar los sitios en los que se pueden asignar recursos financieros, humanos y logísticos para la prevención, la lucha y la recuperación de las zonas afectadas por los incendios (Flores Garnica *et al.*, 2018a). Esto se consigue generando una cartografía temática de criterios específicos (peligro, riesgo y valor) definidos a partir de una serie de variables ponderadas (Flores-Garnica; Casillas Díaz; Macías Muro, 2019). A continuación, se presenta la definición de cada criterio establecido:

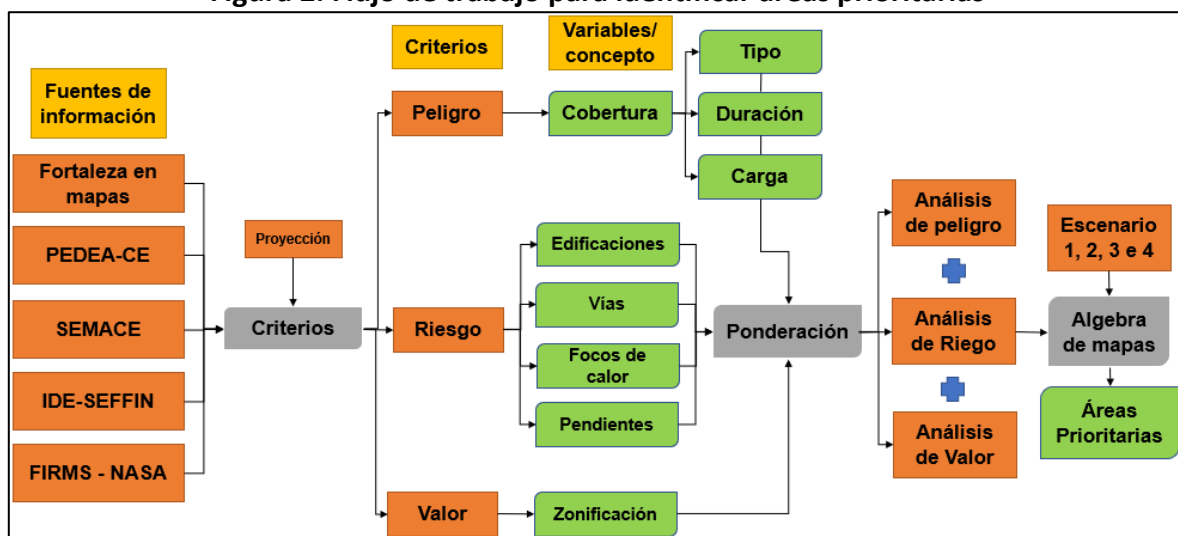
- **Peligro:** El análisis aborda los factores medioambientales, las características del combustible y las condiciones del mismo que repercuten en la propagación y los efectos de los incendios. Incluye cómo se comporta el fuego en diferentes ecosistemas (Flores Garnica *et al.*, 2018b).

- **Riesgo:** son condiciones variables que pueden favorecer el inicio de incendios forestales, como la proximidad a zonas urbanas, la densidad de población, la accesibilidad por carretera, los tipos de vías, la proximidad a focos anteriores, las causas y las zonas forestales afectadas (Flores Garnica *et al.*, 2018a).

- **Valor:** Se refiere a la evaluación de los aspectos sociales, culturales, económicos y ecológicos que son importantes para protegerse de los efectos de los incendios forestales (Flores Garnica *et al.*, 2016b).

Los análisis se realizaron con el apoyo del software SIG ArcGIS 10.8 utilizando los módulos de geoprocésamiento y análisis espacial y la información se procesó en el sistema de coordenadas SIRGAS 2000 UTM Zona 24S. La Figura 2 muestra el flujo de trabajo implementado para este fin.

**Figura 2: Flujo de trabajo para identificar áreas prioritarias**



Fuente: Elaborada por el autor (2024).

## 2.1 Fuentes de información

Se realizó una búsqueda de variables geográficas relacionadas con cada criterio en diferentes plataformas e infraestructuras de datos espaciales disponibles para Fortaleza (Tabla 1). Se accedió a ellas en formato *shapefile*. Los focos de calor se relacionaron con los incendios activos históricos registrados en FIRMS (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>), que abarcaron el periodo comprendido entre 2000 y el primer semestre de 2024. Cabe mencionar que los datos son multiescalares, en este caso debido a la disponibilidad limitada de metadatos presentes.

**Tabla 1: Fuentes de información geográfica**

Variable	Año	Formato	Fuente	Escala
Cobertura/ combustible	2020	Shapefile	PEDEA-CE	1:10000
Edificaciones	2016	Shapefile	IDE SEFIN	-
Vías	2017	Shapefile	Fortaleza em mapas	-
Focos históricos	2000-2024	Shapefile	FIRMS-NASA	1 km
Curvas de nivel	2016	Shapefile	PEDEA-CE	-
Zonificación	2020	Shapefile	SEMACE	1.10000

**Fuente:** Elaborada por el autor (2024).

## 2.2 Criterios y ponderación

La tabla 2 muestra las variables y los intervalos de ponderación propuestos. Para la peligrosidad, se determinaron 3 conceptos a partir de la capa de cobertura, basándose en la metodología IDEAM (2011) que desarrolló un modelo de combustibles que refleja la condición pirogénica de la vegetación. En este caso, el tipo de combustible se reclasificó en función de la cubierta vegetal, interpretando los tipos de cubierta en función de los combustibles dominantes, asignando un valor de ponderación en función de su estado (ligero o pesado). Del mismo modo, para la duración de los combustibles según las coberturas predominantes, se asignó una ponderación basada en la duración de los mismos.

