

Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Forestales. Ingeniería Forestal

Estudiante
Karen Irina Angermeier

Análisis de la severidad de incendios en la Reserva de Usos Múltiples Guaraní, Misiones a partir de índices espectrales obtenidos de sensores remotos.

Trabajo Integrador Final presentado para obtener el título de “Ingeniera Forestal”

Orientador
Esp. Ing. Ftal. Andrés Alejandro Leszczuk

Diciembre 2024

Eldorado (Misiones, Argentina)



Esta obra está licenciado bajo Licencia Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE MISIONES**



**FACULTAD
DE CIENCIAS
FORESTALES**

TRABAJO INTEGRADOR FINAL

Ingeniería Forestal

**Análisis de la severidad de incendios en la Reserva de Usos Múltiples
Guaraní, Misiones a partir de índices espectrales obtenidos de sensores
remotos.**

Estudiante

ANGERMEIER, Karen Irina

Orientador

Esp. Ing. Ftal. LESZCZUK, Andrés Alejandro

Eldorado

Argentina

Diciembre, 2024

Autora ANGERMEIER, Karen Irina: Estudiante de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones. Bertoni N° 124, Eldorado, Misiones, Argentina. C.P. 3380. *Email:* karenangermeier1996@gmail.com

Orientador LESZCZUK, Andrés Alejandro: Ingeniero Forestal. Especialista en teledetección y SIG. Jefe de trabajos prácticos de las asignaturas Teledetección, Estadística I y II, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones. Bertoni N° 124, Eldorado, Misiones, Argentina. C.P. 3380. *Email:* leszczukandresalejandro@gmail.com

Agradecimientos

Estudiar una carrera fue, durante mucho tiempo, un sueño que parecía difícil de alcanzar. Hoy, al llegar a este momento tan especial, quiero agradecer a todas las personas que confiaron en mí, respetaron mis tiempos y me apoyaron en cada paso del camino. Este logro no habría sido posible sin el acompañamiento incondicional de mi familia, mis amigos, mi pareja y su familia, quienes siempre estuvieron ahí dándome fuerza y ánimo.

Agradezco también a cada compañero que me brindó su ayuda cuando la necesité y a cada profesor que supo alentarme y guiarme cuando las circunstancias se volvían difíciles.

En este recorrido tuve la suerte de cruzarme con personas y profesionales increíbles, y quiero hacer un agradecimiento especial a mi orientador Andrés, quien estuvo a la par mía en este último tramo con mucha paciencia, dedicación y mucha vocación. También quiero agradecer a Beatriz Eibl y a Luis Ritter, quienes fueron pilares fundamentales durante toda mi carrera, ayudándome en cada paso y mostrándome el camino con su ejemplo.

A todos los que me acompañaron en este hermoso viaje, gracias de corazón. Sin ustedes, esto no habría sido tan hermoso ni tan inolvidable.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
SUMMARY	5
INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS PARTICULARES.....	8
MATERIALES Y MÉTODOS	8
Área de Estudio	8
Cálculo de los índices espectrales para evaluar severidad del fuego	9
Características de los índices analizados	11
Mediciones de campo	12
Análisis estadístico	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
CONCLUSIONES	21
BIBLIOGRAFÍA.....	23
ANEXO.....	26

RESUMEN

Este trabajo evaluó la severidad de un incendio en la Reserva de Usos Múltiples Guaraní, en Misiones, Argentina, mediante la combinación de datos de campo e índices espectrales derivados de imágenes Sentinel 2. Se midieron 30 parcelas en campo para evaluar la severidad de un incendio, en ellas se relevaron 479 árboles, evaluando variables como el diámetro a la altura del pecho (DAP), el porcentaje de copa viva y la altura de carbonización. Luego se analizó su relación con índices espectrales. Los índices espectrales obtenidos incluyeron NDVI, NBR, EVI y AFRI. Los resultados mostraron que el índice AFRI fue el que mejor explicó la variabilidad de los datos obtenidos en campo, mostrando un alto ajuste (R^2) y una comparación estadística significativa con las variables de campo. En contraste, el índice EVI no presentó una medición tan fuerte, lo que sugiere que su capacidad para evaluar la severidad del incendio en este contexto es más limitada en comparación con el AFRI. A pesar de ello, los resultados indicaron una evaluación negativa entre la severidad del incendio y el porcentaje de copa viva, y una evaluación positiva con la altura de carbonización. Se concluye que, en este estudio, el índice AFRI es una herramienta más adecuada para evaluar la severidad de los incendios en bosques, en comparación con otros.

Palabras clave: Gravedad, fuego, teledetección, satelital, bosques.

SUMMARY

This study evaluated the severity of a fire in the Guaraní Multiple-Use Reserve in Misiones, Argentina, through the combination of field data and spectral indices derived from Sentinel-2 satellite images. Thirty field plots were measured to evaluate fire severity, with data collected from 479 trees. Variables such as diameter at breast height (DBH), percentage of live canopy, and charring height were analyzed in relation to spectral indices. The spectral indices used included NDVI, NBR, EVI, and AFRI. The results showed that the AFRI index was the best at explaining the variability in the field data, with a high coefficient of determination (R^2) and a statistically significant correlation with the field variables. In contrast, the EVI index did not show as strong a correlation, suggesting that its ability to assess fire severity in this context is more limited compared to AFRI. The findings further revealed a negative correlation between fire severity and the percentage of live canopy, while a positive correlation was observed with charring height. These results highlight the AFRI index as a more suitable tool for assessing fire severity in forested areas compared to other indices.

Key words: Gravity, fire, remote sensing, satellite, forests.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son fenómenos de gran impacto en los recursos naturales boscosos. Anualmente se estima que unos 4,2 a 4,7 millones de km² se ven afectados mundialmente por este fenómeno. Estos en su mayoría tienen un origen antropogénico y son a menudo utilizados como herramienta de gestión de la tierra (RAMO *et al.*, 2021). Los incendios también afectan el clima al liberar gases de efecto invernadero y aerosoles al modificar el albedo de la superficie (CHUVIECO *et al.*, 2018). Aunque la mayor parte de los incendios forestales son provocados por actividades humanas, el aumento global de las temperaturas y la prevalencia de sequías, impulsados por el cambio climático, favorecen un incremento en su frecuencia e intensidad (GONZÁLEZ *et al.*, 2011).

La intensidad del fuego describe el proceso físico de la liberación de energía de la materia orgánica en combustión. A su vez, el término severidad del fuego surge de la necesidad de describir cómo la intensidad del fuego afecta a los ecosistemas, especialmente en incendios forestales, donde la información sobre la intensidad del fuego es escasa y los efectos son variables entre diferentes ecosistemas (KEELEY, 2009). La severidad de los incendios en ambientes naturales es un factor clave en la dinámica de las áreas quemadas, debido a que está directamente relacionada con la cantidad de biomasa consumida. Por lo tanto, la evaluación, gestión y cartografía de la severidad de los incendios son fundamentales para minimizar sus efectos y recuperar los ecosistemas afectados desde la perspectiva de la gestión de los recursos naturales (LLOVERÍA *et al.*, 2014).

Dependiendo de la severidad del incendio, la superficie de las áreas afectadas por éstos se cubre de diferentes materiales. Cuando el fuego es de alta severidad, el área queda expuesta a las condiciones climáticas adversas como la erosión producida por el aire o la precipitación, lo que puede provocar una baja tasa de recuperación vegetal. Además, las altas temperaturas pueden disminuir la viabilidad de las semillas, eliminar el material orgánico o inducir una alta mortalidad de las plantas de los doseles inferiores dentro del bosque (NEARY *et al.*, 2005).

