Anexo 2. Informe del desarrollo de herramientas para el mapo de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel y su validación en campo.



Informe del Proyecto "Reforzamiento al Sistema Nacional de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México para el pronóstico de conglomerados y área quemada", con clave B-S-131553, convocatoria CONAFOR-2018-C02.

Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONAFOR-CONACYT

Autores: Dr. Daniel José Vega Nieva, Ing. Adrián I. Silva-Cardoza, Mc. Carlos Briones Herrera, Dr. Jaime Briseño Reyes, Dr. Pablito Marcelo López Serrano, Dr. José Javier Corral (FCF-UJED); Dr. Enrique Jardel Peláez, Dr. Oscar Balcázar (UdeG); Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo (UCh); Dr. Ernesto Alvarado (U. Washington); Dr. Sean Parks (USDA Forest Service, Missoula).

Resumen.

El mapeado de área quemada y severidad de incendios es fundamental para evaluar el grado de afectación de los ecosistemas y la toma de decisiones de prevención y supresión de incendios forestales, así como para la planeación de las acciones de protección o restauración de suelo y vegetación en los ecosistemas adaptados.

En el marco del proyecto CONAFOR-CONACYT de Reforzamiento al Sistema Nacional de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México para el pronóstico de conglomerados y área quemada", con clave B-S-131553, se han desarrollado herramientas para el mapeado de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel, y se ha llevado a cabo la validación en campo de estas herramientas.

En concreto, se han desarrollado los siguientes productos:

1. **Herramientas para el mapeado de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel.**

   Se han desarrollado dos herramientas complementarias, un código de descarga de índices de severidad de imágenes Sentinel mediante Google Earth Engine,(GEE) y un plug-in para QGIS para el mapeado del perímetro de área quemada a partir de las imágenes descargadas mediante el código de GEE, detalladas en los documentos:

- **Anexo 2.1.1**. Documentación y código del proceso de cálculo de índices de severidad de imágenes Sentinel 2 en Google Earth Engine.
- **Anexo 2.1.2.** Documentación y código del Plug in de Qgis 3.16 para el mapeo de área quemada a partir de imágenes Sentinel.
- **Anexo 2.1.3.** Manual de usuario de las herramientas de mapeo de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel.

2. **Validación en campo de las herramientas para el mapeado de área quemada y severidad de incendios forestales.**

   Se ha desarrollado un protocolo de campo para la evaluación de severidad en campo (Silva-Cardoza et al., 2021a). En base al protocolo se ha iniciado la validación en 266 parcelas medidas en Durango, Jalisco y Nuevo León, tal y como se detalla en el presente informe y en los anexos al mismo:

- **Anexo 2.2.1.** Metodología para la evaluación de la severidad de incendios forestales en campo.
- **Anexo 2.2.2.** Tesis de maestría: Evaluación y mapeo de la severidad de incendios forestales en la Sierra Madre Occidental de Durango.
- **Anexo 2.2.3.** Artículo: Evaluación de severidad de incendios forestales con imágenes Sentinel en el Estado de Durango.

El presente informe resume los avances en las actividades de desarrollo de herramientas para el mapeado de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel, y su validación en campo.

1. Introducción.

La cuantificación de las áreas afectadas, así como de su grado de afectación o severidad, es clave para el monitoreo de los impactos de los incendios en términos de mortalidad potencial, consumo de biomasa, y cálculo de emisiones de carbono (e.g. Lentille *et al*., 2006, Key y Benson, 2006; Li *et al*., 2018). Actualmente, los perímetros son delineados con base a trabajos de campo de delimitación de polígonos de incendios, con altos costes en términos de personal y un alto grado de incertidumbre.

En el proyecto CONAFOR CONACYT 252620 (2015-2018) para el desarrollo de un sistema de predicción de peligro de incendios para México, se desarrolló una herramienta semiautomatizada para el mapeado de área quemada en México con base a imágenes Landsat a 30 m de resolución (Cruz *et al*., 2017). La herramienta calculaba índices de área quemada a partir de las bandas descargadas en una computadora local tras la selección y descarga manual de imágenes Landsat. Se requiere desarrollar herramientas para sensores de mayor resolución como Sentinel a 10-20 m, que han mostrado buen potencial para medir área quemada (Huang *et al*., 2016; Fernández-Manso *et al*., 2016; Mallinis *et al*., 2018; Quintano *et al*., 2018; Belenguer-Plomer *et al*., 2018).

Además, la aparición de la plataforma Google Earth Engine permite una oportunidad para el procesado el línea de imágenes e índices satelitales con relativa rapidez, disminuyendo los tiempos requeridos en el proceso de selección manual de las mejores imágenes y posibilitando el cálculo automatizado el línea de mosaicos multitemporales de pixeles libres de nube, así como aligerando los requisitos de espacio en disco, y agilizando el cálculo de correcciones fenológicas que pueden mejorar la clasificación de área quemada y severidad de incendios (Parks et al., 2018). En consecuencia, en el presente proyecto, en colaboración con el servicio forestal de Estados Unidos (USDA Missoula), se ha desarrollado un código semi-automatizado para el cálculo y descarga en Google Earth Engine de índices de severidad y área quemada a partir de imágenes Sentinel, usando como insumos los conglomerados de puntos de calor del sistema de peligro, que fueron implementados en la primera etapa del proyecto de reforzamiento (Briones-Herrera et al., 2020).

Para poder contar con una herramienta confiable para la evaluación de área quemada y severidad en el país, se requiere de una calibración y validación en campo, muestreando rangos de afectación de incendios en distintos ecosistemas en las diferentes ecorregiones del país (e.g. Lentille et al., 2006; Key y Benon, 2006; Miller y Thode, 2007; Loboda et al., 2007; Miller et al., 2009; Arellano et al., 2017; Botella et al., 2017). El contar con herramientas validadas en campo para el mapeado de área quemada y severidad permitiría mejorar sensiblemente la evaluación de su impacto en términos de mortalidad y erosión potencial post-incendios, además de mejorar las cuantificaciones de biomasa consumida y emisiones asociadas en los incendios forestales en el país.

El presente informe resume las herramientas de mapeado de área quemada y severidad desarrolladas en la segunda etapa del proyecto CONAFOR-CONACYT-2018-C02-B-S-131553 "Reforzamiento al sistema nacional de predicción de peligro de incendios forestales de México para el pronóstico de conglomerados y área quemada", así como los avances en la validación en incendios medidos en campo de las mismas.

2. Desarrollo de herramientas de mapeo de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel.

El diagrama a continuación (Fig. 1) resume el proceso para la utilización de las herramientas desarrolladas para el mapeo de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel. El proceso se inicia con la descarga de conglomerados y puntos de calor en las fechas especificadas en el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios para México (SPPIF), siguiendo el proceso descrito en el Manual de usuario de las herramientas de mapeo de área quemada a partir de imágenes Sentinel (**Anexo 2.1.3**). En esta etapa previa de selección de insumos, el usuario selecciona el conglomerado de puntos de calor y consulta las fechas del incendio a partir de la información disponible en el sistema SPPIF.

A partir del perímetro del conglomerado de puntos de calor del incendio de interés, se realiza la descarga en Google Earth Engine de los índices de severidad (corregidos fenológicamente) calculados el línea a partir de imágenes Sentinel 2 y disponibles para descarga a una computadora local, usando el código descrito en el **Anexo 2.1.1** (Documentación y código del proceso de cálculo de índices de severidad de imágenes Sentinel 2 en Google Earth Engine) y en el **Anexo 2.1.3** (Manual de usuario de las herramientas de mapeo de área quemada a partir de imágenes Sentinel (Briones-Herrera et al., 2021).