Asimismo, se ponderó la información específica sobre la biomasa de los distintos tipos de cubierta (expresada en toneladas por hectárea), se generó una clasificación de las cubiertas (carga de combustible) basada en los contenidos máximos de biomasa aérea del conjunto de datos de

Santoro y Cartus (2023). Asimismo, se ponderó las variables de riesgo que incluyó 4 variables y el valor ecológico que incluyó la zonificación del PEC.

**Tabla 2: Variables e intervalos de ponderación**

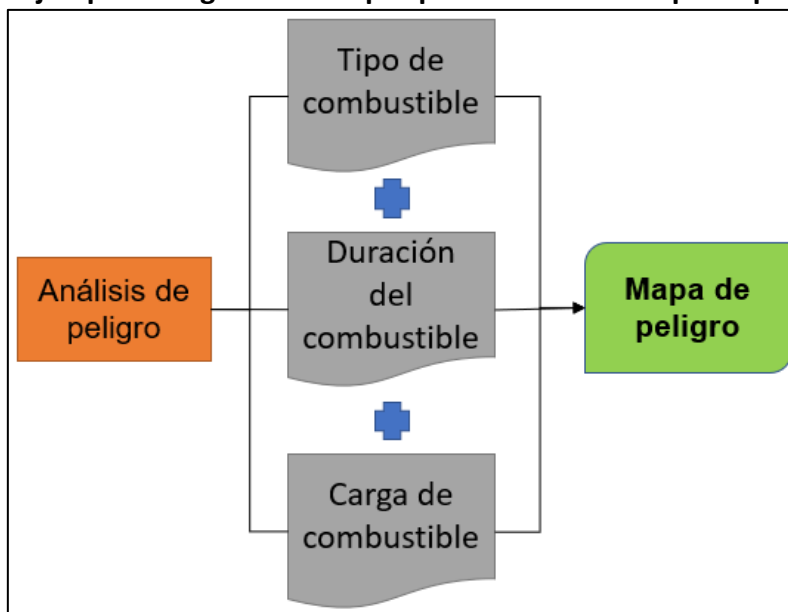
<b>Criterio</b>	<b>Variable</b>	<b>Concepto</b>	<b>Ponderación</b>
Peligro	Tipo de combustible	No combustible	0
		Bosques	1
		Arbustos	2
		Herbáceas	3
		Pastos	4
	Duración del combustible	No combustible	0
		Áreas verdes urbanas / pastos limpios	1
		Arbustos abiertos/arbustos	2
	Carga de combustible	Bosques densos	3
		No combustible	0
		<1 ton/há	1
		1-50 ton/Ha	2
50 a 100 ton/Ha		3	
Riesgo	Proximidad de edificios	>100 ton/ha	4
		0-100 m	4
		101-250 m	3
		251-500 m	2
	Proximidad de vías	> 500 m	1
		0-100 m	4
		101-250 m	3
	Ocurrencia histórica (proximidad)	251-500 m	2
		> 500 m	1
		0-100 m	3
Pendiente	101-200 m	2	
	>200 m	1	
	>55%	4	
	30-54%	3	
Valor	Zonificación	6-30%	2
		1-5%	1
		Zona de Preservación	3
		Zona de Conservación	3
		Zona de Adecuación Ambiental	2
		Zona de Uso Moderado	1

**Fuente:** Elaborada por el autor (2024).

### 2.3 Algebra de mapas

En esta fase, una vez obtenidos los intervalos de ponderación de cada variable, se representan cartográficamente sumando la ponderación de cada variable (Figura 3). El resultado final integra las evaluaciones de peligro, riesgo y valor (Flores Garnica *et al.*, 2018a).

**Figura 3: Ejemplo de álgebra de mapas para obtener el mapa de peligrosidad**



Fuente: Elaborada por el autor (2024).