En cuanto a la regeneración de ambientes naturales luego de un incendio, se han reportado estudios que muestran una mejor regeneración en zonas de alta severidad, debido, por ejemplo, a una mayor concentración de nutrientes en el ambiente tras el fuego (PAUSAS *et al.*, 2002), al impacto positivo del fuego en la dispersión de semillas (VEGA *et al.*, 2008) o a la presencia de semillas refractarias que necesitan el calor del fuego para germinar de su estado latente (KEELEY, 2008). En general, los estudios indican que las propiedades físicas del suelo se ven afectadas

negativamente, mientras que las características químicas tienden a mejorar temporalmente (DÍAZ-FIERROS *et al.*, 1994).

Por otro lado, la teledetección es una herramienta útil para caracterizar la severidad de los incendios forestales, ya que posterior al proceso de combustión se reduce la reflectancia en las bandas del espectro visible y del infrarrojo cercano, mientras que aumenta en el infrarrojo medio de onda corta (ARELLANO *et al.*, 2017). Los sensores remotos montados en plataformas satelitales ofrecen herramientas para la estimación de áreas afectadas por incendios forestales, gracias a su capacidad para proporcionar observaciones frecuentes y detalladas de la reflectancia y las propiedades térmicas de la superficie (SANCHEZ *et al.*, 2023). Sin embargo, muchos de los productos disponibles actualmente se basan en imágenes con resolución espacial baja (<30 metros/píxel ($m\ px^{-1}$)), lo que puede llevar a errores significativos en la identificación de incendios, especialmente en casos de incendios de menor escala. De hecho, diversos estudios regionales han detectado errores notables de omisión en los productos globales de superficies afectadas por incendios cuando se comparan con los límites reales (RAMO *et al.*, 2021).

Una metodología utilizada frecuentemente en la literatura científica es el cálculo de índices espectrales derivados de imágenes satelitales obtenidos de sensores remotos, para estudiar la severidad de incendios. Estos se obtienen mediante la combinación aritmética de bandas sensibles a las condiciones de la vegetación, utilizando imágenes tomadas antes y después del incendio. Al restar estas imágenes, se obtiene una medida relativa de la severidad de la perturbación, conocida como diferencias de índices (CHUVIECO *et al.*, 2002). La mayoría de estos índices suelen ofrecer una combinación de información sobre el impacto inmediato de la magnitud del fuego tanto en la vegetación como en el suelo (ARELLANO *et al.*, 2017). Sin embargo, no hay acuerdo sobre qué índice espectral funciona mejor cuando se utiliza para evaluar la severidad de incendios, debido a la variación de los ecosistemas (CHANG, 2016). En cuanto a las imágenes utilizadas para este tipo de estudios, la misión Sentinel 2 de la ESA (Agencia Espacial Europea) proporciona imágenes de media a alta resolución espacial (10, 20, y 60 $m\ px^{-1}$) que pueden ser utilizadas para la estimación, con gran nivel de detalle, de la severidad de incendios que afecta a los bosques (IBNOUSAIH, 2021).

Existen diversos estudios de severidad de incendios que fueron realizados usando la comparación de índices espectrales y datos de campo, así por ejemplo, Chen *et al.* (2011) desarrollaron un mapa de recuperación de un bosque posterior a un incendio de Pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson) utilizando una regresión múltiple ($R^2 = 0,85$), que incluye varios tipos de diferencias de índices como predictores de la severidad del incendio. Esta

severidad fue evaluada en campo utilizando el índice compuesto de quemas (CBI, *composite burnindex*), un método observacional comúnmente empleado para vincular el daño biofísico causado por un incendio con las diferencias en los índices espectrales sensibles a la vegetación calcinada (PEÑA y MARTÍNEZ, 2021). Existen pocos estudios de este tipo en la provincia de Misiones, dado que los incendios en esta región se consideran eventos poco frecuentes. Esto limita la disponibilidad de investigaciones que analizan la severidad de los incendios mediante comparación de datos satelitales y de campo.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo es analizar la severidad de los daños ocurridos después de un incendio, clasificando los mismos en las categorías de; no quemado, severidad baja, media y alta. Por medio de datos de campo y mediante la aplicación de sensores remotos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar y validar umbrales de clasificación para los índices espectrales: NDVI, dNDVI, SAVI, EVI, NBR, dNBR, AFRI y dAFRI.
- Analizar el desempeño de los distintos índices espectrales para estimar los factores que determinan de la severidad del incendio como; gravedad, porcentaje de copa viva y altura de carbonización.
- Evaluar si algún índice espectral destaca en su capacidad para estimar la variabilidad en la severidad del incendio.
- Generar mapas de las variables evaluadas basados en los resultados obtenidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio fue realizado en la reserva de usos múltiples guaraní (RUMG). La RUMG (Figura 1) está localizada al noreste de la República Argentina, y al sudeste de la Provincia de Misiones, perteneciente al municipio El Soberbio, entre los entre los 54°10' y los 54°18' de longitud Oeste y los 26°53' y los 26°59' de Latitud Sur. Su extensión es de 5.343 hectáreas, es administrada por la Facultad de Ciencias Forestales y forma parte de la Reserva de Biosfera de

“Yabotí” y del “Corredor Verde”. Limita al noroeste con la reserva provincial de “CaáYarí”, al sureste con la reserva natural cultural “Papel Misionero”, al noreste con el arroyo Paraíso y al suroeste con el arroyo El Soberbio. De acuerdo con la clasificación hecha por Cabrera y Willink (1980), el área de estudio se sitúa en la región fitogeográfica denominada "Provincia Paranaense", Distrito de las Selvas Mixtas, comunidad climática de la selva del "Laurel y Guatambú".

Durante los meses de diciembre de 2021 y marzo de 2022 se produjeron diversos incendios en la provincia de Misiones que afectaron principalmente a regiones forestales, tanto de bosques nativos como implantados (LESZCZUK *et al.*, 2022). En la RUMG, se produjo un incendio forestal que duró aproximadamente 7 días, iniciando el 18 de enero de 2022. La superficie afectada fue de 340 hectáreas, principalmente de bosque nativo. Además, el incendio alcanzó una superficie contigua de 375 hectáreas perteneciente a una empresa privada, totalizando 715 hectáreas afectadas de manera continua.

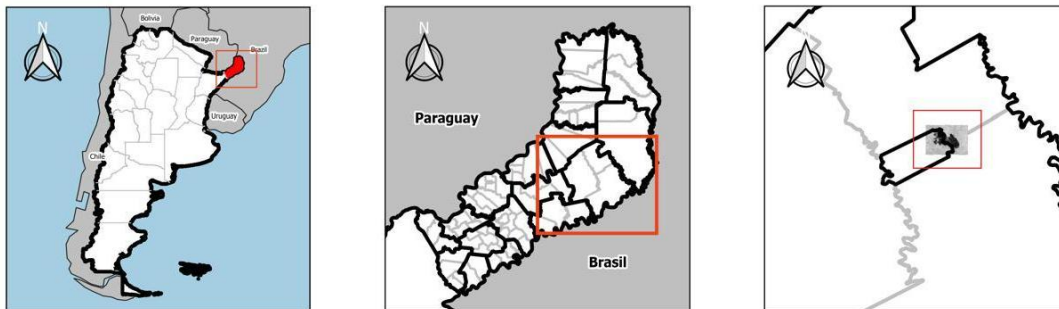


Figura 1. Localización del área de estudio.

Cálculo de los índices espectrales para evaluar severidad del fuego

Para realizar los cálculos de los índices espectrales a evaluar se seleccionaron dos imágenes satelitales de Sentinel 2, de fechas previas y posteriores al incendio. La escena previa al incendio fue de 01/11/2021, y la escena posterior al incendio fue de 21/03/2022. Para cada escena se determinaron diversos índices espectrales que explican el comportamiento del estado de la vegetación (Tabla 1):

Tabla 1. Índices de severidad de incendios.