Por último, empleando el plug-in de QGIS 3.16 descrito en el **Anexo 2.1.2** (Documentación y código del Plug in de Qgis para el mapeo de área quemada a partir de imágenes Sentinel) y en **el Anexo 2.1.3** (Manual de usuario de las herramientas de mapeo de área quemada a partir de imágenes Sentinel), se obtiene el mapa de área quemada. Además, el usuario puede obtener la cartografía de severidad empleando los umbrales de severidad obtenidos a partir de información de campo, descritos en los **Anexos 2.1.3 y 2.2.2**. (Silva-Cardoza, 2021).

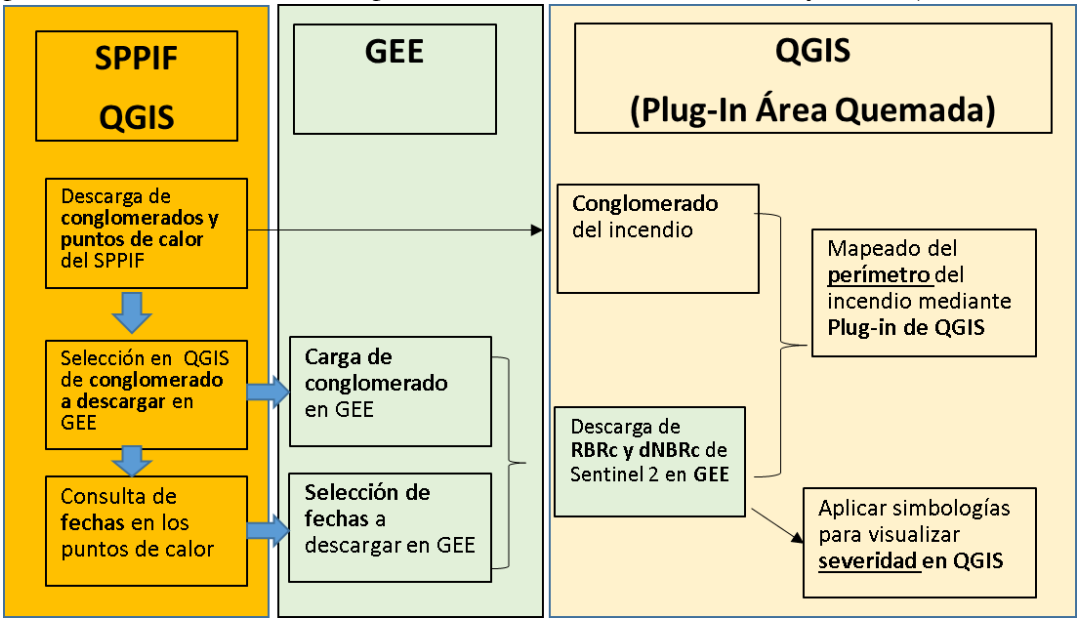


Figura 1. Proceso de descarga de imágenes Sentinel mediante Google Earth Engine (GEE), a partir de conglomerados y puntos de calor del SPPIF, para la visualización de mapas de severidad y cálculo de área quemada en QGIS.

3. Validación en campo de las herramientas de mapeo de área quemada y severidad de incendios forestales.

3.1. Desarrollo de una metodología para la evaluación de la severidad de incendios forestales en campo.

Se ha desarrollado un protocolo para la medición en campo de la severidad de incendios forestales (efectos de primer orden en vegetación y suelo), incluido en el Anexo 2.2.1 (Silva-Cardoza et al., 2021a). Con respecto a la vegetación, se miden los estratos de arbolado de > 7.5 cm (dosel y subdosel) y arbolado de <7.5 cm. Para cada árbol de > 7.5 cm, se miden variables dasométricas (diámetros normales y de copa, altura total y de inicio de copa), así como variables de severidad (altura de chamuscado, altura de soflamado letal y no letal, volumen de soflamado de copa). Para el arbolado de < 7.5 cm, se miden las frecuencias por categoría diamétrica, y se estiman por clase diamétrica el diámetro a la base, altura total y de inicio de copa, y el volumen de soflamado de copa promedios. En base al volumen de soflamado de copa (VOSF) del arbolado, pueden distinguirse las siguientes categorías de severidad en la vegetación: 1) Baja: VSOF < 30 %; 2) Media: 30-60%; 3) Alta: > 60% y < 90%; 4) Extrema: >90% (Fig. 2a). Para el suelo, se emplea una clave de 5 niveles de severidad, caracterizados por: 1) Muy baja: hojarasca soflamada, capa de fermentación intacta; 2) Baja: hojarasca consumida, capa de fermentación soflamada o calcinada sobre suelo mineral intacto; 3) Moderada: suelo mineral desnudo, sin alteración de estructura, puede haber ceniza (gris oscura); 4) Alta: suelo desnudo, con alteración de estructura en primer cm, puede haber ceniza (color gris claro o blanco); 5) Extrema: suelo desnudo, estructura completamente alterada en más de 1 cm de profundidad (Figura 2b).

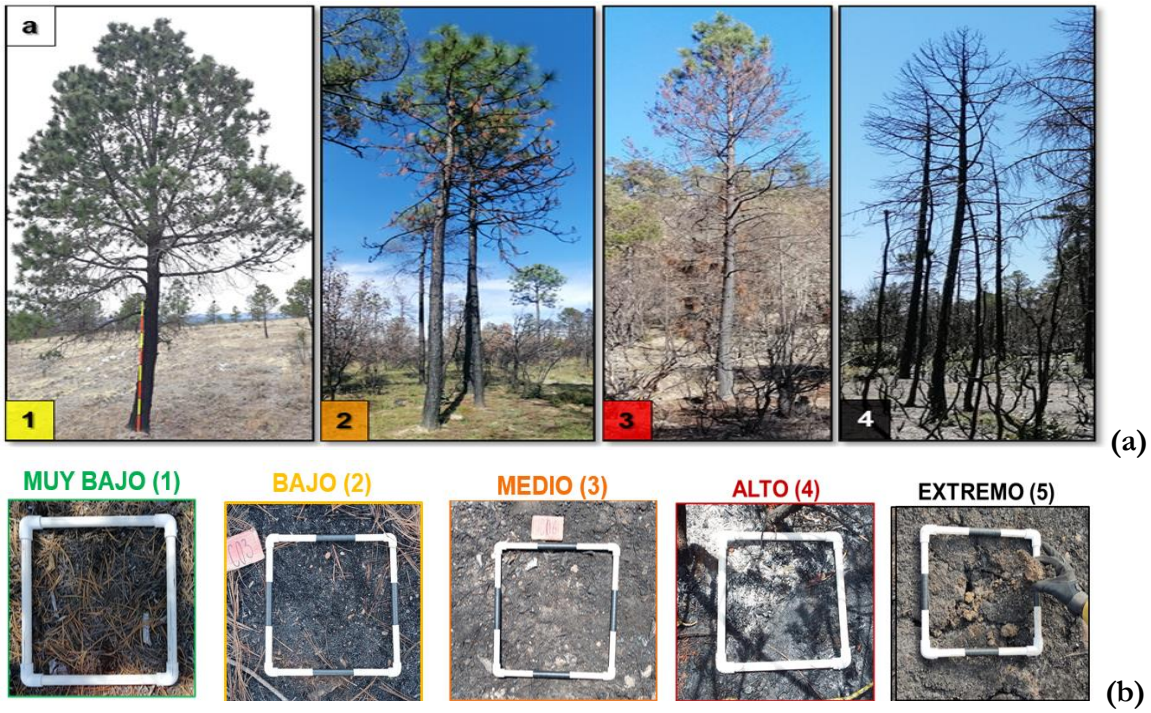


Figura 2. Clave visual de niveles de severidad en vegetación (a) y suelo (b) según la metodología evaluación en campo de Silva-Cardoza et al., 2021a (Anexo 2.2.1).

