

Análisis de superficies quemadas por incendios forestales en sitios RAMSAR en la provincia de Entre Ríos, Argentina, a través de tecnología satelital, durante el período de verano 2021-2022

Análise de superfícies queimadas por incêndios florestais em sítios RAMSAR na província de Entre Ríos, Argentina, através de tecnologia de satélite, durante o período de verão 2021-2022

Analysis of surfaces burned by forest fires in RAMSAR sites in the province of Entre Ríos, Argentina, through satellite technology, during the summer period 2021-2022

Cielo Milagros Boffelli, Rosana Silvina Bonnin

Facultad de Ciencias de la Salud - Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

Cita: Boffelli CM, Bonnin RS. Análisis de superficies quemadas por incendios forestales en sitios RAMSAR en la provincia de Entre Ríos, Argentina, a través de tecnología satelital, durante el período de verano 2021-2022. Rev. Salud ambient. 2025; 25(1):32-41.

Recibido: 29 de enero de 2024. **Aceptado:** 26 de febrero de 2024. **Publicado:** 15 de junio de 2025.

Autor para correspondencia: Cielo Milagros Boffelli.
Correo e: cielo.boffelli@uner.edu.ar

Financiación: Ninguna.

Declaración de conflicto de intereses: Sin conflicto de intereses.

Declaraciones de autoría: Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final.

Resumen

Los incendios forestales repercuten sobre la diversidad biológica mediante la disminución de biomasa y modificación del comportamiento de especies animales y vegetales. Asimismo, el humo reduce notablemente la actividad fotosintética, afectando a la salud humana y animal.

El enfoque de la investigación es de carácter cuantitativo con alcance descriptivo. Para cumplir los objetivos propuestos se emplearon las nuevas Tecnologías de Información Geográfica (TIG's): teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y bases de datos espaciales y temáticas disponibles en la web.

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo identificar y caracterizar las áreas afectadas por incendios forestales y analizar su evolución posterior, a través de tecnología satelital, durante la época de verano 2021-2022 en sitios RAMSAR de la provincia de Entre Ríos, Argentina.

En primera instancia se realizó una caracterización ambiental del área de estudio a partir de bases de datos web. Luego se identificaron los focos de calor a partir del mapa mundial sobre incendios de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Posteriormente se descargaron y procesaron imágenes satelitales de diferentes fechas del periodo de estudio y se emplearon diferentes índices como el Índice Normalizado de Áreas Quemadas (NBR) y la determinación del grado de severidad de incendios forestales.

Los resultados de este estudio podrán ser empleados para comparar con las próximas temporadas de incendios forestales y analizar el avance de este fenómeno sobre nuestra superficie y qué medidas pueden tomarse para su control y posibles sistemas de alerta temprana.

Palabras claves: Sitios RAMSAR; teledetección; incendios forestales; áreas quemadas.

Resumo

Os incêndios florestais impactam a diversidade biológica através da diminuição da biomassa e da modificação do comportamento das espécies animais e vegetais. Da mesma forma, o fumo reduz significativamente a atividade fotossintética, afetando a saúde humana e animal.

A abordagem da investigação é de natureza quantitativa com âmbito descritivo. Para dar resposta aos objetivos propostos foram utilizadas as novas Tecnologias de Informação Geográfica (TIGs): detecção remota, sistemas de informação geográfica (SIG) e bases de dados espaciais e temáticas disponíveis na web.

O objetivo deste trabalho de investigação é identificar e caracterizar as áreas afetadas pelos incêndios florestais e analisar a sua evolução posterior, através da tecnologia de satélite, durante a época de verão 2021-2022 em sítios RAMSAR na província de Entre Ríos, Argentina.

Num primeiro momento, foi realizada uma caracterização ambiental da área de estudo através de bases de dados web. As fontes de calor foram então identificadas no mapa mundial de incêndios da Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA).

Posteriormente, foram descarregadas e processadas imagens de satélite de diferentes datas do período de estudo e utilizados diferentes índices como o Índice Normalizado de Áreas Queimadas (NBR) e a determinação do grau de severidade dos incêndios florestais.

Os resultados deste estudo podem ser usados para comparar com as próximas épocas de incêndios florestais e analisar a evolução deste fenómeno na nossa superfície e que medidas podem ser tomadas para o seu controlo e possíveis sistemas de alerta precoce.

Palavras-chave: Sítios RAMSAR; sensoriamento remoto; incêndios florestais; áreas queimadas.

Abstract

Forest fires impact biological diversity through a decrease in biomass and modification of the behavior of animal and plant species. Likewise, smoke significantly reduces photosynthetic activity, affecting human and animal health.

The research approach is quantitative in nature with descriptive scope. To meet the proposed objectives, the new Geographic Information Technologies (TIGs) were used: remote sensing, geographic information systems (GIS) and spatial and thematic databases available on the WEB.

The objective of this research work is to identify and characterize the areas affected by forest fires and analyze their subsequent evolution, through satellite technology, during the 2021-2022 summer season in RAMSAR sites in the province of Entre Ríos, Argentina.

In the first instance, an environmental characterization of the study area was carried out using web databases. Heat sources were then identified from the National Aeronautics and Space Administration (NASA) world fire map.

Subsequently, satellite images from different dates of the study period were downloaded and processed and different indices were used such as the Normalized Index of Burned Areas (NBR) and the determination of the degree of severity of forest fires.