Índice	Fórmula	Descripción
NDVI (Índice de Vegetación Normalizada)	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$	Valores cercanos a -1: baja densidad de vegetación o superficies no vegetales. Valores cercanos a 1: alta densidad de vegetación. Después del incendio, el NDVI disminuirá en áreas afectadas debido a la pérdida de la vegetación.
dNDVI (Diferencial de NDVI)	dNDVI= NDVI pre – NDVI post	El dNDVI se calcula restando el NDVI posterior al incendio del NDVI anterior. Detecta cambios significativos en la vegetación debido al fuego, permitiendo identificar y cuantificar la pérdida de vegetación en la zona quemada.
SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo)	$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L) \times (1 + L)}$	El SAVI es un índice similar al NDVI pero que tiene en cuenta también las variaciones en el suelo y la topografía
EVI (Índice de Vegetación Mejorado)	$EVI = \frac{2.5 \times (NIR - RED)}{(NIR + 6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1)}$	El EVI tiene en cuenta la interferencia atmosférica y la influencia del suelo en la reflectancia de la vegetación.
NBR (Índice Normalizado de Área Quemada)	$NBR = \frac{(NIR - MIR)}{(NIR + MIR)}$	El NBR mide la pérdida de vegetación durante un incendio al comparar la disminución de la reflectancia en la banda NIR con el aumento en la banda MIR, calculándose como la resta de la reflectancia MIR de la NIR.
dNBR (diferencial de NBR)	dNBR = NBR pre – NBR post	El dNBR mide el cambio en la severidad de las quemaduras comparando NBR antes y después del incendio.
AFRI (Índice de Fuego de Radiación Activa)	$AFRI = \frac{(\rho_{NIR} - 0,5 \rho_{SWIR})}{(\rho_{NIR} + 0,5 \rho_{SWIR})}$	El AFRI utiliza la banda espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) en lugar del rojo visible, por lo tanto, puede proveer de información en momentos en

		que la atmósfera se encuentra contaminada por los aerosoles.
dAFRI (diferencial de AFRI)	$dAFRI = AFRI_{pre} - AFRI_{post}$	El dAFRI es la diferencia del índice AFRI (pre y post incendio) en el que se reflejan los cambios en la vegetación provocados por el fuego y por lo tanto permite visualizar y delimitar las áreas quemadas.

Donde: NIR es la banda 8 perteneciente al infrarrojo cercano, SWIR es la banda 11 que corresponde al infrarrojo cercano, MIR es la banda 12 perteneciente infrarrojo medio, RED es la banda 4 del espectro visible que capta el color rojo y BLUE es la banda 2 del espectro visible que capta el color azul. Además, p_NIR y p_SWIR representan los valores de reflectancia de las bandas correspondientes al infrarrojo cercano (NIR) y al infrarrojo de onda corta (SWIR), respectivamente.

Características de los índices analizados

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) se construye con las bandas del rojo; sensible a la absorción de radiación que produce la clorofila foliar, e infrarrojo cercano; sensible a la reflexión de radiación que produce la abundancia de follaje sano, por lo que sus valores dan cuenta del estado de vigor o verdor del vegetal (CHUVIECO *et al.*, 2002). Este índice permite cuantificar los cambios en la vegetación entre dos momentos específicos, siendo útil para evaluar el impacto de perturbaciones como incendios en la cobertura vegetal. La ventaja del dNDVI por sobre el anterior es que permite detectar cambios significativos en la vegetación a causa del fuego. Cuando se produce un incendio forestal, la vegetación se quema y muere, lo que puede disminuir el NDVI en la zona afectada. Por lo tanto, el dNDVI puede utilizarse para identificar y cuantificar la pérdida de vegetación en la zona quemada.

El EVI tiene en cuenta la interferencia atmosférica y la influencia del suelo en la reflectancia de la vegetación, lo que lo hace particularmente útil en áreas donde la interferencia atmosférica o la influencia del suelo pueden afectar la precisión de los valores de NDVI o SAVI.

El Índice Normalizado de Área Quemada NBR (*Normalized Burn Ratio*) se basa en la capacidad de la vegetación para absorber y reflejar la radiación infrarroja cercana (NIR) y la radiación del infrarrojo medio (SWIR). Durante un incendio forestal, la vegetación se quema y se

pierde la capacidad de absorber y reflejar la radiación en estas bandas espectrales. Como resultado, la reflectancia en la banda NIR disminuye, mientras que la reflectancia en la banda SWIR aumenta. El cálculo del NBR implica la resta de la reflectancia en la banda SWIR de la reflectancia en la banda NIR. El diferencial de NBR (dNBR) permite cuantificar el cambio en la severidad de las quemaduras, proporcionando una medida del impacto del fuego en la vegetación al comparar cómo la reflectancia en las bandas NIR y SWIR ha cambiado debido al incendio.

El Índice de Fuego de Radiación Activa (AFRI) presenta ventajas sobre el NDVI debido a que su fórmula emplea la banda espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) en lugar de la banda roja visible (KARNIELI *et al.*, 2001). Dado que la longitud de onda del SWIR es mayor que la del rojo, no se ve afectada por el humo producido por la quema de biomasa. Por ello, el AFRI puede proporcionar información en situaciones donde la atmósfera está contaminada con aerosoles (BEN-ZE'EV *et al.*, 2006). El valor de 0,5 (que aparece en la fórmula del mismo), es una constante empírica que establece una relación entre la banda SWIR y la banda roja (LESZCZUK *et al.*, 2022).

Mediciones de campo

Se realizó un muestreo sistemático, mediante parcelas de inventario forestal en la zona de estudio. El relevamiento se llevó a cabo siete meses después del incendio, en el mes de agosto de 2022. En primer lugar, se tomó el total del área quemada y se dividió en transectos lineales donde fueron establecidas las parcelas (Figura 2). Se seleccionaron puntos de posibles parcelas a intervalos regulares de 100 metros a lo largo de los transectos. Este método de muestreo sistemático asegura una distribución uniforme de las parcelas dentro del área quemada y permite una evaluación completa de la severidad del incendio en el área de estudio. Se relevaron un total de 30 parcelas circulares de 13,82 m de radio y un área de 600 m² por parcela. Obteniendo finalmente un área total muestreada de 18.000 m². En cada parcela se relevaron todos los individuos con DAP mayores a 10 cm.