3.2. Validación en campo de las herramientas de mapeo de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel.

Se midieron un total de 266 parcelas de severidad en los estados de Durango (115 parcelas, Figura 3), Jalisco (110), además de una evaluación de emergencia en el incendio de Pinalosa en Nuevo León (51), según se muestra en el cuadro 1. Los incendios analizados se ubicaron en bosques de pino y encino (cuadro 1), en climas templados de frío húmedo a subhúmedo (Jardel et al., 2017), con un rango de severidades de baja-media a alta-extrema.

Estado	Clave	Incendio	Tipo de Vegetación	N parcelas
	S1-M (19DUR01)	Puerto de Arena (Mezquital)	Bosque de pino-encino	44
	S2-P (19DUR07)	El Caracol (Pueblo Nuevo)	Bosque de pino-encino	32
	S3-T (19DUR08)	Bagres (Tepahuanes)	Bosque de pino	39
Durango	**Total Durango**			115
	S1-CN (21BLP01)	Canoas (La Primavera)	Bosque de encino	49
	S2-CJ (21BLP02)	Cajetes (La Primavera)	Bosque de encino	25
	S3-V (21BLP03)	Volcanes (La Primavera)	Bosque de encino	26
Jalisco	**Total Jalisco**			100
Nuevo León	S1-P (21NLE01)	Pinalosa	Bosque de pino	51
	Total Nuevo León			51
Total				**266**

Cuadro 1. Resumen de parcelas de evaluación de severidad de incendios para la validación en campo de las herramientas de área quemada y severidad. Donde: N parcelas: número de parcelas.

Para cada parcela, se midieron las variables de severidad descritas en el protocolo de campo (Silva-Cardoza et al., 2021a, Anexo 2.2.1). A partir de las variables de severidad se obtuvo un índice de severidad en campo (ISE) con valores de 0 a 100, calculado como promedio del volumen de soflamado de los estratos de vegetación (0-100%) y la severidad del suelo (1-5), escalada de 0-100, según el proceso descrito en el estudio de Silva Cardoza (2021) (Anexo 2.2.2).

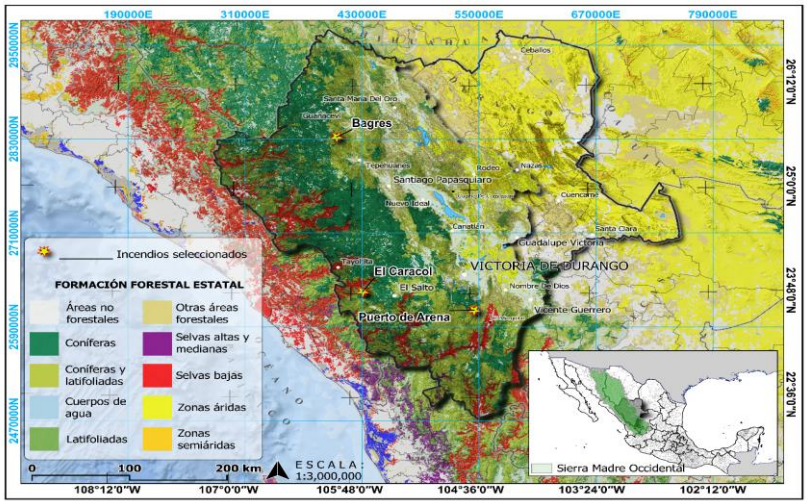


Figura. 3. Ubicación de los tres incendios seleccionados para la medición de severidad en campo en el estado de Durango (Silva Cardoza, 2021).

3.2.1. Análisis del umbral de área quemada por incendio.

En el estudio de Silva-Cardoza (2021) (anexo 2.2.2) se analizó para los incendios de Durango, el umbral de área quemada, definido como el valor de los índices de Sentinel 2 analizados, RBRc y dNBRc (Parks et al., 2018), con un mayor kappa para la clasificación quemado/no quemado en cada incendio. Se evaluaron 9 técnicas de compuesto de Google Earth engine, incluyendo 3 fechas de compuesto (1,2,3 meses) y 3 técnicas de compuesto: Promedio-Promedio (PP), Promedio-Mínimo (PM) y Mínimo-Mínimo (MM) para las imágenes previa y posterior al incendio.

Para todos los sitios analizados, se observó una disminución en la capacidad predictiva de las imágenes al aumentar el periodo del compuesto de imágenes de 1 a 3 meses (Figura 4), posiblemente asociada a la disminución del contraste del área quemada por la recuperación de la misma en el segundo y tercer mes, estando más marcado el contraste en el primer mes. Con respecto a las técnicas de compuesto analizadas, se observó en uno de los tres sitios analizados (S2-Pueblo Nuevo) una disminución del valor de kappa usando el promedio en el periodo posterior (PP, figura 4), probablemente ligado a fenómenos de precipitación que ocurrieron inmediatamente después del incendio en esta localidad. El uso del mínimo en el periodo posterior (PM y MM), por el contrario, se mostró eficaz en minorar los efectos de la precipitación, al seleccionar las fechas más secas en cualquiera de las 3 ventanas temporales de búsqueda analizadas (Figura 4). Se recomienda en consecuencia el uso de ventanas de un mes para el compuesto de Sentinel y el uso del mínimo en la imagen posterior al incendio.

Los umbrales óptimos de área quemada se encontraron en su mayoría en el rango 30 a 100 para RBRc y de 30 a 120 para dNBRc, estando dentro del rango de la literatura (e.g. Loboda et al., 2007; Parks et al., 2018). Además de por las técnicas de compuesto, los umbrales oscilaron ente sitios, sugiriendo que existen factores de fenología adicionales a la corrección propuesta por Parks et al. (2018), que deberían ser analizados en futuros estudios incluyendo una muestra de ecosistemas y condiciones climáticas, y posiblemente, metereológicas.

3.2.2. Análisis de umbrales de severidad y mapeado de los incendios.

En los estudios de Silva-Cardoza (2021) y Silva-Cardoza et al. (2021b) (anexos 2.2.2 y 2.2.3) se analizó para los datos de Durango la correlación entre la severidad medida en campo y diferentes índices satelitales para Sentinel, calculados a partir de imágenes de 1 fecha descargados de Earth Explorer y compuestos de 1, 2, y 3 meses descargados a partir de Google Earth Engine. Se encontró que el índice RBRc (Parks et al., 2014, 2018) de Sentinel, calculado con las imágenes de 1 mes, mostró la mayor capacidad para predecir los datos observados de severidad de campo, con un R^2 de aproximadamente 0.71 y un error cuadrático medio de aproximadamente 98 (unidades de RBRc, de 0 a 1000) para los compuestos usando el mínimo en la imagen posterior, (PM o MM). Al igual que en el caso del análisis del umbral de área quemada, se observaron peores resultados para la predicción de la severidad del incendio con compuestos empleando el promedio en la fecha posterior (PP), así como con el cálculo con imágenes de 2 o 3 meses, confirmando que el compuesto de 1 mes, usando el mínimo en la imagen posterior al incendio, resulta la técnica de compuesto de imágenes más adecuada, tanto para la discriminación del perímetro área quemada como para el mapeo de severidad.