The results of this study can be used to compare with upcoming forest fire seasons and analyze the progress of this phenomenon on our surface and what measures can be taken for its control and possible early warning systems.

Keywords: RAMSAR sites; remote sensing; forest fires; burned areas.

INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años, el desarrollo de las sociedades implica un aumento en los patrones de consumo alimentario, energético y formas de vida. La deforestación de áreas naturales para generar monocultivos y ganadería es una de las actividades humanas más críticas para los ecosistemas y hábitats, pero necesarias para los cambios constantes en el desarrollo de la sociedad.

A su vez, estos impactos contribuyen al cambio climático, dando lugar a eventos extremos como sequías y cambios en la temperatura, garantizando las condiciones óptimas para el desarrollo de incendios forestales.

Estos aspectos generan un proceso de retroalimentación positiva, donde el calentamiento global facilita el desarrollo de incendios forestales y estos fenómenos contribuyen al calentamiento global. Tal como afirma Niklas Hagelberg¹, experto en cambio climático del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el aumento de la temperatura promedio, cambios de patrones de lluvia, cambios en comunidades de plantas y el incremento de la evaporación hace que las sequías tengan mayor duración y la frecuencia e intensidad de los incendios aumente.

Como consecuencia de los incendios forestales, se generan tanto pérdidas ambientales como económicas. En términos ambientales, se producen alteraciones en los procesos naturales de las áreas boscosas, pérdida de

la fertilidad del suelo y una reducción significativa de los sumideros de carbonoⁱ, perjudicando la salud de las personas y animales. La pérdida de fertilidad se debe a la combustión de la materia orgánica del suelo, lo que reduce el contenido de nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo. Además, las alteraciones de la estructura del suelo pueden incrementar la erosión y dificultar la retención de agua, afectando la recuperación de la vegetación y la productividad del ecosistema. En algunos casos, los incendios también pueden tener efectos positivos, como la liberación de nutrientes retenidos en la biomasa (cenizas) y la eliminación de especies invasoras que compiten con la vegetación nativa.

En las últimas décadas, los avances en la tecnología de información geográfica (TIG) han sido favorecidos por nuevas fuentes de información y análisis como la teledetección, la cual cumple un papel importante para el seguimiento de recursos naturales, cambio climático y el impacto de los desastres naturales.

Para la detección de incendios forestales, la teledetección y los SIG se convirtieron en la alternativa más rápida y económicamente viable, permitiendo la obtención de información para identificar áreas quemadas a escalas locales, regionales y globales. Para analizar diferentes aspectos relacionados con los incendios forestales, como la identificación de áreas afectadas y la evaluación de la severidad, se desarrollan índices basados en la respuesta espectral de la vegetación quemada. Entre los más utilizados se encuentran el Índice Normalizado de Área Quemada (NBR, por sus siglas en inglés) y el Índice de Severidad de Incendios (dNBR)ⁱⁱ.

Los sitios RAMSAR son áreas de importancia internacional reconocidas bajo el marco del Convenio sobre los Humedales, un tratado intergubernamental establecido en 1971 que busca la conservación y el uso racional de estos ecosistemas. Esta designación implica que las zonas incluidas cuentan con un respaldo legal a nivel internacional, comprometiendo a los países firmantes a implementar medidas de protección y manejo sostenible. En este contexto, el área de estudio al estar identificada como un sitio RAMSAR adquiere una relevancia especial, ya que la protección de estos humedales no solo contribuye a la preservación de su

biodiversidad, sino que también promueve el bienestar de las comunidades locales que dependen de ellos. Esto incluye la adopción de estrategias efectivas para prevenir y controlar los incendios forestales.

En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo principal identificar y caracterizar las áreas afectadas por incendios forestales y analizar su evolución posterior, a través de tecnología satelital, durante la época de verano 2021-2022 en sitios RAMSAR de la provincia de Entre Ríos, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo es de carácter cuantitativo con alcance descriptivo. Se emplearon técnicas como la teledetección, sistemas de información geográfica y bases de datos espaciales y temáticas disponibles en la web.

1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En primera instancia se descargaron capas vectoriales de los sitios RAMSAR de la página oficial de la Secretaría de Ambiente de la provincia de Entre Ríos.

La ley provincial 10 479 clasifica las áreas naturales en las siguientes categorías según sus modalidades de conservación, utilidad e intervención del Estado: Parques Naturales, Monumentos Naturales, Reservas Naturales Culturales, Reservas de Usos Múltiples, Paisajes Protegidos, Reservas Naturales Estrictas, Reservas ícticas y la red de sitios RAMSAR. Al hablar de estos últimos, en la provincia de Entre Ríos se reconocen dos humedales: Delta del Paraná y Palmar Yatay.

2. TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG

Se descargaron focos de calor del sistema de información sobre incendios para la gestión de recursos (FIRMS) de la NASA. Este visor de incendios o mapa señala con puntos rojos las últimas incidencias en el mundo como así también los focos históricos. A nivel mundial, estos datos están disponibles dentro de las 3 horas posteriores a la observación por satélite.

Los datos fueron descargados en formato de capa vectorial de puntos (*shapefile*), para el verano 2021-2022, es decir desde el 21 de diciembre de 2021 a 20 de marzo de 2022.