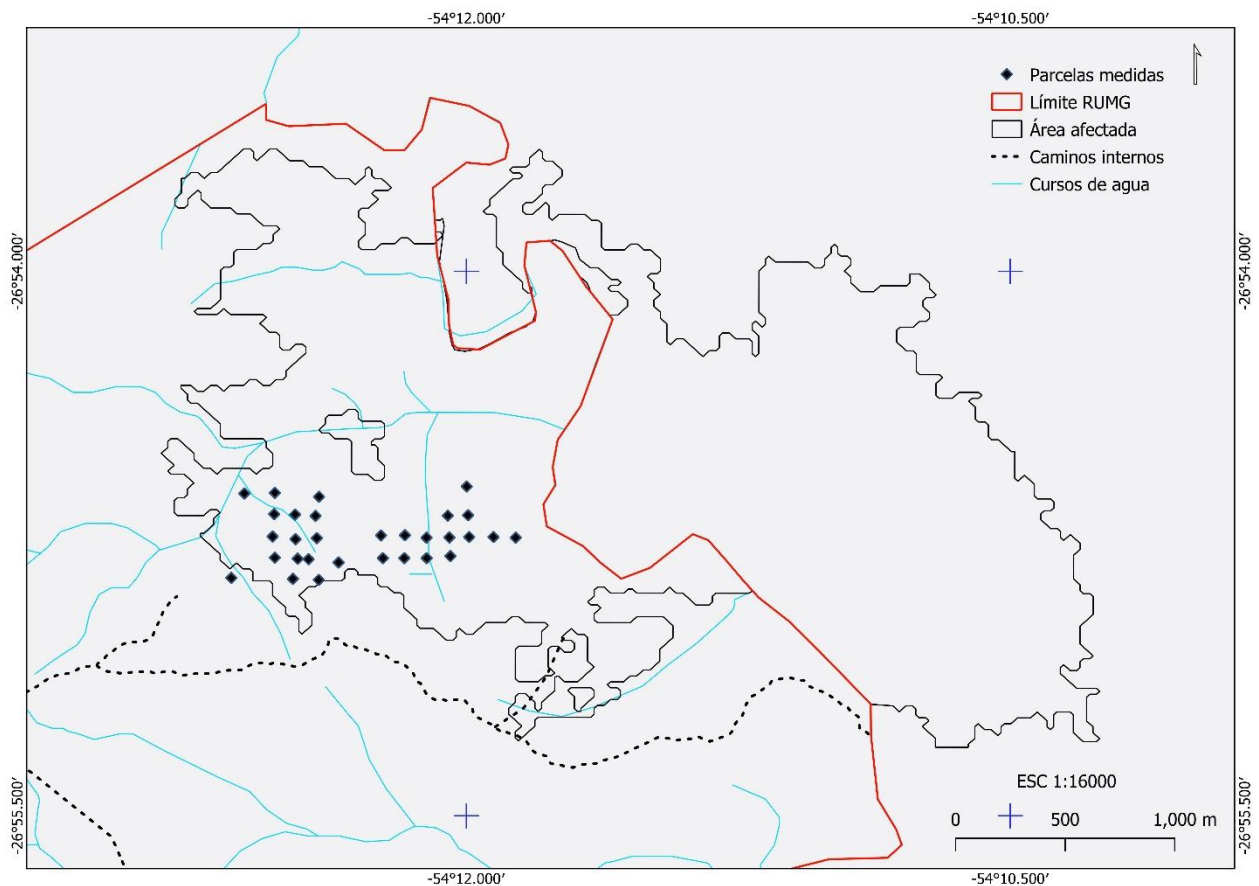


Figura 2. Distribución de las parcelas.

Para llevar a cabo el relevamiento de las variables de interés, se utilizó como referencia la "Metodología para la evaluación de la severidad de incendios forestales en campo, en ecosistemas de bosque templado de México" (Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONAFOR, 2018). Si bien no se utilizaron todas las variables contempladas en la metodología, se adaptó el procedimiento para ajustarlo a las características del área de estudio y los objetivos específicos del trabajo.

Las variables evaluadas en los individuos fueron las siguientes:

- DAP de todos los individuos.
- Estado del árbol: donde se evaluó el estado sanitario de cada individuo clasificándolos como:
 - H: árbol sano con poco daño biótico o abiótico.
 - U: árbol no saludable con algún daño biótico o abiótico, cuyo daño reducirá el crecimiento. Sin embargo, parece que el árbol no morirá inmediatamente por el daño.
 - S: árbol enfermo con daño biótico o abiótico extenso, y este daño finalmente causará la muerte dentro de los próximos 5 a 10 años.
 - D: árbol muerto o tronco sin tejido vivo visible.

- Porcentaje de copa viva: donde se evaluó la copa de cada árbol teniendo en cuenta la **Tabla 2** de referencia:

Tabla 2. Código según porcentaje de copa viva.

Código	%Copa Viva
0	0
0,5	> 0 - 1
3	> 1 - 5
10	> 5 - 15
20	> 15 - 25
30	> 25 - 35
40	> 35 - 45
50	> 45 - 55
60	> 55 - 65
70	> 65 - 75
80	> 75 - 85
90	> 85 - 95
98	> 95 -100

- Causa de mortalidad: donde se evaluó la posible causa de deceso de los individuos que se encontraban muertos, donde:
 - F: incendio.
 - D: enfermedad.
 - A: abiótico (inundación, erosión, etc.).
 - H: cosecha.
 - Tu: incapaz de determinar
 - X: no evaluó
 - -: insecto.
- Altura de carbonización o de soflamado de tronco: altura en metros de tronco quemado.
- Rebrote: Fueron clasificados en “SI” y “NO” según presenten o no una nueva brotación.

Además, se registraron las siguientes características adicionales de cada parcela:

- Gravedad de la parcela: donde se evaluó la parcela completa con un rango de variabilidad de 1 a 5, donde:

- 1: “Muy quemado” donde toda la parte de la planta se encuentra consumida, dejando algunos o ningún tallo o tronco principal; los que quedan están profundamente carbonizados
 - 2: “Moderadamente quemado” en el cual las ramas de follaje y tallos pequeños se encuentran consumidos, aunque con algunas ramas todavía presentes.
 - 3: “Ligeramente quemado” donde el follaje y las ramas más pequeñas se encuentran parcial o completamente consumidos, pero las ramas en su mayoría intactas.
 - 4: “Chamuscado” con follaje quemado y adherido a las ramitas de soporte.
 - 5: “Sin quemar”.
- Pendiente.
 - Orientación de la pendiente.
 - Coordenadas geográficas.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados mediante modelos de regresión lineal, estableciendo relaciones entre las variables obtenidas del inventario forestal (variables dependientes) y los índices espectrales (variables independientes). El cálculo de los índices y el procesamiento de los datos se llevaron a cabo utilizando la plataforma de procesamiento de Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS. Los modelos de regresión se ajustaron en R e tat.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fueron medidas 30 parcelas evaluando un total de 479 árboles. El diámetro medio fue de 24,78 cm variando de un mínimo de 10 a un máximo de 90 cm. En cuanto a los datos relacionados a la severidad del incendio, la altura de sofamado media fue de 1,95 m, llegando a un máximo de 10m., mientras que el porcentaje de copa viva presentó un promedio del 26,26%.

En la Figura 3 se describe la relación entre el índice de gravedad de incendio y el porcentaje de copa viva. Se observó que a medida que aumenta la gravedad del incendio, el porcentaje de copa viva del árbol disminuye. En sitios de mayor severidad, la mayoría de los árboles tienen porcentajes de copa viva muy bajos o nulos, lo que indica una pérdida casi completa de vegetación en las copas. Por lo contrario, en áreas de menor gravedad, los árboles retuvieron una proporción significativa de sus copas, lo que sugiere menos daño.

Existe una correlación negativa entre la gravedad del incendio y el porcentaje de copa viva, donde una mayor gravedad se asocia con una mayor pérdida de cobertura arbórea. Esto confirma que los datos de campo reflejan el impacto del fuego en la vegetación y coincide con lo observado por LLOVERÍA (2014), quien describe una relación similar en incendios de bosques de coníferas en regiones mediterráneas, destacando cómo la severidad del incendio afecta directamente la regeneración vegetal en estos ecosistemas específicos.