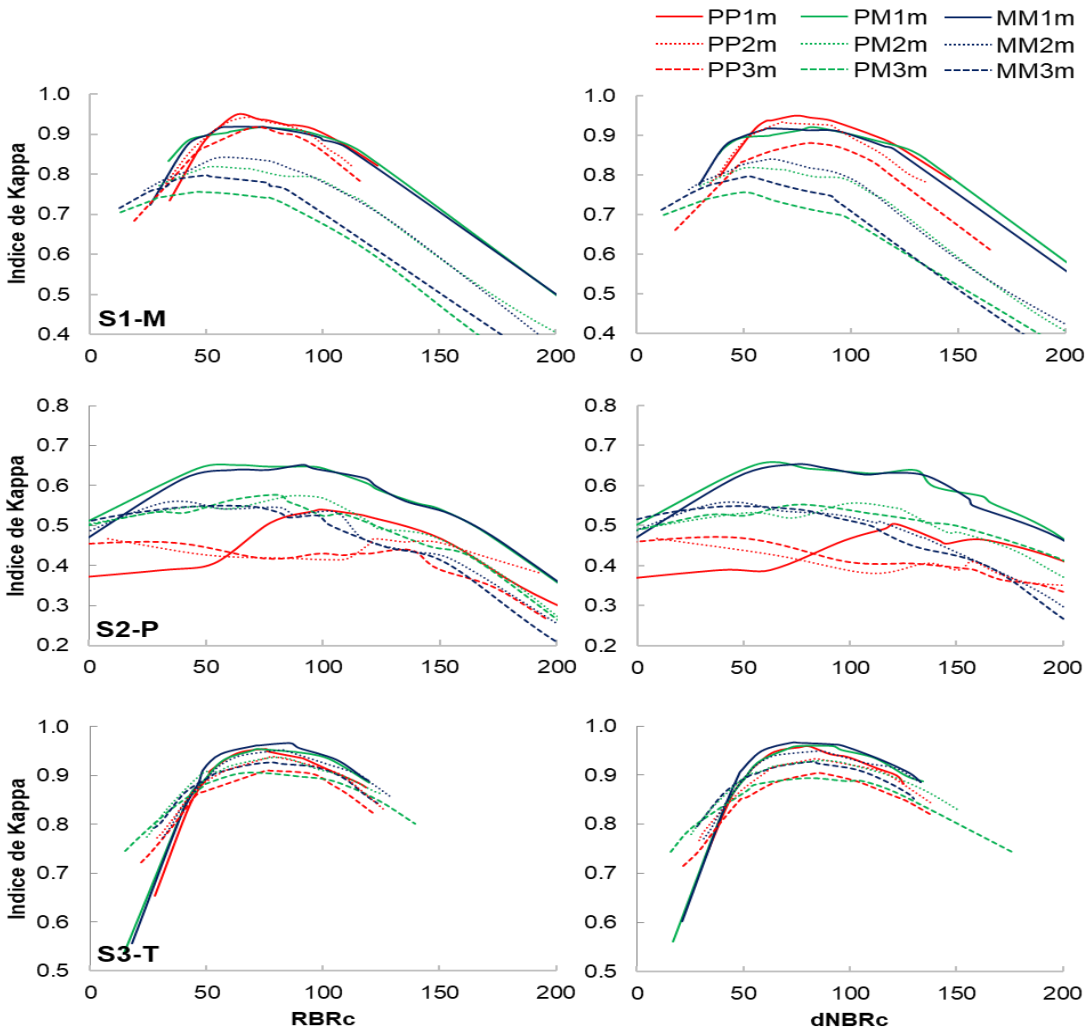


Figura. 4. Gráficos de los umbrales de área quemada y su valor de kappa para los incendios seleccionados y sus compuestos con RBRc y dNBRc en GEE. Incendios: S1-M = Mezquital, S2-P = Pueblo Nuevo, S3-T = Tepehuanes. Prefijo: PP= Compuesto promedio en el pre y post, PM= promedio pre y mínimo post, MM= mínimo en el pre y post. Sufijo: 1m, 2m, 3m = 1, 2 y 3 meses (Silva Cardoza et al., 2021b).

Se muestra en la figura 5 a continuación los mapas de severidad para los 3 incendios medidos en el estado de Durango, empleando los umbrales de severidad obtenidos en el estudio de Silva-Cardoza (2021) para los índices RBRc y dNBRc, de 1 mes usando el mínimo tanto en imagen previa como posterior (MM). Para cada incendio se tomó el límite de la categoría no quemado en base al umbral de área quemada obtenido en base al análisis de su coeficiente kappa (figura 5). En negro se muestra el perímetro del conglomerado de puntos de calor MODIS y VIIRS (Briones-Herrera et al., 2020). Se muestran como puntos las 114 parcelas medidas en los 3 incendios, coloreadas según su nivel de severidad en base al índice de severidad de campo ISE. Se puede observar un buen acuerdo entre las parcelas de campo y los mapas de severidad, particularmente para el índice RBRc, que muestra mayor capacidad de capturar el daño relativo a la vegetación en áreas de baja cobertura arbolada (por ejemplo, en los matorrales al occidente del incendio del Mezquital (Fig. 5 b) que el índice de severidad absoluta dNBRc, que puede infraestimar el daño relativo en estas áreas de menor biomasa inicial, coincidiendo con las observaciones de Miller y Thode (2007) o Parks et al. (2014).