Luego, se obtuvieron imágenes satelitales (tabla 1) del servicio EOS Data Analytics llamado LandViewer y del explorador terrestre de Copernicus, de la Agencia Espacial Europea de la plataforma "Sentinel Hub", captadas por el satélite S2A y otras por el satélite S2B. La selección

ⁱ La Convención Marco de Naciones Unidas Sobre Cambio Climático define el concepto sumidero como cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera.

ⁱⁱ Para más información sobre estos índices visite la página web de la [Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre, portal de conocimientos ONU-SPIDER](#).

Tabla 1: Imágenes Sentinel 2 empleadas para el estudio

Imágenes	Fecha	Nubosidad	Número de órbita relativa
S2B_MSIL1C_20211227T140049_N0301_R067_T20HPK_20211227T154217.SAFE	27/12/2021	2,6 %	R067
S2B_MSIL1C_20211227T140049_N0301_R067_T20HQJ_20211227T154217.SAFE		52,5 %	
S2B_MSIL1C_20211227T140049_N0301_R067_T20HQB_20211227T154217.SAFE		9,8 %	
S2B_MSIL1C_20220106T140049_N0301_R067_T20HPK_20220106T154802.SAFE	06/01/2022	0 %	
S2B_MSIL1C_20220106T140049_N0301_R067_T20HQJ_20220106T154802.SAFE		0,05 %	
S2B_MSIL1C_20220106T140049_N0301_R067_T20HQB_20220106T154802.SAFE		0 %	
S2A_MSIL1C_20220210T140051_N0400_R067_T20HPK_20220210T173256.SAFE	10/02/2022	1,7 %	
S2A_MSIL1C_20220210T140051_N0400_R067_T20HQJ_20220210T173256.SAFE		0 %	
S2A_MSIL1C_20220210T140051_N0400_R067_T20HQB_20220210T173256.SAFE		0 %	
S2A_MSIL1C_20220302T140101_N0400_R067_T20HPK_20220302T155718.SAFE	02/03/2022	0 %	
S2A_MSIL1C_20220302T140101_N0400_R067_T20HQJ_20220302T155718.SAFE		0 %	
S2A_MSIL1C_20220302T140101_N0400_R067_T20HQB_20220302T155718.SAFE		0 %	
S2B_MSIL1C_20220327T140049_N0400_R067_T20HPK_20220327T173752.SAFE	27/03/2022	0 %	
S2B_MSIL1C_20220327T140049_N0400_R067_T20HQJ_20220327T173752.SAFE		0 %	
S2B_MSIL1C_20220327T140049_N0400_R067_T20HQB_20220327T173752.SAFE		0 %	
S2B_MSIL1C_20211219T135111_N0301_R024_T21HUE_20211219.SAFE	19/12/2021	0 %	R024
S2B_MSIL2A_20220113T135109_N0301_R024_T21HUE_20220113.SAFE	13/01/2022	0,02 %	
S2A_MSIL2A_20220217T135109_N0301_R024_T21HUE_20220217.SAFE	17/02/2022	0 %	
S2A_MSIL2A_20220319T135109_N0301_R024_T21HUE_20220319.SAFE	19/03/2022	0 %	

Nota. Para la elección de imágenes se tuvieron en cuenta criterios como la presencia de nubes y la cantidad de fechas que cada área de estudio requirió. El Palmar Yatay era cubierto por una imagen por fecha, mientras que el Delta se necesitaron cuatro imágenes por fecha.

de las escenas se realizó teniendo en cuenta diversos factores y criterios, aplicando filtros específicos. Se incluyeron imágenes tanto previas como posteriores a los incendios, garantizando que en ambas se registrara una cobertura nubosa inferior al 20 %. Este criterio permitió la implementación efectiva de los índices mencionados anteriormente, asegurando una identificación precisa de las áreas afectadas y su evolución posterior.

Se seleccionaron imágenes bajo un nivel de procesamiento L1C, las cuales requirieron de un preprocesamiento que incluyó la corrección atmosférica mediante el método de substracción de objeto oscuro o *Dark Object Substrction* (DOS1).

La corrección atmosférica se aplica en imágenes satelitales para eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se produce en el sensor y se ve reflejado en la imagen³. Dentro de esta etapa de preprocesamiento, se convirtieron los niveles digitales (ND) de cada banda de la imagen en valores de reflectancia. Asimismo, se realizaron procesos como mosaicos, máscaras o recortes de imágenes para el área de estudio, y compilado de bandas o *layer stack*. Las etapas de preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento de las imágenes se realizaron en QGIS versión 3.16.3 'Hannover'.

Por otra parte, mediante técnicas de interpretación visual se buscó identificar las diferentes áreas quemadas. En distintas bandas utilizadas para la interpretación, el análisis visual puede utilizar otros elementos, como la textura, estructura, emplazamiento o disposición, muy difíciles de definir en términos digitales⁴.

Para una mejor interpretación visual, se generaron composiciones color, donde asignaron colores primarios a tres bandas espectrales de una imagen. Para cada una, se generó una composición color RGB/ 12,8A,4, donde la banda NIR (infrarrojo cercano) destaca las áreas de vegetación saludable, ya que refleja mucho en esta longitud de onda, apareciendo más brillantes en el color asignado. En cambio, las áreas quemadas absorben más luz NIR, lo que hace que aparezcan más oscuras. Por otro lado, la banda SWIR (infrarrojo de onda corta) es útil para identificar zonas afectadas por incendios, ya que estas áreas reflejan más luz SWIR y se destacan con colores más brillantes en la composición.