Asimismo, se integran los tres mapas (peligro, riesgo y valor) y mediante una superposición ponderada, se obtienen cuatro escenarios, por ejemplo, el primero cuando los tres criterios tienen la misma importancia (33,33%), el segundo cuando el mapa de peligro tiene una importancia del 50%, el tercero cuando el mapa de riesgo tiene una importancia del 50% y el cuarto cuando el mapa de valor tiene una importancia del 50%. Esto se hace con el fin de observar la influencia de los criterios seleccionados. Por último, se definen clases de ponderación para identificar las zonas prioritarias. Los valores integrados de estos criterios se clasifican en tres niveles por intervalos iguales: Alto, medio y bajo. Las zonas de prioridad alta se muestran en tonos rojos, las de prioridad media en amarillo y las de prioridad baja en tonos verdes.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

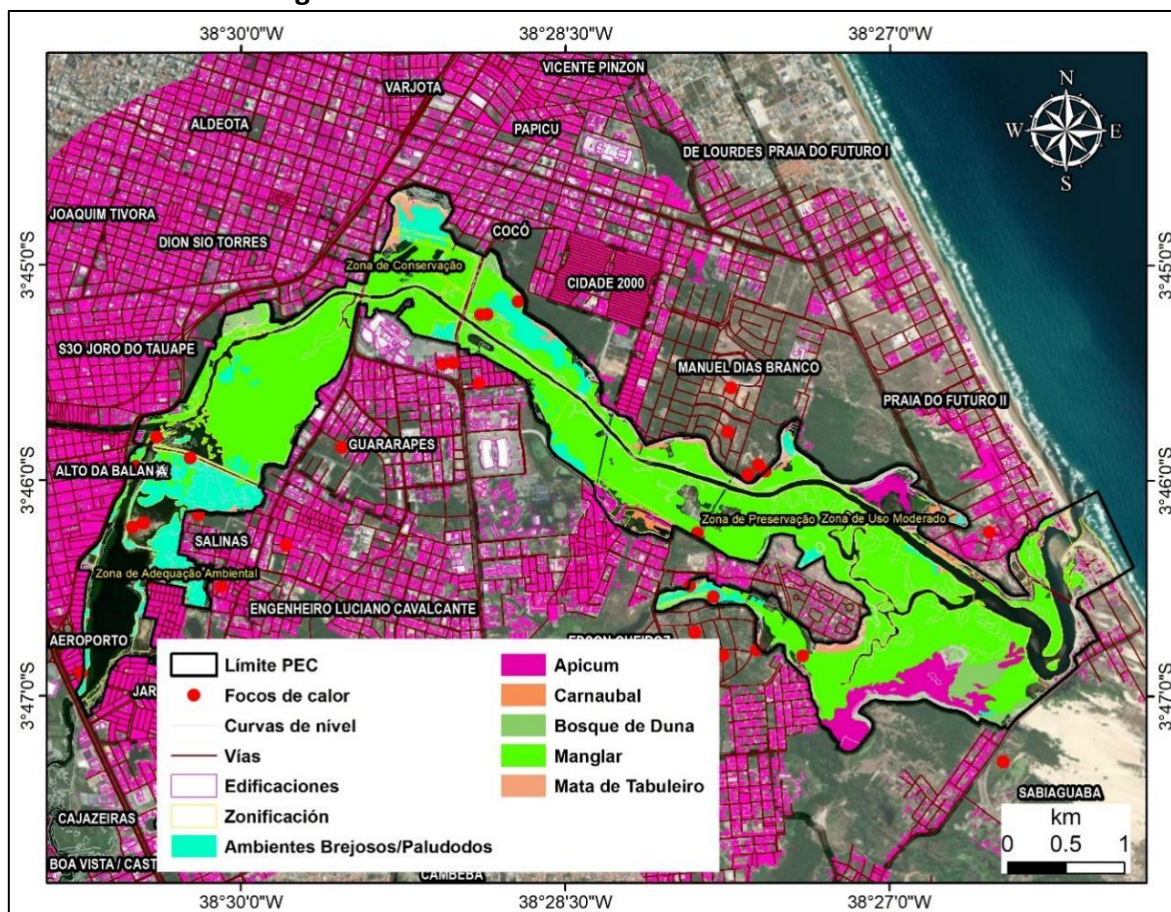
#### 3.1 Fuentes de información

En cuanto a la cobertura, se encontró un total de 749,55 ha relacionadas con algún tipo de combustible vegetal (Figura 4). Los manglares representaban el 71,61% del total, seguidos de las marismas y los brejos (pantanos) con el 14,13%. El apicum y la vegetación de dunas representaron el 5,69% y el 4,81% respectivamente, mientras que, en menor medida, hubo presencia de carnaubal con un 0,84%. En cuanto a la proximidad de edificios en un radio de 500 metros del límite del PEC, fue posible identificar al menos 39.991 propiedades, así como la existencia de 2.630 carreteras cercanas



del PEC. En cuanto a la ocurrencia histórica de incendios, se registraron 35 focos desde 2000, hasta mediados de 2024, de los cuales el 40% (14) se produjeron dentro del PEC. En la zonificación se encontraron 595,82 ha destinadas a la preservación, 172,22 ha a la adaptación ambiental, así como 74,12 ha y 60,96 ha destinadas al uso moderado y a la conservación, respectivamente.