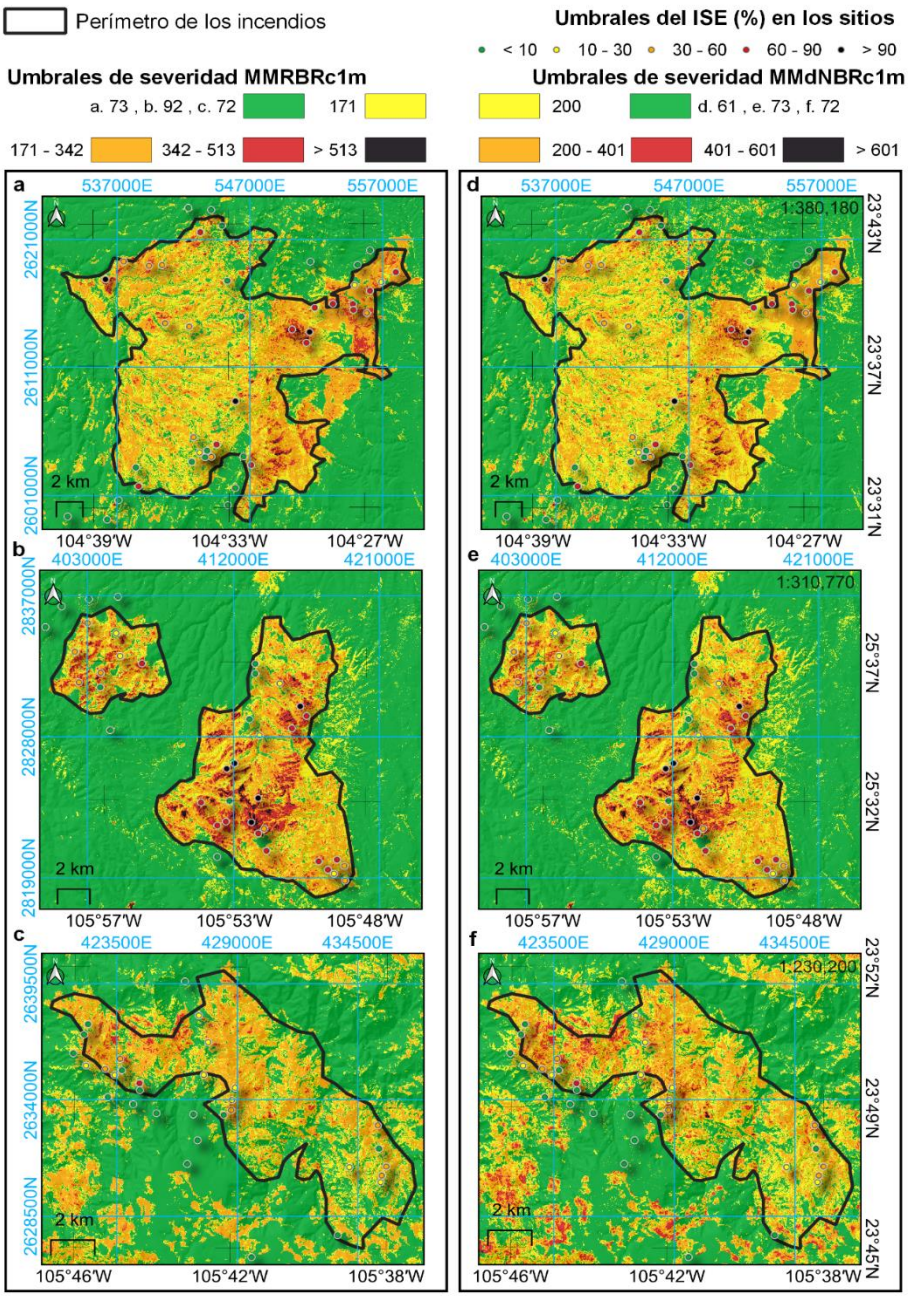


Figura 5. Mapeo de la severidad de los incendios analizados en Durango con el compuesto de 1 mes, usando el mínimo en pre y post (MM). Las imágenes de la izquierda corresponden al índice RBRc; las de la derecha as dNBRc. Los incendios mapeados son a) y d) Mezquital, b) y e) Tepehuanes, c) y f) Pueblo Nuevo. (Silva-Cardoza, 2021).

Se pueden consultar más detalles del análisis de los incendios de Durango en la tesis de Silva-Cardoza (2021) y la publicación de Silva-Cardoza et al. (2021b) (anexos 2.2.2 y 2.2.3).

El trabajo de análisis de umbrales de severidad incluyó también la medición en agosto de 2021 de 100 parcelas en los 3 incendios del bosque de la Primavera en Jalisco (figura 6), que incluyó la ocurrencia de rodales de alta severidad, particularmente en su parte sur (figuras 6 y 7).

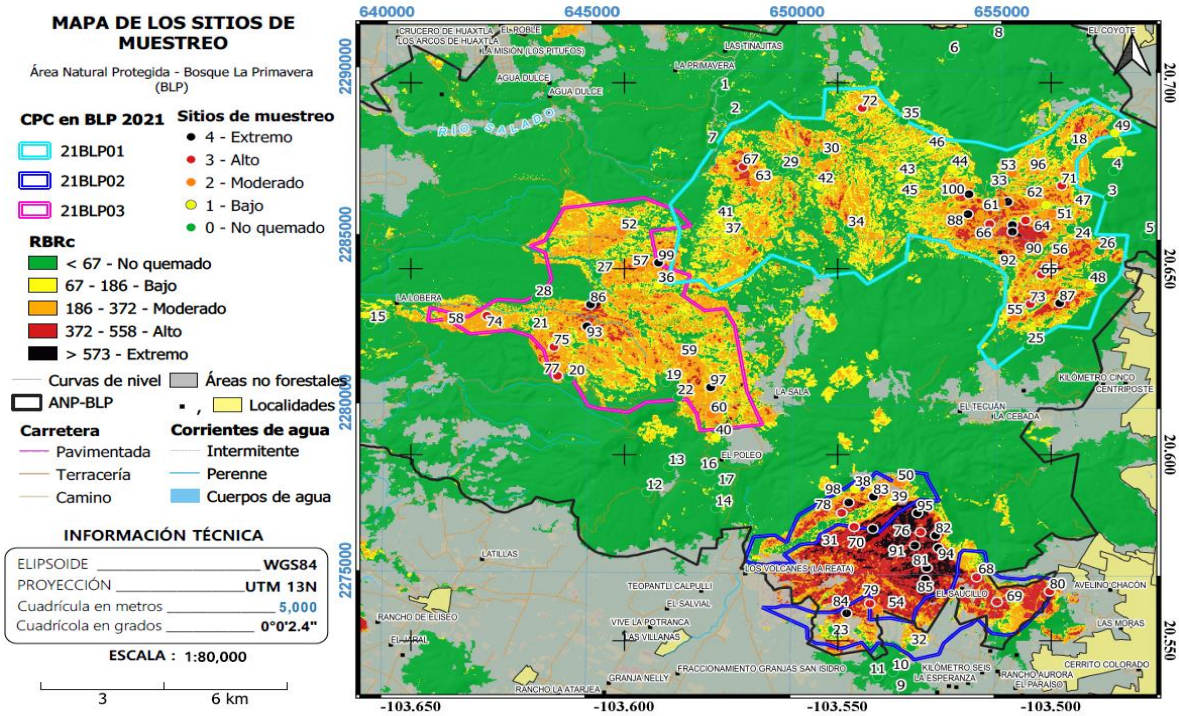


Figura 6. Mapa de severidad de los 3 incendios del bosque de la Primavera a partir del índice RBRc, incluyendo la ubicación de las parcelas de medición de severidad en campo.



Figura 7. Rodal de severidad alta a extrema, con arbolado completamente calcinado y mantillo completamente consumido, en incendio al sur del bosque de Primavera. Fotografía: Jardel, 2021.

Se ajustaron modelos para predecir el índice de severidad medido en campo (ISE) a partir del índice RBRc de Sentinel 2 de 1 mes para los datos de Durango y Jalisco separadamente, así como para la combinación de ambos datos (Fig 8). Los mejores modelos fueron lineales sin intercepto en los 3 casos. Se muestran los coeficientes y la bondad de ajuste para los índices dNBRc y RBRc, corroborándose un mejor ajuste para predecir el índice de campo ISE a partir del RBRc tanto en los dos estados separadamente como en la combinación de ambos (Cuadro 2).