Luego de la interpretación visual, se realizó una clasificación no supervisada de 20 clases para cada imagen empleando el algoritmo *K-means clustering for grids*.

La cantidad de clases se asignó teniendo en cuenta la cantidad de cubiertas que se esperaba encontrar en la imagen, ya que como indica Chuvieco (1995)⁵, el método

no supervisado "es un proceso interactivo, donde el usuario establece valores arbitrarios que se van modificando a la vista de los resultados".

Una vez obtenidas las clasificaciones, se realizó una reclasificación con el complemento SCP (*Plugin Semi-Automatic Classification*), donde se detallan las 20 clases en la celda de entrada y se reemplazan por nuevos valores en la celda de salida. La reclasificación permitió identificar cinco categorías de cobertura del suelo, junto con una sexta clase que representa la presencia de nubes y sombras.

- Vegetación no densa: para esta clase se tuvo en cuenta los montes abiertos, pastizales y cultivos en desarrollo.
- Agua.
- Suelo desnudo o escasa vegetación, teniendo en cuenta arena y suelo arado.
- Áreas quemadas.
- Nubes y sombras.

Finalmente se vectorizó cada *raster* resultado de las reclasificaciones para cada fecha y se combinó cada uno de ellos para obtener una sola capa vectorial con las áreas quemadas en todo el periodo de estudio.

El vector final cuya proyección cartográfica se encuentra en coordenadas planas (EPSG:5347) permite calcular la superficie en hectáreas de la clase correspondiente a áreas quemadas y mediante un resumen estadístico se obtiene la suma total de hectáreas afectadas por incendios.

3. APLICACIÓN DEL ÍNDICE NORMALIZADO DE ÁREA QUEMADA (NBR) Y SEVERIDAD DE INCENDIOS

El índice NBR se calculó aplicando una fórmula en la calculadora *Raster* del software QGIS, utilizando longitudes de onda de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). Esto se debe a que la vegetación saludable tiene alta reflectancia en el espectro NIR y muy poca reflectancia en el espectro SWIR, mientras que las áreas afectadas por el fuego presentan el patrón opuesto.

Primero, se calculó el índice NBR para cada imagen, tanto la previa como la posterior al incendio, utilizando la misma fórmula. Como último paso, en la calculadora *Raster*, se restó el NBR de la imagen previa al incendio del NBR de la imagen posterior al incendio, obteniendo así el NBR final (delta NBR) que resalta las áreas afectadas por el fuego.

Este procedimiento permite conocer la severidad del incendio, una herramienta que utiliza el índice NBR para evaluar los daños forestales o analizar la evolución de regeneración de la cubierta vegetal después de un incendio.

$$\text{NRB} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

Siendo delta *NBR*:

$$\text{dNBR} = \text{NBR pre} - \text{NBR post}$$

NBR pre: es el NBR de la imagen previa al incendio.

NBR post: es el NBR de la imagen post incendio.

El delta NBR como ya se mencionó, consiste en la resta del NBR pre incendio y el NBR post incendio, en fechas muy próximas entre sí minimizando de esta forma los cambios en la fenología de la vegetación que pudieran repercutir en dicho índice⁶.

En el presente trabajo y debido a que no se analizó un incendio en particular, sino por el contrario lo ocurrido durante un periodo de alrededor de 3 meses, se decidió realizar dos NBR por área de estudio.

El primero destinado a evaluar la severidad de los incendios a corto plazo (NBR de primer orden) en aquellas

áreas naturales donde ocurrieron la mayor parte de los incendios entre una imagen y otra del periodo estudiado. En este sentido, los efectos de primer orden están vinculados al impacto inmediato sobre los componentes o condiciones preexistentes y son resultado directo del proceso de combustión⁷.

El NBR de segundo orden se realizó para todo el periodo de estudio (primera y última imagen del periodo verano 2021-2022), con la finalidad de analizar el estado de regeneración de la vegetación, y analizar la severidad de los incendios, al que algunos autores señalan como de segundo orden o severidad del incendio a largo plazo. Los efectos de segundo orden están relacionados con la respuesta del ecosistema en términos, fundamentalmente, de regeneración vegetal y dinámica hidro geomorfológica⁷.

Para la interpretación de resultados, se reclasificaron los valores según la tabla 2 con niveles de severidad de incendios, propuestos por USGS (*Science for a Changing World*-Servicio Geológico de Estados Unidos).

Los valores con un NBR bajo indica vegetación regenerada, mientras que un valor alto indica suelo desnudo y áreas recientemente quemadas. Las áreas no quemadas presentan valores cercanos a cero (Organización de las Naciones Unidas-SPIDER).

Tabla 2. Niveles de severidad de incendios

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10 ³)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

Nota. Niveles establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la interpretación de valores de dNBR. <https://un-spider.org/es/node/10959>

RESULTADOS

Durante el período de estudio, se detectaron 12 333 focos de calor en la provincia de Entre Ríos, de los cuales el 2 % (246 focos) ocurrieron dentro de los sitios RAMSAR. La mayor concentración de estos focos (82 %) tuvo lugar durante los meses de diciembre y enero. En el sitio RAMSAR Palmar Yatay, los focos de calor se localizaron en una única área entre el 21 y el 25 de diciembre, mientras que en el sitio Delta e Islas del Paraná los focos

se distribuyeron de manera más uniforme a lo largo de todo el período de estudio.