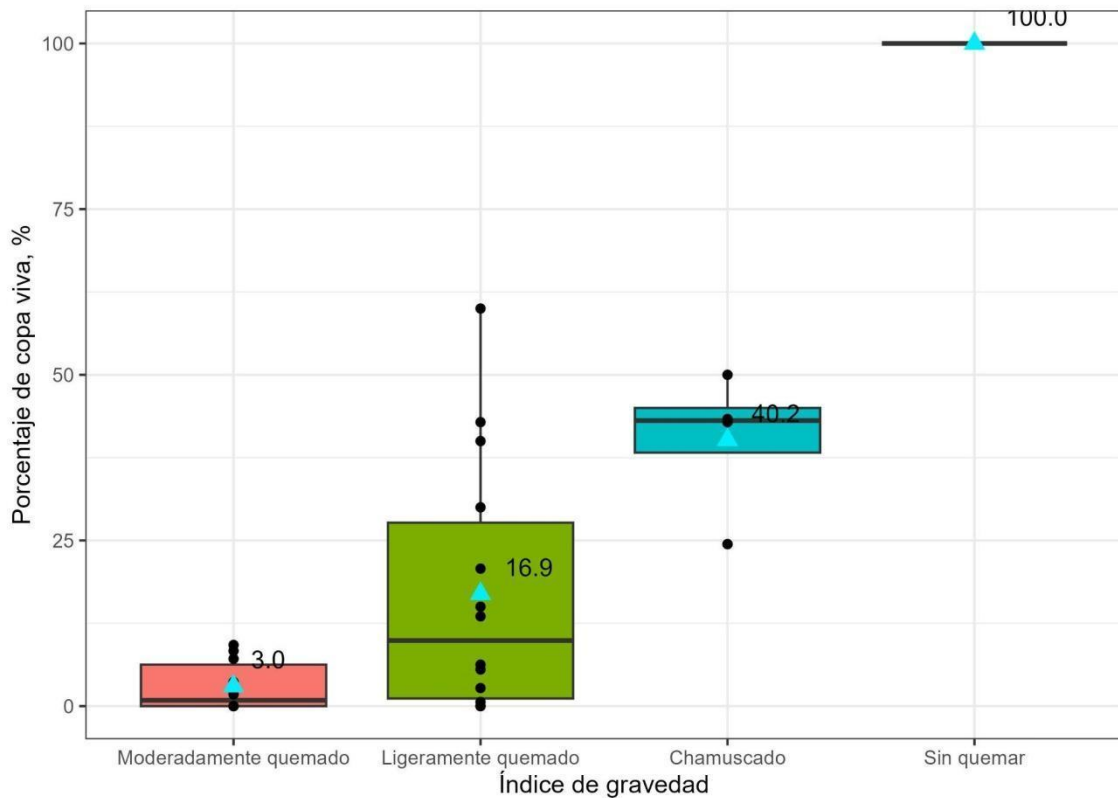


Figura 3. Relación entre porcentaje de copa viva (eje y) e índice de gravedad (eje x); donde los puntos representan muestras, la línea horizontal dentro de la caja la mediana, los triángulos y las etiquetas representan la media.

En la Figura 4 se describe la relación entre el índice de gravedad de incendio y la altura promedio de soflamado. Se observó que a medida que aumentó la gravedad del incendio, también lo hizo la altura de carbonización, los árboles tienen alturas de quemado más altas, mostrando que las llamas han alcanzado alturas mayores. Por otro lado, en las zonas de menor gravedad, la carbonización es limitada y ocurre sólo en la base del tronco o no ocurre en absoluto. Existe una relación positiva entre la gravedad del incendio y la altura de carbonización, lo que indica que una mayor gravedad del incendio se asocia con una mayor altura de la carbonización, reflejando que los daños aumentaron en función de la intensidad del incendio, explicada la misma relación en los trabajos que usan la misma metodología como LLOVERÍA (2014) y ARELLANO (2017).

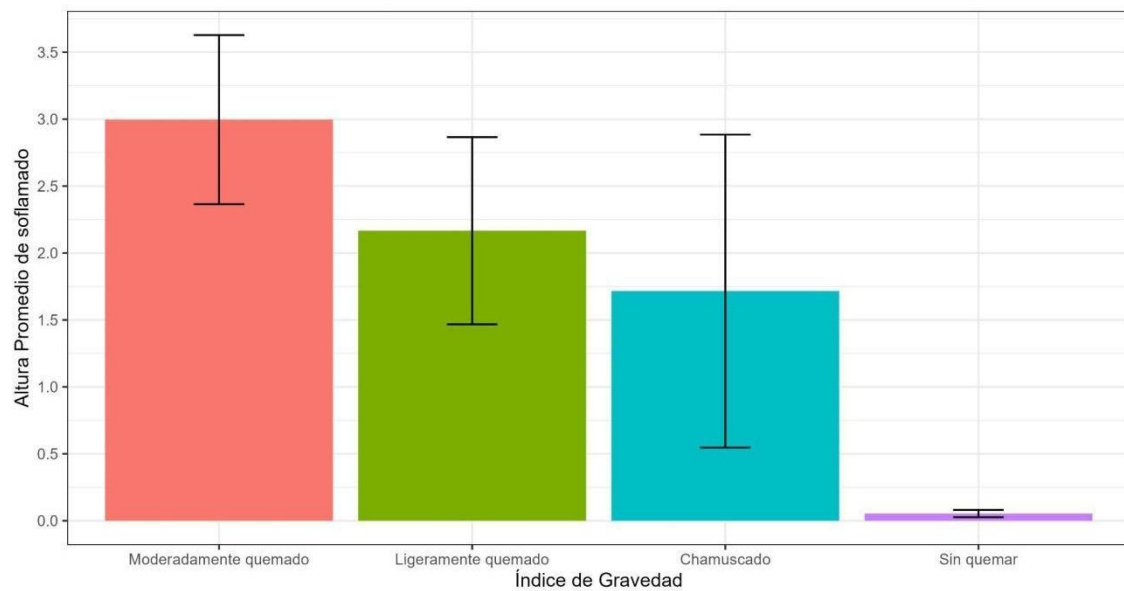


Figura 4. Relación entre altura promedio de soflamado en m (eje y) e índice de gravedad (eje x); las líneas que se extienden desde los extremos hasta los valores mínimos y máximos representan la dispersión de los datos.

Para analizar las relaciones entre los datos de campo y los índices espectrales se ajustaron modelos de regresión lineales simples con los datos espectrales obtenidos de los índices. Como se describió anteriormente, se utilizaron como variables dependientes la severidad del incendio, la altura de carbonización y el porcentaje de copa viva, y como variables independientes los diferentes índices espectrales. El ajuste del modelo fue evaluado utilizando el R^2 ajustado, y el p-valor que indica si la relación entre las variables es significativa o no.

En base a lo observado en la Tabla 3, que describe la relación entre las variables dependientes y los índices estudiados, el EVI mostró un desempeño destacado al analizar las tres variables: gravedad del incendio, porcentaje de copa viva y altura de carbonización. Este índice obtuvo un R^2 ajustado alto para cada una de estas variables, lo que evidencia su efectividad para explicar la variación en la severidad del incendio. Además, en todos los casos, el p-valor asociado al EVI fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$), reforzando su utilidad en este contexto. Sin embargo, es notable que el índice AFRI demostró ser superior en explicar las variaciones de la altura de carbonización y la gravedad del incendio, con un R^2 aún más alto, sugiriendo que mientras el EVI es eficaz, el AFRI podría ser más adecuado para capturar la extensión completa de los impactos del fuego en estas áreas específicas.

Tabla 3. Relación entre las variables dependientes (gravedad de parcela, % copa viva y altura de carbonización) y cada uno de los índices estudiados (variables regresoras), representándose también el modelo, el R²ajustado en cada uno de los casos y el p-valor que mide la significancia estadística de los resultados.

Variable dependiente	Variable regresora	Ecuación	R ² ajustado	p_valor
Copa viva	NDVI	$y = -27.206 + 119.305x$	0,565	0,000002
	dNDVI	$y = 78.255 + 119.095x$	0,561	0,000002
	NBR	$y = 48.794 + 125.786x$	0,597	0,000001
	dNBR	$y = 89.643 + 128.35x$	0,588	0,000001
	EVI	$y = -12.368 + 229.283x$	0,632	0,000000
	SAVI	$y = -14.361 + 233.166x$	0,625	0,000000
	AFRI	$y = 3.691 + 88.589x$	0,567	0,000002
Altura de soflamado	NDVI	$y = 3.476 + -3.281x$	0,277	0,002824
	dNDVI	$y = 0.592 + -3.243x$	0,27	0,003272
	NBR	$y = 1.396 + -3.414x$	0,285	0,00237
	dNBR	$y = 0.272 + -3.513x$	0,285	0,002365
	EVI	$y = 3.017 + -5.95x$	0,276	0,002893
	SAVI	$y = 3.077 + -6.104x$	0,277	0,002784
	AFRI	$y = 2.643 + -2.518x$	0,297	0,001849
Gravedad	NDVI	$y = 1.586 + 3.34x$	0,46	0,000038
	dNDVI	$y = 4.554 + 3.367x$	0,466	0,000032
	NBR	$y = 3.693 + 3.431x$	0,462	0,000036
	dNBR	$y = 4.783 + 3.455x$	0,443	0,00006
	EVI	$y = 2.031 + 6.214x$	0,482	0,000021
	SAVI	$y = 1.972 + 6.353x$	0,482	0,000021
	AFRI	$y = 2.433 + 2.569x$	0,496	0,000014

El porcentaje de copa viva es una variable porcentual que toma valores entre 0 y 100, al analizar esta variable mediante un modelo lineal, se observa que no cumple con los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Estos resultados fueron verificados mediante el análisis de los residuos del modelo lineal, cuyos gráficos se presentan en el Anexo 1 Figura 7.