**Figura 4: Fuentes de información cercanas al PEC**



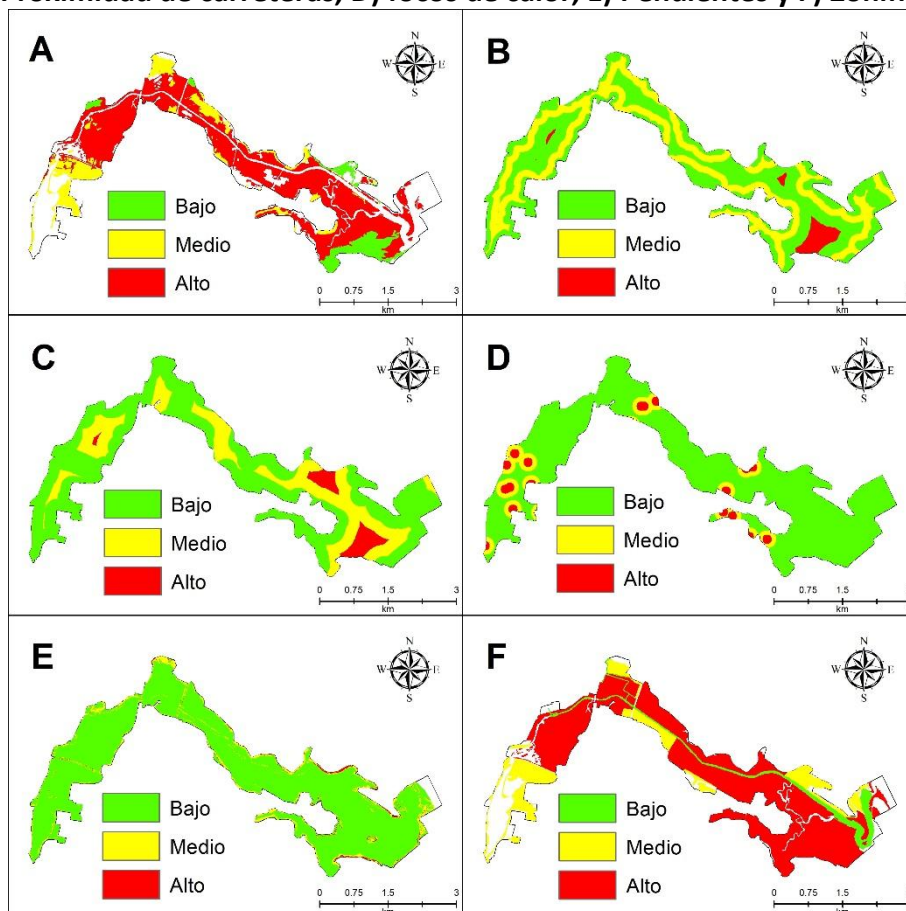
Fuente: Elaborada por el autor (2024).

### 3.2 Criterios y ponderación

Para la variable combustible, aproximadamente 79,77 ha presentaron un nivel de peligro bajo, 128,21 ha un nivel medio y 551,48 ha un nivel de peligro alto, principalmente asociado a la cobertura de manglar (Figura 5A). En cuanto a la proximidad a edificios, sólo 45,11 ha presentaron un nivel de peligro alto en la zona oriental del PEC (Figura 5B). Del mismo modo, la proximidad a carreteras representaba sólo 58,95 ha de alto riesgo (Figura 5C). Por otro lado, los focos de calor representaban 39,44 ha de alto riesgo (Figura 5D), localizados principalmente al oeste del PEC. Las

pendientes representaron 11,71 ha de alto riesgo (Figura 5E). Por último, 656,99 ha representaban un alto valor asociado a las zonas de preservación y conservación (Figura 5F).

**Figura 5: Criterios y ponderación de las variables del PEC. A) Combustibles, B) Proximidad de edificios, C) Proximidad de carreteras, D) focos de calor, E) Pendientes y F) Zonificación (valor)**



Fuente: Elaborada por el autor (2024).

### 3.3 Algebra de mapas

Los resultados de cada escenario se muestran en la Figura 6. Para el escenario que tenía la misma influencia en los tres criterios (744,02 ha), se obtuvieron un 0,95% (baja), un 78,26% (media) y un 20,79% (alta) de áreas de alta prioridad. Cabe destacar que el barrio Edson Queiroz presentó un 39,25% de áreas de prioridad alta, localizadas en el nordeste del barrio, a lo largo del límite que separa el PEC (Figura 6A). Por otro lado, los barrios de Aerolandia y Salinas tenían 8,95% y 14,98% de áreas de alta prioridad respectivamente, localizadas al oeste a lo largo de la frontera del PEC.