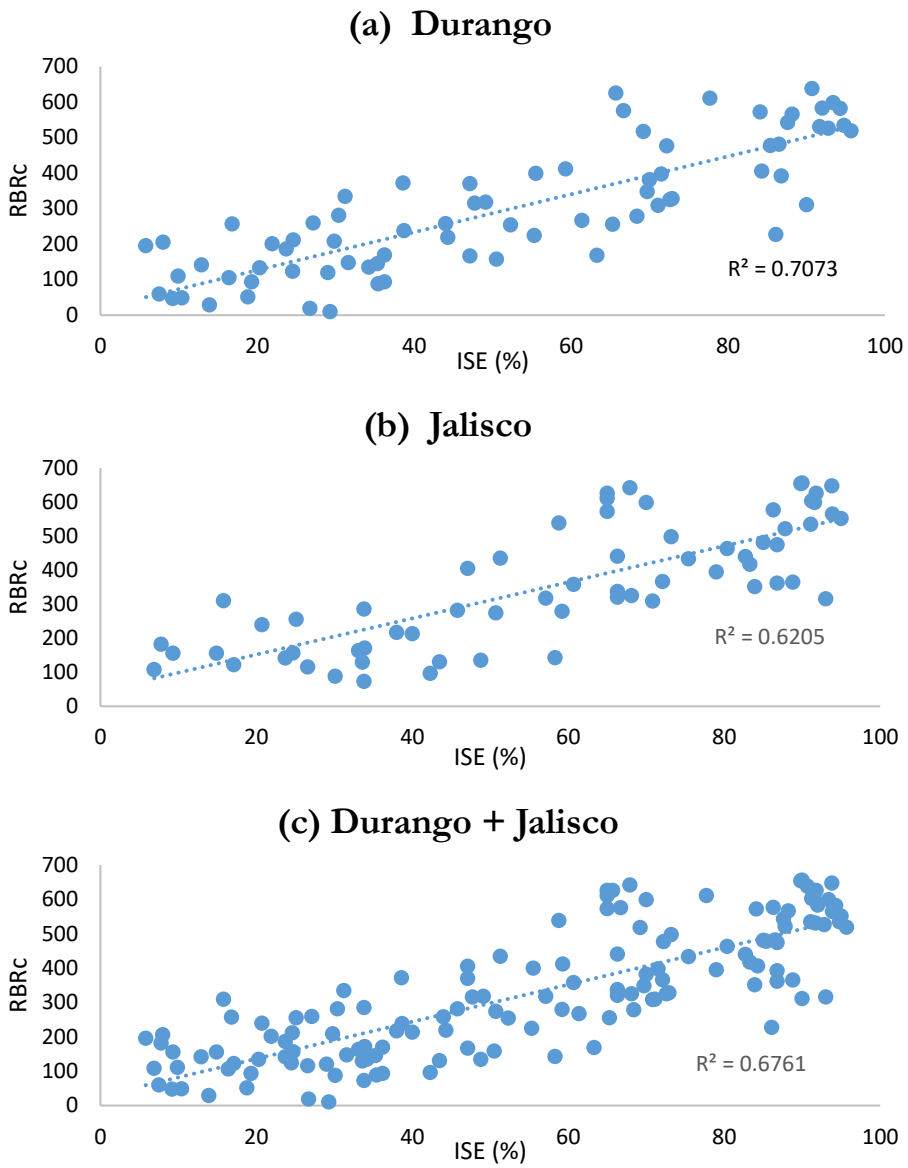


Figura 8. Relación entre el índice de severidad (ISE) y el índice RBRc de Sentinel 2 para los incendios de Durango (a), Jalisco (b) y para los incendios de Durango y Jalisco (c).

Índice	Estado	a	SD	R^2	RMSE
	(a) Durango	5.64	0.20	0.71	98.2
	(b) Jalisco	5.96	0.22	0.62	111.1
RBRc	(c) Durango + Jalisco	5.81	0.14	0.67	104.7
	(a) Durango	6.72	0.26	0.66	132.5
	(b) Jalisco	7.87	0.32	0.58	166.4
dNBRc	(c) Durango + Jalisco	7.31	0.21	0.68	153.1

Cuadro 2. Coeficientes y bondad de ajuste de los modelos para predecir RBRc y dNBRc a partir del índice de campo ISE . Donde: a: coeficiente del modelo lineal sin intercepto; SD: desviación estándar del coeficiente; R^2: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.

Evaluación de emergencia en el incendio de Pinalosa (Nuevo León).

Por último, en colaboración con personal de CONAFOR, se realizó una evaluación de emergencia, incluyendo el recorrido en campo por cinco brigadas integradas por personal de UJED y CONAFOR y la participación en un sobrevuelo de reconocimiento en helicóptero, en el incendio de Pinalosa (Nuevo León y Coahuila) con el objetivo de cuantificar el nivel de afectación en vegetación y suelo, así como los posibles riesgos erosivos en el citado incendio. Se muestra en la Fig. 9 el plan de trabajo, incluyendo las 51 parcelas recorridas en campo. Las parcelas fueron estratificadas en las categorías alta y extrema del índice dNBR, para analizar el umbral del índice que corresponda con dos condiciones que se consideran detonantes de alto riesgo erosivo: 1) calcinación completa de arbolado (severidad de vegetación extrema, según clave mostrada en Fig.2a); 2) niveles alto (4) y extremo (5) de severidad en el suelo, según la clave visual mostrada en Fig 2b y en el protocolo de evaluación de severidad en campo (Silva-Cardoza et al., 2021a).

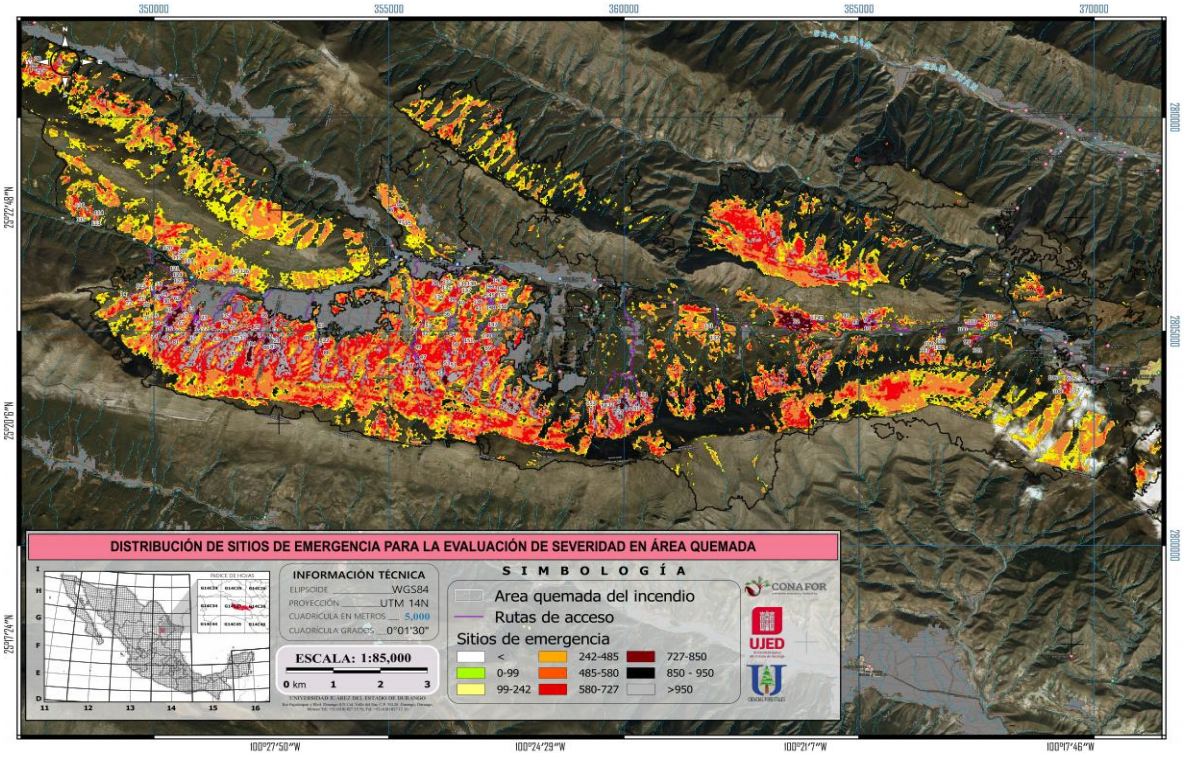


Figura 9. Plan de trabajo para la evaluación de emergencia en el incendio de Pinalosa (Nuevo León). Los números muestran la ubicación de las parcelas de campo, ubicadas en un gradiente del índice dNBR, con el objetivo de delimitar las áreas de afectación extrema en arbolado y suelo.