En el sitio RAMSAR Delta e Islas del Paraná, la clasificación supervisada permitió identificar un total de 784,42 hectáreas quemadas, concentradas principalmente en la costa del río Paraná, con la mayor superficie afectada localizada en una isla específica (figura 1). Para este análisis se utilizaron cinco imágenes satelitales distribuidas en el tiempo: una de diciembre,

enero y febrero, y dos correspondientes a marzo, debido a la nubosidad presente en fechas cercanas al 21 de marzo.

En el caso del sitio RAMSAR Palmar Yatay, se registraron un total de 973,16 hectáreas quemadas durante el período de estudio (figura 2). Las clasificaciones indican que estas áreas presentan una cubierta vegetal densa que fue significativamente afectada (figura 3).

Para evaluar la gravedad a corto plazo en este sitio Delta e Islas del Paraná, se utilizaron imágenes del 6/1/2022 y del 2/3/2022. Los incendios, que ocurrieron entre el 2 y el 23 de febrero, dejaron como resultado una severidad predominantemente alta y moderada-alta en gran parte del sector afectado (figura 4). Cabe destacar que muchas de estas áreas son zonas inundables, lo que generó variaciones en los índices, especialmente en sectores con severidad baja donde no se registraron incendios.

En el análisis a largo plazo, con imágenes del 27/12/2021 y del 27/3/2022, no se observaron cambios significativos respecto al índice a corto plazo. Sin embargo, en algunas áreas se registró una disminución de la severidad alta, posiblemente debido al tipo de vegetación afectada y al corto tiempo transcurrido entre el incendio y la imagen post NBR, lo que dificultó una recuperación notable.

El Palmar Yatay sufrió incendios entre el 21 y el 25 de diciembre de 2021. El índice de severidad a corto plazo, calculado con imágenes del 19/12/2021 y el 13/01/2022, mostró una afectación mayoritariamente moderada-alta y moderada, con pequeñas áreas de severidad alta (figura 5).

Para el análisis del período completo, que abarcó desde el 19/12/2021 hasta el 19/03/2022, se observaron áreas con severidades altas, moderadas-altas y bajas. La presencia de severidades altas, incluso después de casi tres meses del incendio, podría estar relacionada con el tipo de cobertura vegetal, ya que se registraron áreas con árboles de gran altura, lo que puede influir en los resultados del índice y la percepción de la recuperación.

DISCUSIÓN

Durante el período de estudio comprendido entre el 21 de diciembre de 2021 y el 20 de marzo de 2022, se registraron 1757,58 hectáreas quemadas en los sitios RAMSAR de la provincia de Entre Ríos, ambos de importancia internacional. Estos incendios afectarán zonas críticas de alto valor ambiental, como el Palmar Yatay y el Delta e Islas del Paraná, y generarán impactos significativos en los ecosistemas de estos humedales.

En relación con la posibilidad de identificar y caracterizar zonas incendiadas, los resultados evidencian que las herramientas utilizadas, como la teledetección, los sistemas de información geográfica (SIG) y las imágenes satelitales Sentinel 2, son fundamentales para evaluar la extensión y severidad de los incendios. Sin embargo, este estudio reafirma que la plataforma FIRMS no detecta incendios de pequeña extensión, lo que limita la identificación de áreas menores a 1,5 hectáreas quemadas.

Para superar estas limitaciones, fue necesaria la clasificación no supervisada y el uso de combinaciones de bandas (falso color, natural e infrarrojo para vegetación) para identificar pequeños focos de calor no registrados.

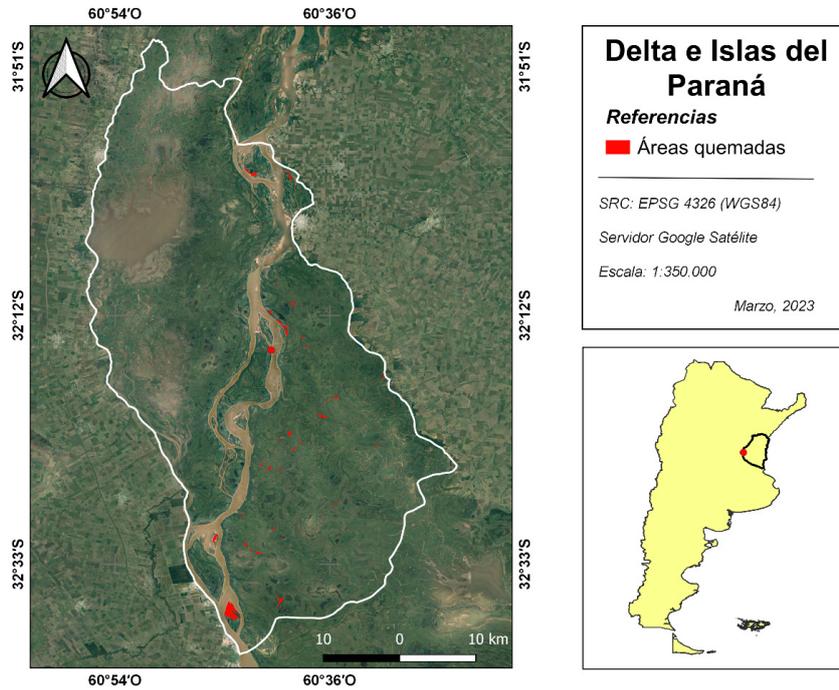
El análisis de severidad de los incendios, mediante índices como el NBR, muestra que las áreas de vegetación densa presentan mayores niveles de severidad. Esto se observó en el Palmar Yatay, donde la vegetación arbolada sufrió un mayor impacto y prácticamente no hubo regeneración al final del período de estudio. Sin embargo, el índice presenta desafíos en su interpretación, ya que, como señalan Michalijos y cols. (2013)⁹ y González (2020)¹⁰, puede confundir coberturas de pastizales con áreas quemadas debido a variaciones radiométricas, condiciones atmosféricas y el período temporal entre imágenes.