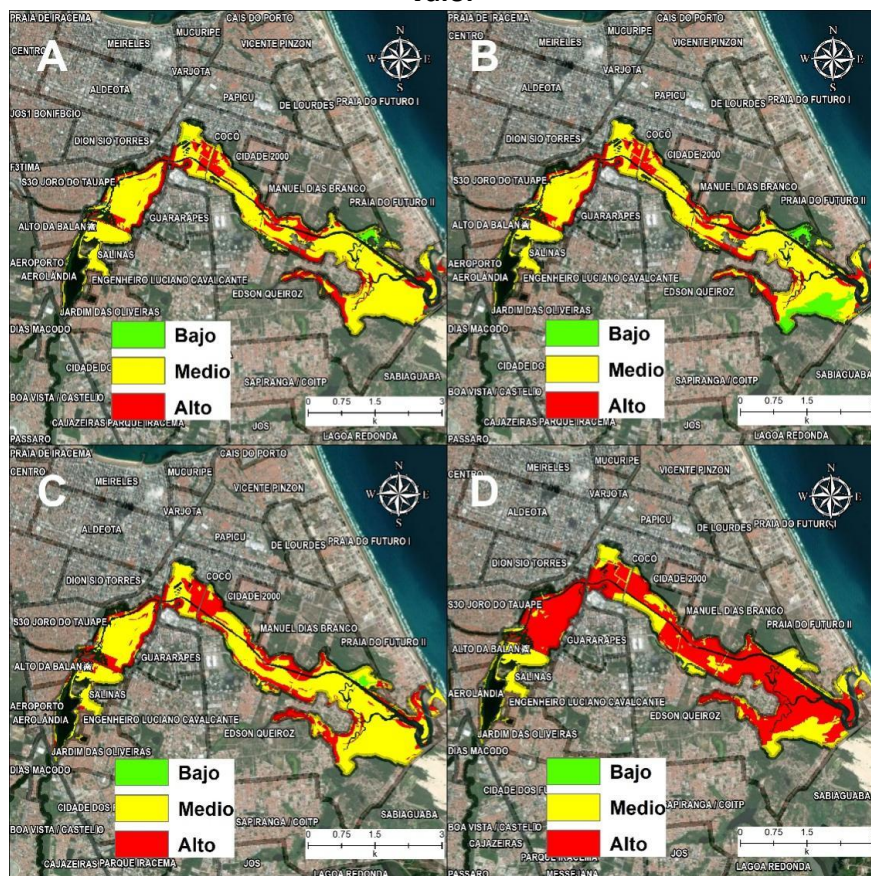
Para el escenario que obtuvo un 50% de prioridad en el criterio de peligro (744,28 ha), se obtuvieron un 8,34% (baja), un 71,35% (media) y un 20,29% (alta) de áreas prioritarias. El barrio de Edson Queiroz presentaba un 39,64% de áreas de prioridad alta, situadas en el nordeste del barrio,

a lo largo del límite del PEC (Figura 6B). Además, los barrios de Aerolandia y Salinas tenían un 8,95% y un 14,98% de áreas de alta prioridad, respectivamente, a lo largo de la frontera del PEC.

Por otro lado, para el escenario que obtuvo 50% de prioridad en el criterio de riesgo (819,28 ha), se obtuvieron 0,79% (baja), 71,82% (media) y 27,37% (alta) de áreas prioritarias. Destaca el barrio de Edson Queiroz, que obtuvo un 36,01% de áreas de prioridad alta, principalmente en el noreste y centro-norte del barrio, a lo largo del límite del PEC (Figura 6C). También destaca el barrio de Salinas, con el 13,60% de las áreas de alta prioridad situadas a lo largo del límite del PEC.

Para el escenario que obtuvo un 50% de prioridad en el criterio de valor (819,52 ha), se obtuvieron un 0,10% (baja), un 35,37% (media) y un 64,51% (alta) de áreas prioritarias. El barrio de Edson Queiroz tuvo un 36% de áreas de prioridad alta, abarcando todo el límite norte del barrio a lo largo de los límites del PEC (Figura 6D). El barrio de Salinas tenía un 13,60% de áreas de prioridad alta, principalmente dentro del PEC.

**Figura 6: Identificación de áreas prioritarias contra incendios forestales del PEC. A) Igual ponderación, B) 50% ponderación peligro, C) 50% ponderación riesgo y D) 50% ponderación valor**



Fuente: Elaborada por el autor (2024).

La identificación de las cubiertas indicó la importancia de los manglares (71,61% del total) en la estructura del PEC; estos ecosistemas se consideran sensibles al fuego debido a que la mayoría de las especies no disponen de estrategias de adaptación a este fenómeno. Además, estos ecosistemas presentan condiciones microclimáticas que limitan la ignición y propagación natural del fuego (Parra-Lara; Bernal-Toro, 2010). Del mismo modo, el brejo se encuentra en zonas que normalmente están inundadas la mayor parte del tiempo. Sin embargo, durante la estación seca, debido a las condiciones de sequía, se convierten en el combustible ideal para la ignición (FUNCAP, 2024). Por ejemplo, hay constancia de que estas zonas se han visto afectadas por incendios durante los periodos de menor pluviosidad en el PEC (Perea-Ardila; Muñoz, 2024; Perea-Ardila; Muñoz; Sopchaki, 2023).

Por otro lado, la alta densidad de edificios y carreteras circundantes en el PEC representa un mayor riesgo de interacción humana con el ecosistema, aumenta la accesibilidad y potencialmente el riesgo de incendios forestales. La mayoría de los incendios forestales (95%) son causados por el hombre y la frecuencia de los incendios tiende a correlacionarse positivamente con la densidad de población y de carreteras (Mohammed *et al.*, 2022; Syphard *et al.*, 2007; Syphard; Keeley, 2015).