Al observar los resultados de la tabla 3, donde vemos el desempeño de los índices espectrales, en la descripción de los cambios observados en la estructura de la vegetación afectada por el fuego se evidencia que los modelos ajustados con estas variables presentaron un R² elevado, lo que sugiere una fuerte relación entre los índices y las características físicas relevadas de los árboles afectados por el incendio. Es importante destacar que, en este caso, el AFRI demostró ser el índice más robusto y consistente para las variables analizadas. Este índice presentó los valores más altos de R² ajustados y mantuvo un p-valor significativo en todos los modelos, lo que sugiere que el AFRI es un indicador confiable para evaluar la severidad del incendio y sus efectos sobre la vegetación. El buen desempeño del AFRI podría estar relacionado con su capacidad para diferenciar eficazmente la vegetación en condiciones de estrés hídrico y sus particularidades en

áreas con cobertura uniforme, como el área de estudio. Estos resultados contrastan con estudios anteriores, como el de FLORES RODRÍGUEZ et al. (2022), donde el AFRI tuvo un desempeño menos destacado en ecosistemas más diversos de México. Esto resalta la relevancia del contexto ecológico en la efectividad de los índices espectrales.

En contraste, otros índices como el EVI, aunque mostraron un buen desempeño en términos de significancia estadística y valores de R^2 ajustados, quedaron por detrás del AFRI en esta comparación. Este hallazgo difiere de lo reportado por autores como EPTING et al. (2005), HUDAK et al. (2007) y TANASE et al. (2011), quienes posicionaron al NBR como el índice más eficaz para describir la severidad de incendios en sus estudios respectivos. La presente investigación subraya la importancia de considerar las características específicas del ecosistema y las condiciones del incendio al evaluar la utilidad de los índices espectrales.

En el mapa de la Figura 5 se representan las alturas de soflamado, las áreas con mayor altura de carbonización representadas por tonos rojos a anaranjados indican que el fuego alcanzó niveles superiores en los troncos, afectando en mayor medida a la vegetación. En las zonas donde la altura de carbonización es baja (tonos amarillos a verdes), el fuego afectó principalmente la base de los troncos o no llegó a causar un daño significativo. Esta comparación la podemos observar en la Figura 6.

Así como MONTEALEGRE *et al.* (2017) encontró correlaciones altas entre índices de estructura de dosel y la severidad del fuego, en este trabajo se observó que tanto el porcentaje de copa viva como la altura de carbonización son representantes de la severidad en el área basal y aérea del bosque.

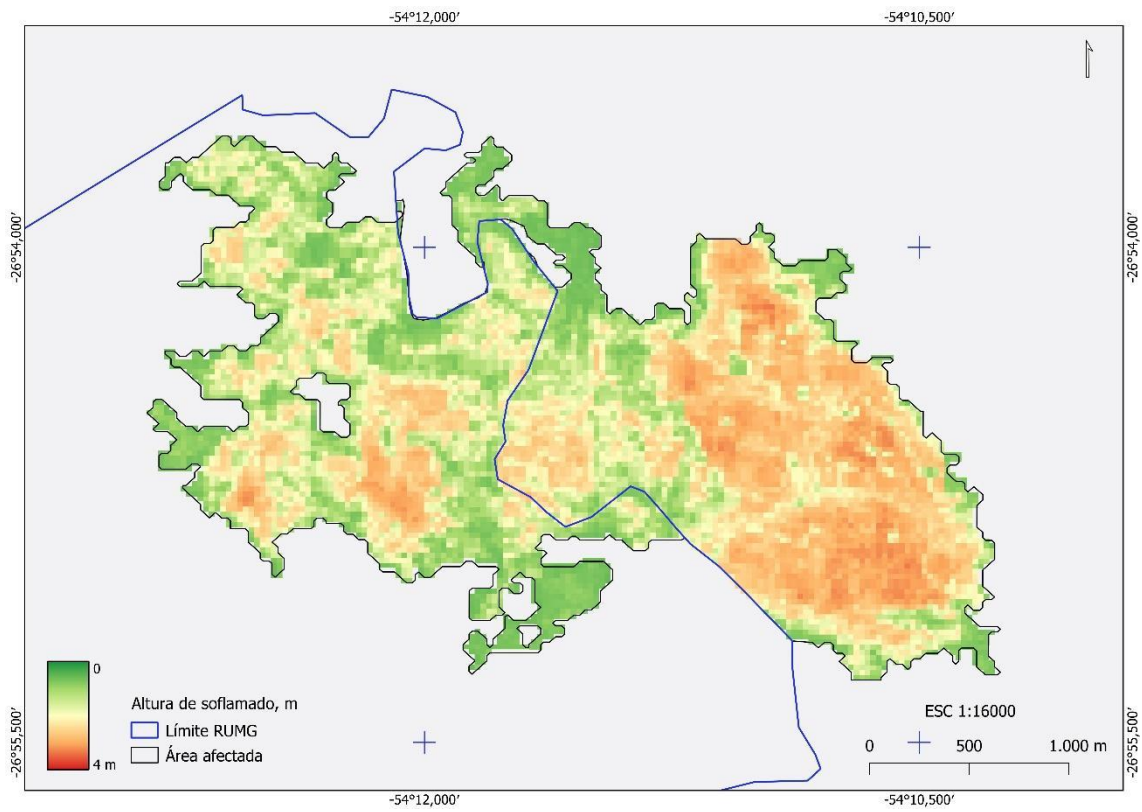


Figura 5. Mapa de representación de la altura de carbonización en el área de incendios.



Figura 6. Árbol con gran altura de carbonización (izquierda) y con poca altura de carbonización (derecha).

Los mapas coinciden de manera consistente en la representación de la severidad causada por el incendio. Las áreas con mayor gravedad tienden a mostrar un aumento en la altura de carbonización en los troncos.

En este estudio, no se analizó la correlación entre los índices espectrales y la severidad del incendio con la pendiente del terreno, lo cual podría haber proporcionado información adicional sobre la influencia de la topografía en la propagación del fuego. La pendiente es un factor que puede afectar tanto la velocidad de avance del fuego como la intensidad de este. Por lo tanto, se recomienda que futuros estudios incluyan la pendiente del terreno como una variable adicional para estudiar su influencia en la severidad del incendio. Este análisis podría proporcionar una visión más completa del impacto del fuego en áreas con topografías variables, mejorando las estrategias de manejo forestal.

CONCLUSIONES

En este estudio, se evaluó la severidad de un incendio en la RUMG mediante la combinación de datos de campo y análisis de índices espectrales, lo que permitió obtener una visión detallada de los efectos del fuego sobre la vegetación. Los resultados obtenidos a partir de la comparación entre las variables altura de carbonización, índice de gravedad del incendio y los índices espectrales muestran una evaluación significativa que permite evaluar con precisión los efectos del fuego.

El AFRI fue el índice espectral más efectivo en este análisis, destacándose como el indicador más confiable para evaluar la severidad del incendio. Su capacidad para detectar cambios en la vegetación bajo estrés hídrico y su alta elevación con las variables medidas en campo lo posicionan como una herramienta clave para el análisis de incendios en ecosistemas forestales uniformes como la RUMG. Este índice mostró los valores más altos de R^2 ajustados, lo que evidencia su utilidad para identificar con precisión áreas afectadas por el fuego.