Una de las limitaciones identificadas es la distancia temporal entre las imágenes pre y post incendio. Autores como Vales y cols. (2020)⁶ destacan que intervalos más cortos entre imágenes minimizan los cambios en la vegetación que pueden alterar los índices. Este estudio plantea la necesidad de optimizar estos intervalos y de considerar factores que dificultan la interpretación, como las condiciones atmosféricas, geométricas y el tipo de cobertura vegetal afectada.

A futuro, sería relevante realizar estudios más integrales que combinen información climática, de uso del suelo, cobertura vegetal y severidad de los incendios. Esto permitiría identificar las causas de los incendios y los factores que contribuyen a su gravedad, mejorando así las tareas de prevención y mitigación.

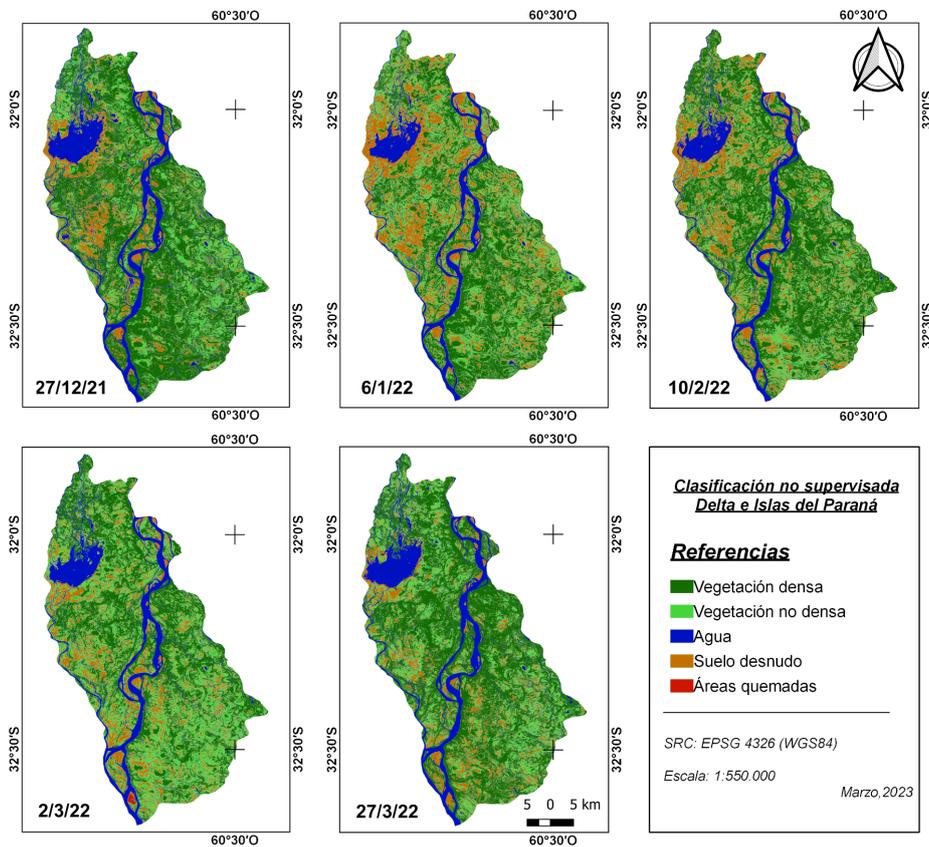
En términos de salud ambiental, los incendios en sitios RAMSAR pueden generar consecuencias graves, como la emisión de contaminantes que afecta la calidad del aire, el deterioro de la biodiversidad y la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales. Estos impactos resaltan la importancia de implementar programas de prevención de incendios, no solo para reducir la superficie afectada, sino también para proteger la salud de la población y mitigar los riesgos asociados a los incendios.