Además, una proporción significativa (40%) de los puntos calientes se produjo dentro de los límites del PEC, lo que podría indicar que el PEC es especialmente vulnerable a los incendios forestales. Estudios como el de Ferreira Filho y Costa Araújo, (2021) señalaron que el PEC ha sufrido históricamente un gran número de incendios. El PEC cuenta con un plan de gestión y una zonificación de manejo donde cada zona tiene características únicas, grados específicos de protección y probabilidades de intervención humana (Pasquini, 2020). Sin embargo, a pesar de que este plan prohíbe las quemas dentro de los límites del PEC, estas actividades se llevan a cabo con frecuencia dentro y en los alrededores del PEC (Ferreira Filho; Costa Araújo, 2021).

El análisis de los criterios y ponderaciones asociados a los combustibles puso de manifiesto la alta peligrosidad de los mismos; se destacó la vulnerabilidad de estos ecosistemas a una alta probabilidad de quema, propagación y duración de los incendios forestales. El mayor peligro para estos combustibles está en la segunda mitad del año, cuando las escasas precipitaciones crean un entorno favorable para la sequía, lo que hace que los combustibles sean más vulnerables al fuego (Ferreira Filho; Costa Araújo, 2021). En términos de riesgo, el PEC es una zona crítica que históricamente se ha visto afectada por fuegos activos. Este estudio identificó que el valor ecológico

del PEC es considerablemente alto, con zonas identificadas como esenciales para la biodiversidad y la integridad ecológica (Pasquini, 2020).

Por otra parte, la aplicación de escenarios orientados según los criterios de este estudio, puso en constancia que las zonas críticas requieren una atención prioritaria en la gestión y la conservación del PEC. El uso de la superposición ponderada se utiliza ampliamente en el cálculo de ponderaciones numéricas y la previsión de escenarios para identificar las áreas prioritarias (Djabri *et al.*, 2023). En todos los escenarios, el barrio de Edson Queiroz presentó repetidamente zonas de alta prioridad para la protección contra incendios, especialmente en su frontera con el PEC. Esto indica la necesidad de desarrollar estrategias específicas de gestión y prevención para esta zona. Además, la variabilidad de las zonas de alta prioridad en los distintos escenarios pone de manifiesto la importancia de considerar múltiples criterios en la gestión integrada de los incendios forestales (Abedi, 2022). La alta prioridad de las zonas dentro del PEC, especialmente bajo el criterio del valor, subraya la necesidad de proteger estos valiosos ecosistemas de los incendios forestales.

Asimismo, es crucial la aplicación de una vigilancia de los puntos críticos centrada en el seguimiento preventivo. Es esencial desarrollar sistemas de alerta temprana e intervenciones coordinadas para proteger tanto las zonas ecológicas como las cercanas a infraestructuras humanas (Carta *et al.*, 2023). Estos resultados ponen de relieve la importancia de un planteamiento polifacético que tenga en cuenta las diversas fuentes de peligro, riesgo y valores ecológicos del PEC. La identificación de las zonas prioritarias es fundamental para una asignación eficiente de los recursos y la aplicación de estrategias de conservación más eficaces ante el aumento de los incendios forestales (Gutiérrez López *et al.*, 2019). Este tipo de planteamientos han tenido éxito en otros países, utilizando herramientas tecnológicas como los SIG (Flores Garnica *et al.*, 2018a; Gai; Weng; Yuan, 2011; Gigović *et al.*, 2018; Jaiswal *et al.*, 2002).

#### 4. CONSIDERACIONES FINALES

Se identificaron áreas prioritarias para la protección contra los incendios forestales del PEC, este método permitió establecer zonas de atención prioritaria. Los manglares y los humedales son extremadamente vulnerables a los incendios, ya que estos ecosistemas carecen de mecanismos de adaptación contra el fuego y presentan condiciones microclimáticas que dificultan que el fuego aparezca y se propague de forma natural. Durante la estación seca, estas zonas se vuelven

altamente inflamables, aumentando significativamente el riesgo de incendios forestales. La alta densidad de edificios y carreteras cercanas del PEC aumenta la interacción humana, lo que incrementa el riesgo de que se produzcan incendios forestales. El hecho de que el 40% de los focos se encontraran dentro del PEC pone de manifiesto la vulnerabilidad del PEC a los incendios. Estos resultados subrayan la necesidad de desarrollar estrategias específicas de gestión y prevención para proteger tanto las áreas ecológicas como las zonas adyacentes a las infraestructuras humanas, especialmente en los límites con el barrio de Edson Queiroz. El PEC tiene un alto valor ecológico, con zonas cruciales para la biodiversidad y la integridad ecológica. Es esencial aplicar medidas preventivas de vigilancia y seguimiento. Un enfoque integrado de la gestión de incendios que tenga en cuenta múltiples criterios y escenarios es fundamental para la asignación eficaz de recursos y la protección de estos valiosos ecosistemas ante el creciente riesgo de incendios forestales en el futuro.

Para mejorar el análisis de incendios forestales, se recomienda mejorar la calidad y actualización de los datos, asegurando que estén en la escala adecuada. Además, los criterios de ponderación de las variables pueden ser subjetivos, ya que expertos diferentes pueden asignar ponderaciones distintas. Esto puede causar variaciones en las áreas prioritarias. Es crucial considerar variables no incluidas, como por ejemplo actividades humanas no registradas y el cambio climático, que pueden influir en la dinámica de los incendios. Incluir estos factores mejoraría la precisión del análisis y la identificación de zonas críticas.