Los 51 datos medidos en el incendio de Pinalosa (Nuevo León) representan condiciones extremas de calcinación de arbolado y afectación al suelo (Fig 10 a). Se realizó un ajuste conjunto con los datos de Durango y Jalisco, resultando en un conjunto de 266 parcelas analizadas (Fig. 10b y Cuadro 3). A partir de los modelos desarrollados, se obtuvieron los umbrales de los índices de Sentinel RBRc y dNBRc que corresponden con niveles del índice de severidad extrema (>90%), alta (60-90%), media (30-60%), baja (10-30%) y muy baja (< 10%) (Cuadro 4).

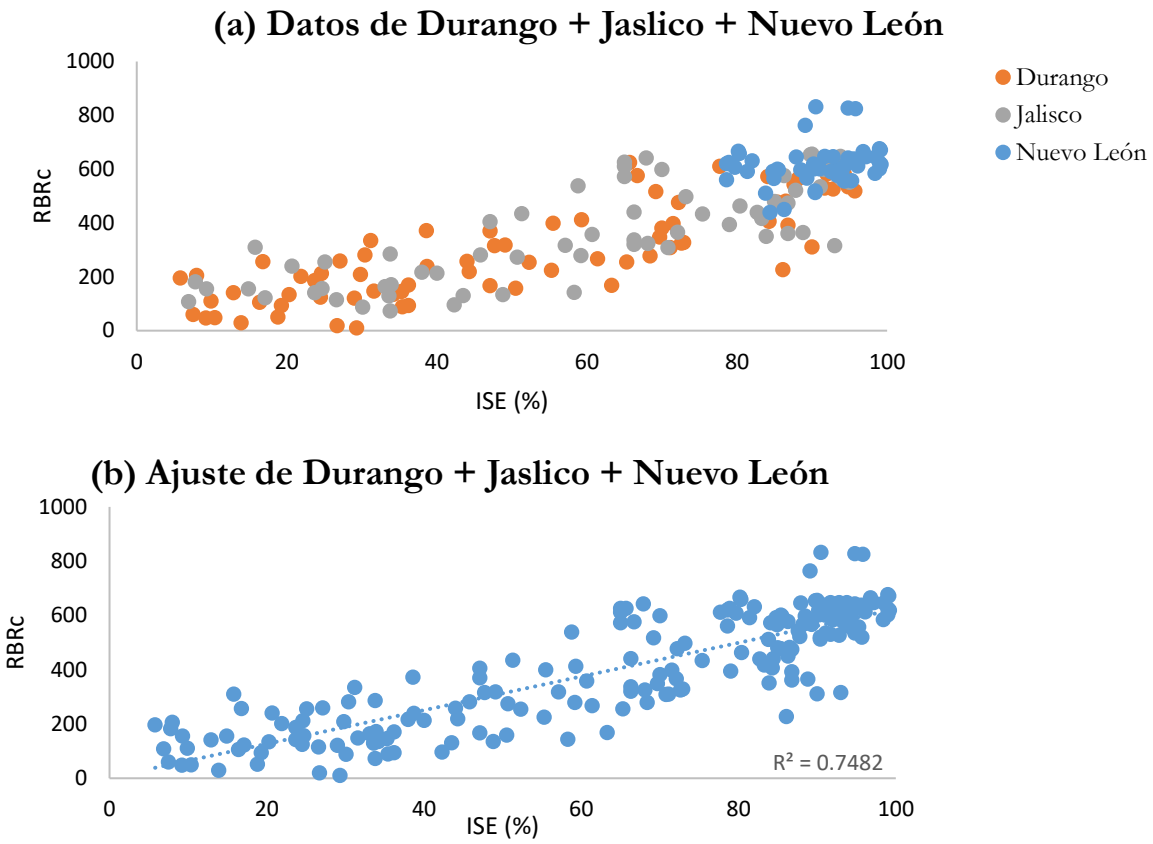


Figura 10. Relación entre el índice de severidad (ISE) y el índice RBRc de Sentinel 2 para los incendios de Durango, Jalisco y Nuevo León.

Índice	Estado	a	SD	R^2	RMSE
RBRc	Durango +Jalisco +Nuevo León	6.24	0.11	0.75	104.1
dNBRc	Durango +Jalisco +Nuevo León	8.50	0.18	0.69	178.3

Cuadro 3. Coeficientes y bondad de ajuste de los modelos para predecir RBRc y dNBRc a partir del índice de campo ISE para los datos combinados de Durango, Jalisco y Nuevo León. Donde: a: coeficiente del modelo lineal sin intercepto; SD: desviación estándar del coeficiente; R^2: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.

	Nivel de Severidad				
Índice	Muy baja	Baja	Media	Alta	Extrema
RBRc	<62	62-187	187-375	375-562	>562
dNBRc	<85	85-255	255-510	510-765	>765

Cuadro 4. Umbrales para los índices RBRc y dNBRc correspondientes a los niveles de severidad del índice ISE (%): = < 10 (muy baja), 10-30 (baja), 30-60 (moderada), 60-90 (alta), > 90 (extrema).

Para el incendio de Pinalosa (Nuevo León), la superficie con severidad extrema (calcinación completa del arbolado, mostrada en negro en Fig. 11), se estimó en un total de 1,367 has de las 14,328 has del perímetro del incendio, estimadas mediante las herramientas de área quemada de Sentinel desarrolladas en el proyecto, validadas con la información de campo (Fig. 11). Se corroboró el nivel de afectación mapeado con el sobrevuelo en helicóptero (Fig. 12).

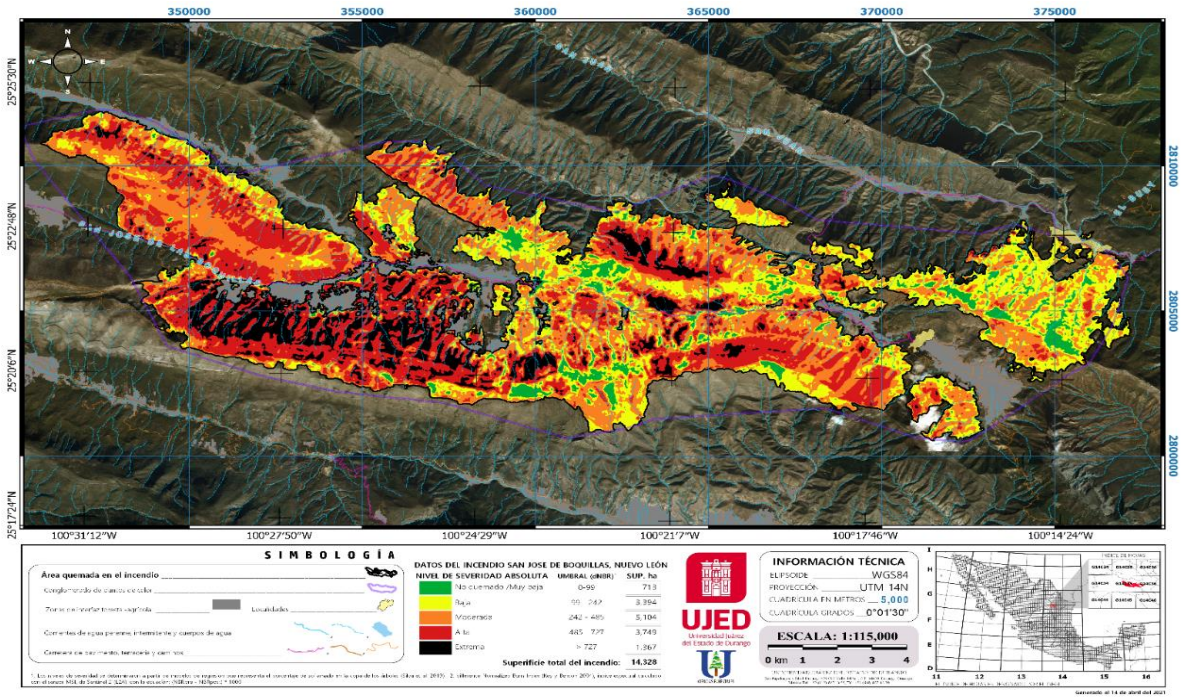


Figura 11. Mapa de severidad en la vegetación en el incendio de Pinalosa, empleando las herramientas de mapeo de área quemada y severidad validadas en campo**.** En negro se muestran las áreas donde se espera la calcinación completa del arbolado (severidad extrema).