Figura 1. Áreas quemadas en sitio RAMSAR Delta e Islas del Paraná



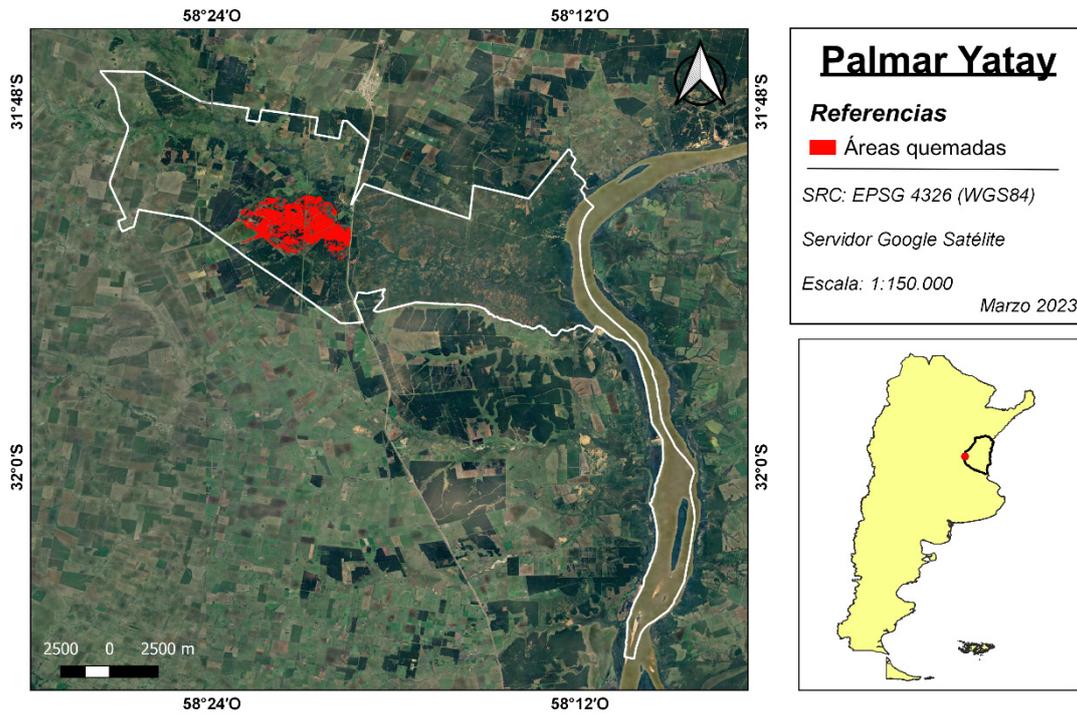
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Clasificación no supervisada en sitio RAMSAR Delta e Islas del Paraná durante el período de verano 2021-2022