## AGRADECIMENTOS

El autor agradece a la Fundación Cearense de Apoyo al Desarrollo Científico y Tecnológico (FUNCAP) por la beca concedida en el marco del programa de doctorado en Geografía de la Universidad Federal de Ceará - UFC, Brasil y la convocatoria de la Primera Edición del Programa de Movilidad Internacional 001/2022 del GCUB.

## REFERENCIAS

ABEDI, R. Application of multi-criteria decision-making models to forest fire management. *International Journal of Geoheritage and Parks*, Beijing, v. 10, n. 1, p. 84–96, 2022.

BRANCO, K. **Microclimas e áreas verdes na cidade de Fortaleza - CE**. 2014. 212f. Disertación (Maestría en Geografía) - Programa de Posgrado en Geografía, Universidad Federal de Ceará,

Fortaleza, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/20229> Acessado el: 19 ago. 2024.

CARTA, F.; ZIDDA, C.; PUTZU, M.; LORU, D.; ANEDDA, M.; GIUSTO, D. Advancements in forest fire prevention: a comprehensive survey. **Sensors**, Basel, v. 23, n. 14, 2023.

COSTA, E.; FIEDLER, N.; MEDEIROS, M.; WANDERLEY, F. Incêndios florestais no entorno de unidades de conservação - Estudo de caso na Estação Ecológica de Águas emendadas, distrito federal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 195–206, 2009.

DJABRI, A.; BOUHATA, R.; GUELLOUH, S.; BENSEKHRIA, A. Wildfire vulnerability assessment and mapping using remote sensing, gis and weighted overlay method in the eastern aures in Khenchela, Algeria. **Geoadria**, Zadar, v. 28, n. 2, p. 191–210, 2023.

DONG, X.; LI-MIN, D.; GUO-FAN, S.; LEI, T.; HUI, W. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. **Journal of Forestry Research**, Harbin, v. 16, n. 3, p. 169–174, 2005.

FERREIRA FILHO, J. E; COSTA ARAÚJO, A. Análise de ocorrências de incêndios florestais na área do Parque Estadual do Cocó, região metropolitana de Fortaleza, CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 3, p. 563–569, 2021.

FLORES-GARNICA, J.; CASILLAS DÍAZ, U.; MACÍAS MURO, A. **Memorias del quinto simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los incendios forestales: servicios ambientales e incendios forestales**. Albany: Departamento de Agricultura dos EUA, 2019.

FLORES GARNICA, J.; CASILLAS DÍAZ, U.; GARCIA BERNAL, J.; FLORES RODRÍGUEZ, G.; LOMELÍ ZAVALA, M. **Cartografía estatal de áreas prioritarias contra incendios forestales en la república mexicana**. Guadalajara: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2018a.

FLORES GARNICA, J.; BENAVIDES SOLORIO, J.; CASTILLAS DÍAZ, U.; HERNÁNDEZ NAVARRO, M.; LEAL AGUAYO, H. **Manual para la elaboración de mapas de riesgo de incendios forestales**. Guadalajara: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2016a.

FLORES GARNICA, J.; BENAVIDES SOLORIO, J.; CASTILLAS DÍAZ, U.; LEAL AGUAYO, H. **Manual para la elaboración de mapas de valor de incendios forestales**. Guadalajara: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2016b.

FLORES GARNICA, J.; BENAVIDES SOLORIO, J.; CASTILLAS DÍAZ, U.; LEAL AGUAYO, H.; GALLEGOS RODRÍGUEZ, A.; HERNÁNDEZ ÁLVAREZ, E. **Manual para la elaboración de mapas de peligro de incendios forestales usando arcgis 10**. Guadalajara: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2018b.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO (FUNCAP). RestauraCocó - **Restauração ecológica e gestão participativa da área incendiada do Parque**

**Estadual do Cocó.** Fortaleza, 2024. Disponible en: [https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2024/04/RESTAURACOCO\\_11-04-24.pdf](https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2024/04/RESTAURACOCO_11-04-24.pdf). Accedido el: 19 ago. 2024

GAI, C.; WENG, W.; YUAN, H. **GIS-based forest fire risk assessment and mapping.** In: 2011 Fourth International Joint Conference On Computational Sciences And Optimization 2011, Kunming. Anais [...]. Kunming: IEEE, 2011. p. 1240–1244.

GIGOVIĆ, L.; JAKOVLJEVIĆ, G.; SEKULOVIC, D.; REGODIĆ, M. GIS multi-criteria analysis for identifying and mapping forest fire hazard: nevesinje, Bosnia and Herzegovina. **Tehnicki vjesnik**, Slavonski Brod, v. 25, n. 3, p. 891–897, 2018.

GUTIÉRREZ LÓPEZ, L.; LOPEZ BAUTISTA, O.; ORTIZ BARRIOS, R.; GARZÓN TRINIDAD, A.; LEMUEL CRUZ SANTIAGO, O. Zonificación de áreas prioritarias de protección contra incendios forestales en San Esteban Atlatluha, Oaxaca. **Revista Mexicana de Agroecosistemas**, Santa Cruz Xoxocotlán, v. 6, n. 1, p. 57–66, 2019.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). **Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000/ajustado**, Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales 2011.