El EVI, aunque mostró un desempeño consistente, fue superado por el AFRI en términos de precisión para las variables dependientes analizadas. Otros índices como el NBR y el dNBR también demostraron ser eficaces para identificar áreas quemadas, debido a su sensibilidad a cambios en la reflectancia del infrarrojo medio, aunque su capacidad para evaluar la severidad de los daños varió según las características del terreno y de la vegetación. En comparación, el NDVI, aunque útil para detectar cambios en la vegetación, presentó limitaciones en la evaluación de áreas con severa pérdida de vegetación. Esto se debe a que el NDVI tiende a ser menos sensible en esas

áreas, ya que no distingue claramente los diferentes niveles de daño cuando la vegetación es muy escasa o está completamente ausente. Esto reduce su capacidad para evaluar la severidad del incendio en zonas de alta degradación.

Estos resultados refuerzan la importancia de seleccionar índices espectrales adecuados según las condiciones del ecosistema y las características del incendio. La superioridad del AFRI en este estudio proporciona una base sólida para su uso en la planificación de acciones de restauración y manejo post-incendio, permitiendo identificar con mayor precisión las áreas más afectadas. Además, la combinación de datos de campo con análisis espectrales robustos puede optimizar la gestión de incendios en zonas con condiciones ambientales heterogéneas y complejas.

BIBLIOGRAFÍA

- ARELLANO, S.; Vega, J. A.; Rodriguez Silva, F.; Fernández, C.; Vega-Nieva, D.; Ruiz-González, A. D. 2017. Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Asociación Española de Teledetección*. 49 (Número especial): 49-61.
- BEN-ZE'EV, E.; Karnieli, A.; Agam, N.; Kaufman, Y.; Holbein, B. 2006. Assessing vegetation conditions in the presence of biomass burning smoke by applying the Aerosol-free Vegetation Index (AFRI) on MODIS images. *International Journal of Remote Sensing*. 27(15): 3203–3221.
- CABRERA A. L.; Willink A. 1980. *Biogeografía de América Latina*. 2(13): 117p.
- CHANG, Y.; Zhiliang Z.; Yuting F.; Yuehui L.; Rencang B.; Yuanman H. 2016. The spatial variation in forest burn severity in Heilongjiang Province, China. *Nat Hazards*. 81: 981–100.
- CHEN, X.; Vogelmann, J. E.; Rollins, M.; Ohlen, D.; Key, C. H.; Yang, L.; Huang, C.; Shi, H. 2011. *Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest*. *International Journal of Remote Sensing* 32(23): 7905-7927.
- CHUVIECO, E.; Martin, M. P.; Palacios, A. 2002. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing* 23(23): 5103-5110 pp.
- CHUVIECO, E.; Pettinari, M. L.; Lizundia-Loiola, J.; Oton, G.; Ramo, R.; Padilla, M.; Tansey, K.; Strom, T.; Laurent, P.; Heil, A.; Kaiser, J. W.; Mouillot, F.; Pereira, J. M.; Oom, D.; Campagnolo, M.; Basterrika, A.; Rotela, E.; Van der Werf, G.; Gomez-Dans, J; Lewis, F. 2018. *Análisis global de áreas quemadas para la modelización climática: experiencias del proyecto Fire_CCI*. *Tecnologías de la Información Geográfica: perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento*. Universitat de València. 67-75 pp.
- DÍAZ-FIERROS, F.; Benito, E.; Soto, B. 1994. *Action of forest fires on vegetation cover and soil erodibility*. *Soil Erosion as a Consequence of Forest Fires*.
- EPTING, J.; Verbyla, D.; Sorbel, B. 2005. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM. *Remote Sensing of Environment*. 96: 328-339.

- FLORES RODRÍGUEZ, A. G.; Flore Garnica, J. G.; GonzalezEguiarte, D. R.; GallegosRodriguez, A.; Zarzua Villaseñor, P.; Mena Munguia, S. 2022. Análisis comparativo de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales. *Investigaciones geográficas*. 106.
- GONZÁLEZ, M. E; Lara, A.; Urrutia, R.; Bosnich, J. 2011. Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile. *Bosque* 32(3): 215-219 pp.
- HUDAK, A. T.; Morgan, P.; Bobbitt, M. J.; Smith, A. M. S.; Lewis, S. A.; Lentile, L. B.; Robichaud, P. R.; Clark, J. T.; Mckinley, R. A. 2007. The Relationship of Multispectral Satellite Imagery to Immediate Fire Effects. *FireEcologySpecialIssue*. 3: 64-90.
- IBNOUSAIH, S. 2021. *Análisis de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel en Las Palmas de Gran Canaria en Agosto de 2019*. Universidad de Jaén, España. 16-26 pp.
- KARNIELI, A.; Yoram, J.; Kaufman, B.; Remer, L.; Wald, A. 2001. AFRI - aerosol free vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*. 77(1): 10-21.
- KEELEY, J. E.; Brennan, T.; Pfaff, A. H. 2008. Fire Severity and Ecosystem Responses Following Crown Fires in California Shrublands. *Ecological Applications*. 1530-1546 pp.
- 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 pp.
- LESZCZUK, A. A.; Lorán, D.; Martinez, M. E.; Leizica, J. E.; Seppi, S. 2022. Estudio de los incendios ocurridos en la provincia de Misiones, Argentina entre diciembre del año 2021 a marzo del año 2022. *Acta de XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos*. (pp. 212-216). Concordia, Argentina.
- LLOVERÍA MONTORIO, R.; Pérez-Cabello, F.; García-Martín, A.; Vlassova, L.; De la Riva Fernández, J. 2014. *La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales*. Geocología, cambio ambiental y paisaje. 427-440 pp.
- MONTEALEGRE, A.L.; Lamelas, M. T.; De la Riva, J. (2017). Estimación de la severidad en incendios forestales a partir de datos LiDAR-PNOA y valores de Composite BurnIndex. *Revista de Teledetección*. 49, 23-34.
- NEARY, D. G.; Ryan, K. C.; De Bano, L. F. 2005. Wildland Fire in Ecosystems. *Rocky Mountain Research Station General Technical Report*, 4 (RMRS-GTR-42).

- PAUSAS, J. G.; Ouadah, N.; Ferran, A.; Gimeno, T.; Vallejo, R. 2002. *Fire severity and seedling establishment in Pinus halepensis woodlands, eastern Iberian Peninsula*. *Plant Ecology*, 169: 205-213 pp.
- PEÑA, M. A.; Martínez, G. 2021. Mapeo del daño en bosques incendiados de Chile central, mediante el modelado de índices espectrales ex-ante y ex-post. *Bosque* 42(2): 205-215.
- RAMO, R.; Rotela, E.; Bistinas, I.; Van Wees, D.; Bastarrika, A.; Chuvieco, E.; Van derWerf; G. R. 2021. African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. *PNAS* 118 (9): 111-158.
- SANCHEZ, M.; Baldassini, P.; Fischer, M. de los Á.; Torre Zaffaroni, J.; & Di Bella, C. M. (2023). Dónde, cuándo y cómo ocurren grandes incendios en la provincia de La Pampa, Argentina: Una caracterización basada en sensores remotos. *Ecología Austral*. 33(1), 211–228.
- TANASE, M.; De La Riva, J.; Pérez-Cabello, F. 2011. Estimating burn severity at the regional level using optically based indices. *Canadian Journal of Forest Research*. 41: 863-872.
- VEGA, J. A.; Fernández, C.; Pérez-Gorostiaga, P.; Fonturbel, T. 2008. The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain). *Forest Ecology and Management*. 1596-1603 pp.