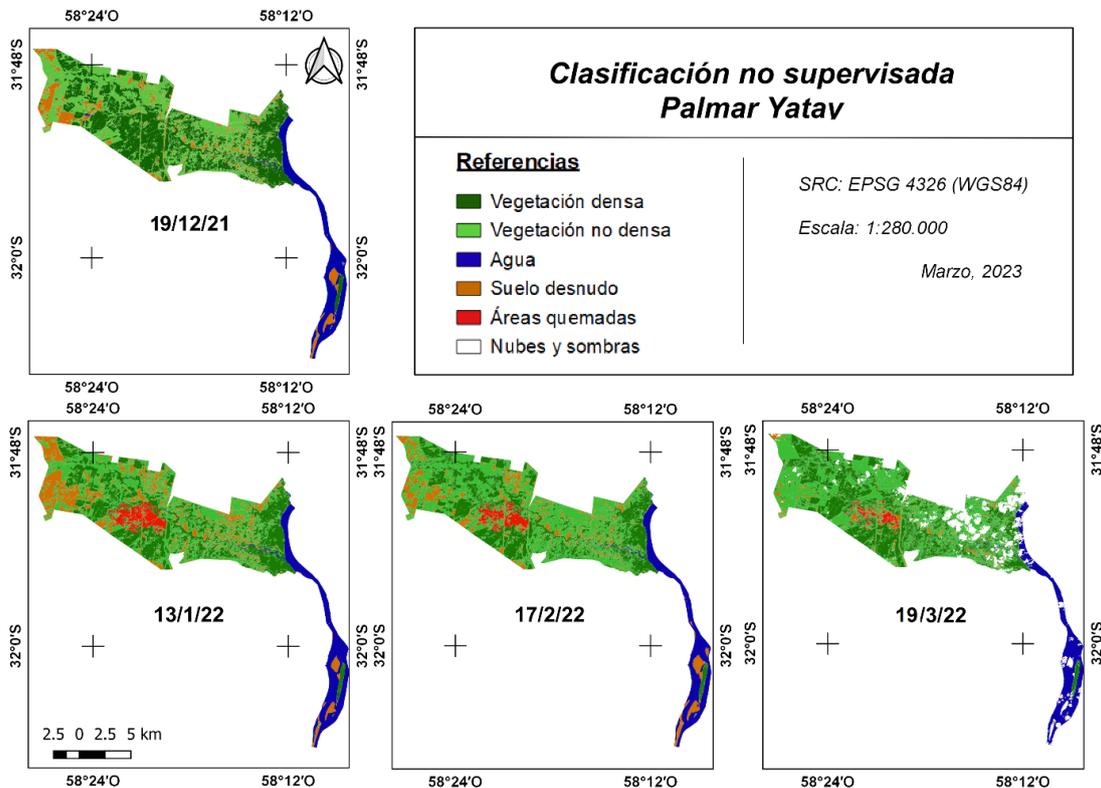
Fuente: elaboración propia

Figura 3. Áreas quemadas en sitio RAMSAR Palmar Yatay



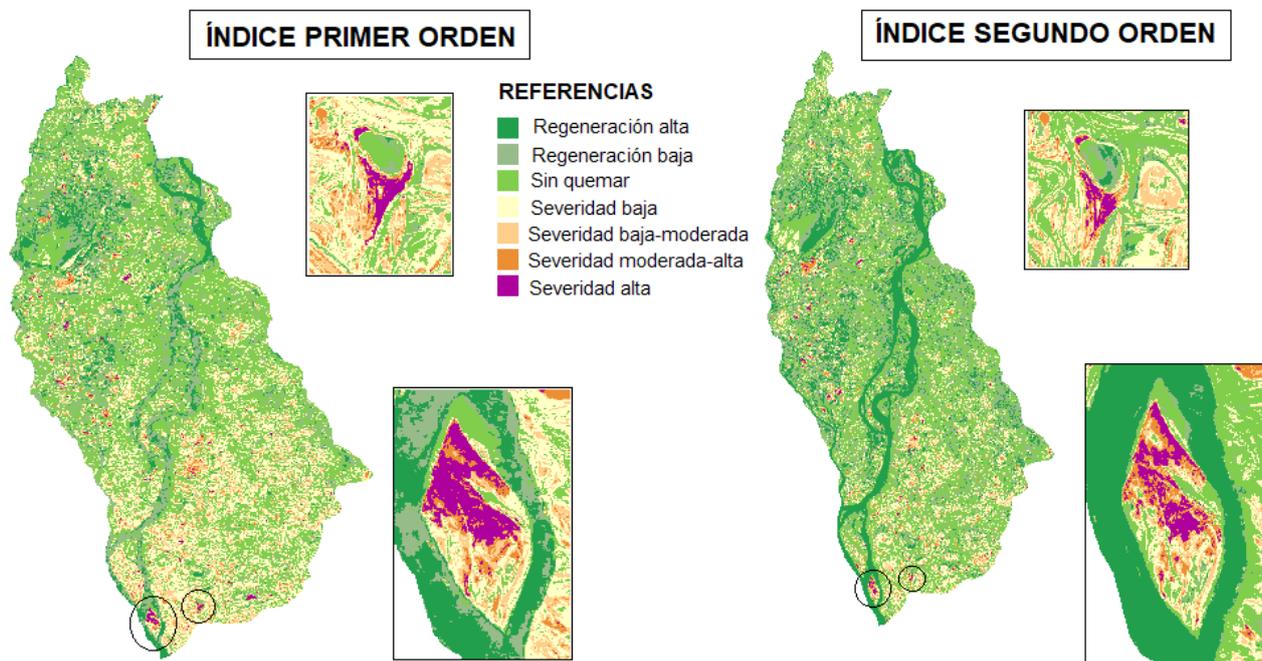
Fuente: elaboración propia.

Figura 4: Clasificación no supervisada en sitio RAMSAR Palmar Yatay durante el período de verano 2021-2022



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Índice de severidad de primer y segundo orden en sitio RAMSAR Delta e Islas del Paraná



Fuente: elaboración propia.

Por último, es esencial cuantificar la superficie afectada por incendios cada temporada para evaluar la efectividad de los programas de prevención y aplicar ajustes que optimicen la gestión de estos eventos. La integración de la teledetección y bases de datos, como las proporcionadas por la NASA y otras plataformas satelitales, puede mejorar significativamente las capacidades de monitoreo, especialmente en la detección de incendios pequeños que actualmente no son captados por los sistemas disponibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Geoinnova. El cambio climático contribuye a los incendios forestales. [actualizado en 2020; citado el 15 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://acortar.link/det3TK>.
- Nasi R, Dennis R, Meijaard E, et al. Los incendios forestales y la diversidad biológica. *Rev. Unasylva*. 2002; 53 (209).
- Aguilar Arias H, Mora Zamora R, Vargas Bolaños C. Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo flash del software ENVI. *Rev. Geográfica de América Central*. 2014; 2(53):39-59.
- Chuvieco E. Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ra ed. Revisada. Madrid: Ediciones RIALP S.A.1996.
- Chuvieco E. Fundamento de Teledetección Espacial. 2da ed. Madrid: Ediciones RIALP S.A. 1995.
- Vales J, Pino I, Granado L, et al. Cartografía de la afección y recuperación vegetal del incendio de Las Peñuelas en Moguer (Huelva) con imágenes satelitales, año 2017. *Rev. de teledetección*. 2020; (57):79-94.
- Montorio Llovería R, Perez Cabello F, García Martín A, et al. La severidad del fuego: Revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. En: Arnáez Vadillo J, director, et al. *Geoecología, cambio ambiental y paisaje homenaje al profesor José María García Ruiz*. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, Instituto Pirenaico de Ecología : Universidad de La Rioja. 2014. pp.427-40.
- Nieto Marsot A, Garcia Paredes C, Fernandez Sanchez A. Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales. *Rev. GeoFocus (artículos)*. 2011; (11):375-408.
- Michalijos M, Uboldi J. Propuesta metodológica para la evaluación de áreas afectadas por incendios mediante el uso de imágenes satelitales (Sierra de la Ventana, Argentina). *Rev. Geografía Norte Grande*. 2013; (56):223-34.
- González A. Identificación de áreas quemadas por medio de índices espectrales utilizando imágenes Sentinel-2 en el municipio de Orocué, Casanare [Aspirante a especialista en geomática, Universidad Militar Nueva Granada]. 2020. Disponible en: <https://acortar.link/qDJqyw>.
- Mena Lopez S. Identificación de áreas afectadas por incendios forestales utilizando imágenes satelitales Landsat 8. *Rev. Geográfica del Sur*. 2017; 8(12):15-25.
- Verdú, F., Saldivia, S. Variación espacial de índices espectrales sobre áreas quemadas en Sudamérica. *Cuadernos de investigación geográfica*. 2007; (33):39-58.