JAIWAL, R.; MUKHERJEE, S.; RAJU, K.; SAXENA, R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdã, v. 4, n. 1, p. 1–10, 2002.

JUVANHOL, R.; FIEDLER, N.; DOS SANTOS, A.; DA SILVA, G.; OMENA, M.; EUGENIO, F.; PINHEIRO, C.; FILHO, A. Gis and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, Rio de Janeiro, v. 93, p. 1–18, 2021.

MATAVELI, G.; SILVA, M.; PEREIRA, G.; DA SILVA CARDOZO, F.; SHINJI KAWAKUBO, F.; BERTANI, G.; CEZAR COSTA, J.; DE CÁSSIA RAMOS, R.; DA SILVA, V. Satellite observations for describing fire patterns and climate-related fire drivers in the Brazilian savannas. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Munich, v. 18, n. 1, p. 125–144, 2018.

VASCONCELOS, F.; BASTOS MOTA, F.; NOBRE RABELO, N.; DANTAS CAVALCANTE R.; DE MIRANDA MENESCAL, L. Gestão e legislação ambiental das unidades de conservação inseridas no município de Fortaleza/CE. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, 2019. p. 1–6. Disponible en: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/VI-051.pdf> Accedido el: 25 ago. 2024.

MOHAMMED, O.; VAFAEI, S.; KURDALIVAND, M.; RASOOLI, S.; YAO, C.; HU, T. A comparative study of forest fire mapping using gis-based data mining approaches in western Iran. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 20, 2022.

MORELLI, F.; SETZER, A.; CRISTINA, S. Focos de queimadas nas unidades de conservação e terras indígenas do pantanal, 2000-2008. **Geografia**, Rio Claro, v. 34, p. 681–695, 2009.



ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). **Nuestros Bosques Siguen Quemándose.** Quito, 2023. Disponible en: <https://www.fao.org/3/cc6237es/cc6237es.pdf>. Accedido el: 25 jul. 2024.

PARRA-LARA, Á.; BERNAL-TORO, F. Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. **El Hombre y la Máquina**, Cali, n. 35, p. 67–81, 2010.

PASQUINI, B. **Plano de manejo do Parque Estadual do Cocó.** Fortaleza, 2020. Disponible en: [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). Accedido el: 12 jul. 2024

PEREA-ARDILA, M.; MUÑOZ, S. Caracterização de uma nova queimada utilizando sensoriamento remoto do Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza/CE, Brasil. **SciELO Preprints**, 2024. Disponible en: <https://preprints.scielo.org/index.php/scielo/preprint/view/9123/17050>. Accedido el: 10 ago. 2024

PEREA-ARDILA, M.; MUÑOZ, S.; SOPCHAKI, C. Análise de áreas queimadas utilizando imagens Sentinel-2 no Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza (Ceará). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, Recife, v. 4, n. 3, p. 67–83, 2023.

PEREIRA, C.; FIEDLER, N.; DE MEDEIROS, M. Análise de ações de prevenção e combate aos incêndios florestais em unidades de conservação do cerrado. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 2, p. 95–100, 2004.

PINTO, D.; SPLETOZER, A.; BARBOSA, S.; LIMA, G.; TORRES, C.; TORRES, F. Periods of highest occurrence of forest fires in Brazil. **Floresta**, Curitiba, v. 51, n. 2, p. 484–491, 2021.

SANTORO, M.; CARTUS, O. **ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass\_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the years 2010, 2017, 2018, 2019 and 2020, v4.** Centre for Environmental Data Analysis, 2023. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.5285/af60720c1e404a9e9d2c145d2b2ead4e>. Accedido el: 09 ago. 2024

Superintendência Estadual do Meio Ambiente - SEMA. **Unidades de Conservação (UCs)** – Acervo. 2023. Disponible en: <https://www.sema.ce.gov.br/unidades-de-conservacao-2/>. Accedido el: 02 ago. 2024

SOUSA, É.; SANTOS, F. O processo de implantação do Parque Estadual do Cocó, Fortaleza (CE): conflitos e perspectivas. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v. 2, p. 781–790, 2016.

SYPHARD, A.; KEELEY, J. Location, timing and extent of wildfire vary by cause of ignition. **International Journal of Wildland Fire**, Clayton, v. 24, n. 1, p. 1-11, 2015.

SYPHARD, A.; RADELOFF, V.; KEELEY, J.; HAWBAKER, T.; CLAYTON, M.; STEWART, S.; HAMMER, R. Human influence on California fire regimes. **Ecological Applications**, Washington, v. 17, n. 5, p. 1388–1402, 2007.

SZPAKOWSKI, D; JENSEN, J. A review of the applications of remote sensing in fire ecology. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 22, p. 1–31, 2019.

*Artigo submetido em: 10/09/2024*

*Artigo aceito em: 04/11/2024*

*Artigo publicado em: 30/12/2024*