ANEXO

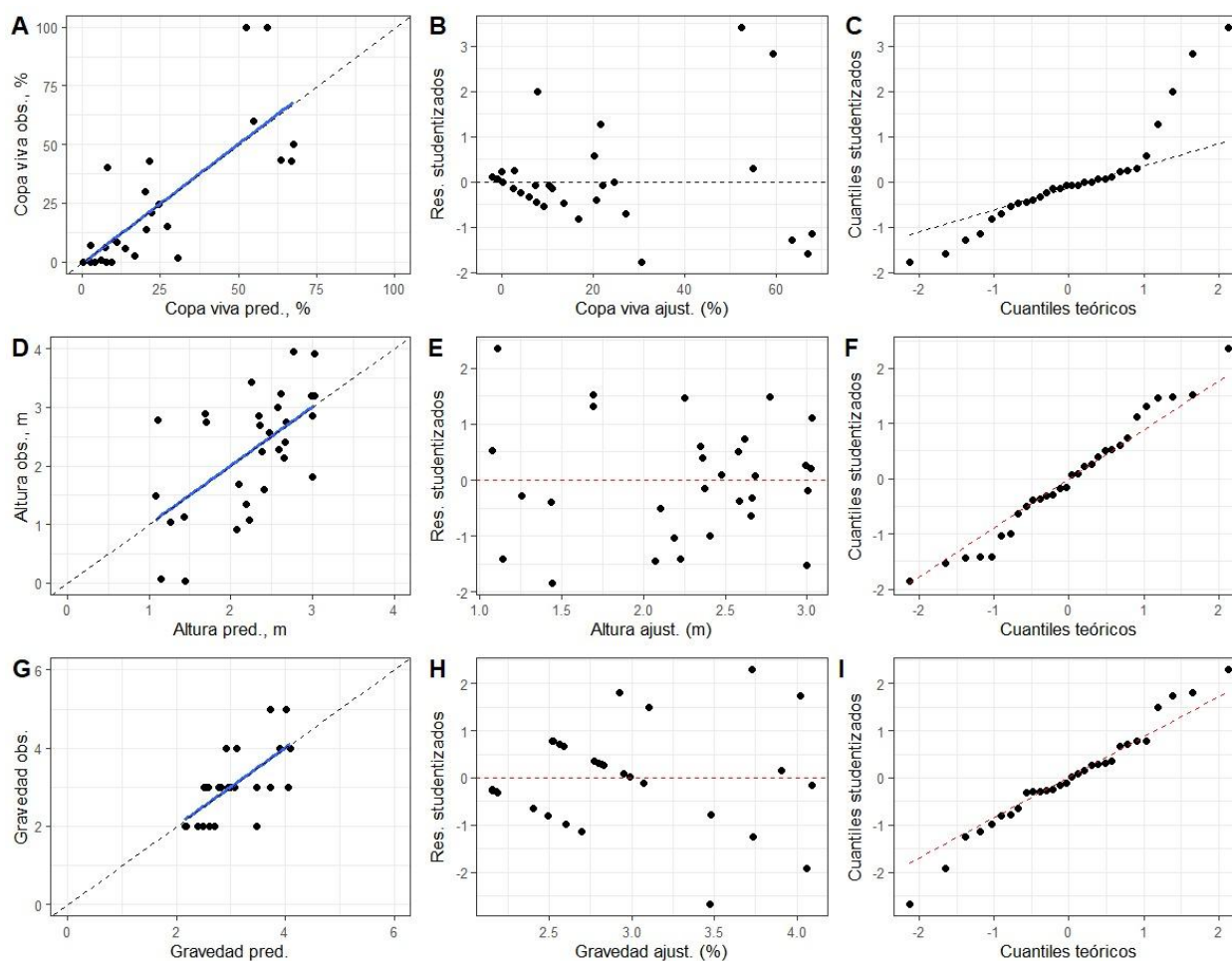


Figura 7. Análisis de los supuestos estadísticos para los modelos lineales simples. Las figuras 7 A B y C son los supuestos para porcentaje de copa viva, fig. 7 D E y F supuestos para Altura de soflamado y fig. 7 G H e I para gravedad de la parcela. Las fig. A D y G muestran la relación entre los valores predichos y los valores estimados por el modelo ajustado, la línea azul representa la relación entre estas variables, mientras que la línea punteada representa la diagonal 1:1. Fig 7 B E y H representan los residuos estandarizados y los valores ajustados. Fig. 7 C F e I QQplot de los residuos studentizados. Específicamente, la variable "Copa Viva" es una variable porcentual que toma valores entre 0 y 100 y tiene dificultades en el cumplimiento de los supuestos estadísticos estándar cuando se modela mediante regresiones lineales.

- A. **Copa Viva Observada vs. Copa Viva Predicha:** Muestra una relación lineal entre las medidas observadas y predichas de la copa viva, aunque observamos que la distribución de los datos no es homogénea.
- B. **Residuos Estandarizados vs. Copa Viva Ajustada:** Los residuos presentan un patrón de dispersión que sugiere heterocedasticidad, evidenciada por la forma de cono donde la varianza de los residuos aumenta con el valor ajustado. Esto indica que la constancia de la varianza (homocedasticidad), un supuesto clave para la regresión lineal, no se mantiene.

C. **Cuantiles Teóricos vs. Residuos Estandarizados:** Este gráfico QQ claramente muestra que los residuos no siguen una distribución normal, con desviaciones notables de la línea teórica, especialmente en los extremos. La normalidad de los residuos es fundamental para la validez de las pruebas estadísticas que involucran estimaciones de regresión.

Los paneles D a I, que están enfocados en otras variables; altura de carbonización y gravedad del incendio, no presentan problemas tan marcados como los observados para la copa viva. Estos otros modelos muestran una mejor conformidad con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, lo que los hace más robustos para inferencias estadísticas.

**Formulario de autorización de depósito de tesis/trabajo integrador final en la
 Comunidad Ciencias Agrarias del RIDUNaM
 (Repositorio Institucional Digital de la UNaM)**

Por intermedio de la presente, el abajo firmante, AUTOR del trabajo integrador final (grado) titulado **“Análisis de la severidad de incendios en la Reserva de Usos Múltiples Guaraní, Misiones a partir de índices espectrales obtenidos de sensores remotos.”** da FE de la autoría y originalidad de la obra mencionada, que fue dirigido por el Esp. Ing. Ftal. LESZCZUK Andrés Alejandro, presentada y defendida en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones (FCF-UNaM), el 13/12/2024, Acta N° 182101, con el fin de obtener el título de **Ingeniero Forestal**.

Tildar según corresponda

- Tesis de Posgrado
 Doctorado Maestría Trabajo Final Integrador
 Tesis de Grado

Derechos patrimoniales

Como autor, expreso mi conformidad en cuanto a la cesión gratuita de los derechos de reproducción y circulación de esta obra, en forma **NO EXCLUSIVA**, a la Facultad de Ciencias Forestales-UNaM. Dicha reproducción y circulación se podrá realizar, una o varias veces, en cualquier soporte, para todo el mundo, con fines sociales, educativos y científicos.





En virtud del carácter no exclusivo de esta cesión, el autor podrá reproducir y comunicar libremente la tesis o trabajo final integrador, a través de los medios que estime oportunos.

Condiciones de acceso en línea

- Autorizo el depósito de la tesis o trabajo final integrador en forma inmediata
 Autorizo el depósito del documento con embargo por el plazo de _____ meses a partir de la defensa de la misma.

Condiciones de uso de la tesis/TFI

Será puesta a disposición pública bajo las siguientes condiciones de uso:

	(BY) Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).
	(NC) No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
	(SA) Permite trabajos derivados — Siempre que se mantenga la misma licencia.
	Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual (by-nc-sa): No se permite un uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, la distribución de las cuales se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original.


Referencias:

- CC (Licencias Creative Commons).
 BY (Atribución).
 NC (No comercial).
 SA (Compartir igual).

Dados personales (llenar un cuadro por cada autor)

Apellido y Nombres	ANGERMEIER, Karen Irina
Teléfono/Celular	+54 9 3751 66-5044
Correo electrónico	karenangermeier1996@gmail.com

Se firma la presente en la Ciudad de Eldorado, Misiones a los 13 días del mes de diciembre de 2024.


Firma

36466695
Tipo y N° Documento

Karen Angermeier
Aclaración