Figura 22. Fotografía del sobrevuelo del incendio en Pinalosa (Nuevo León), mostrando áreas no quemadas (verdes), soflamadas (marrón) y completamente calcinadas (en negro). Los mayores riesgos erosivos se esperan en las áreas de severidad extrema (calcinación completa del arbolado, en negro) que además presenten una severidad alta en el suelo (materia orgánica del suelo consumida, ceniza color gris claro). Fotografía: Adrián Silva-Cardoza.

En base a los mapas de severidad validados con la información de campo de severidad en vegetación y suelo (Fig. 11-13), se delimitaron áreas prioritarias para la protección del suelo, considerando adicionalmente la capa de pendiente (Figura 14a). Los criterios considerados para definir la prioridad de protección del suelo fueron:

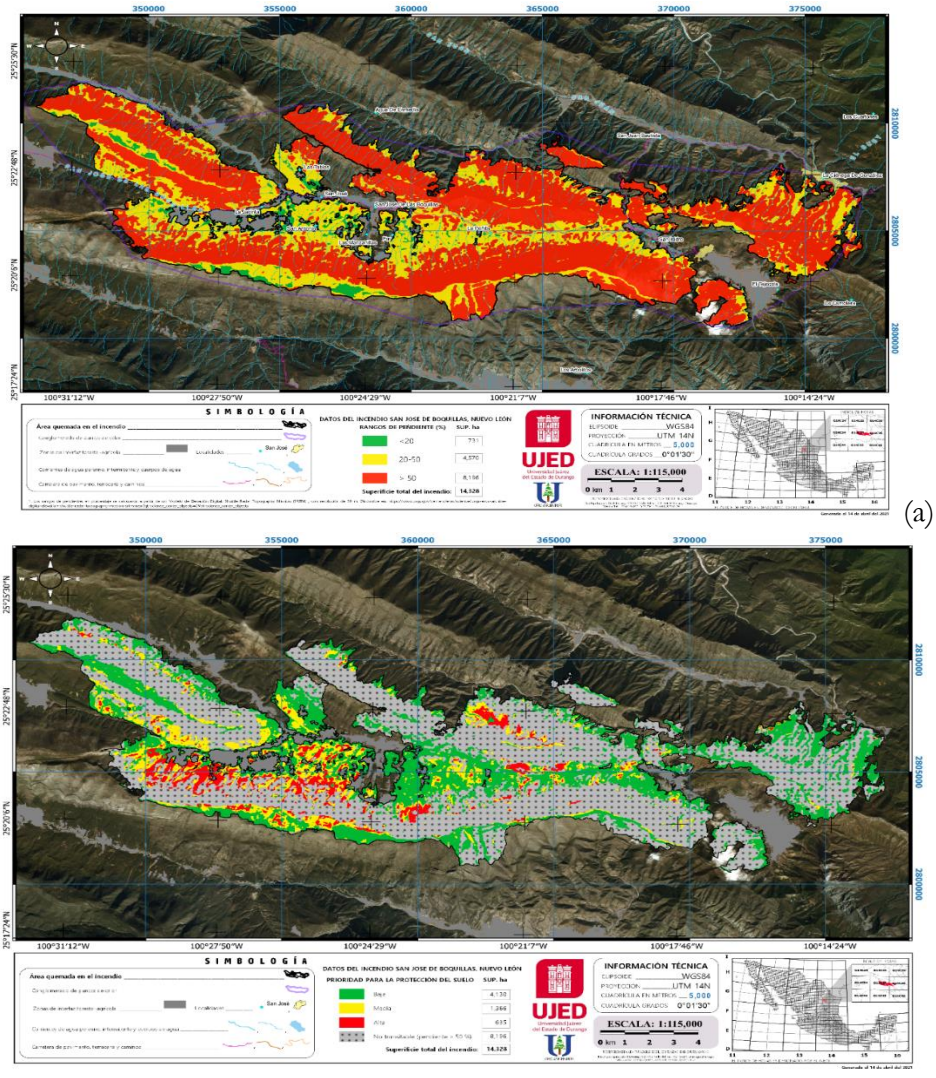
- **Prioridad Alta:** Severidad de arbolado extrema (calcinación completa de arbolado) y severidad de alta a extrema del suelo (calcinado completo de mantillo, presencia de ceniza gris clara, indicando materia orgánica del suelo consumida) + pendientes de acceso fácil a moderado (20 a 50 %).
- **Prioridad Media:** Severidad de arbolado media o alta (soflamado parcial de copas, no completamente calcinadas).
- **Prioridad Baja:** Pendientes inferiores a 20% o severidad de arbolado baja.
- **No transitable:** pendientes superiores al 50%.



Figura 13. Evaluación de severidad en campo en el incendio de Pinalosa. Se observa amplia afectación al suelo en las áreas completamente calcinadas (fotografía superior derecha), con consunción completa de hojarasca y fermentación, así como consunción de la materia orgánica del suelo mineral (ceniza gris clara), indicando severidad alta del suelo (nivel 4). Es evidente también una afectación extrema de la estructura del suelo (nivel 5), evidenciada por los tonos anaranjados en áreas de pérdida extrema de estructura, redundando en una elevada hidrofobicidad y un alto riesgo de erosión del suelo asociado. Fotografía: Adrián Silva-Cardoza.

El mapa de prioridad de protección de suelo resultante, a partir de la cartografía de severidad validada en campo (Fig. 11) y del mapa de pendientes (Fig. 14a), se muestra en la Figura 14 (b). Se delimitaron un total de 635 has, de las 14,328 has del perímetro del incendio, (en rojo, Fig. 14b), con prioridad alta para la protección del suelo para minimizar riesgos erosivos.

Los mapas y resultados de la evaluación de severidad y prioridad de protección del suelo se incluyeron en la evaluación de CONAFOR para la declaración de catástrofe y solicitud de fondos al FONDEN para el área afectada en Pinalosa (Nuevo León), con el objetivo de coadyuvar a la evaluación del impacto del incendio y la priorización de las acciones de protección y restauración de suelo y vegetación en el área más severamente afectada del incendio.



(a)

(b)

Figura 14. Mapa de pendientes (a) (<20, 20-50 y > 50%) y **mapa de prioridad de protección del suelo** (b), considerando la severidad esperada en vegetación y suelo (Fig. 11) y el nivel de pendiente (Fig. 14a). En rojo en la Fig. (b) se muestran las áreas de prioridad de protección alta, que cuentan con severidad extrema en vegetación y suelo, y pendientes en el intervalo 20 a 50%. En gris se muestran áreas no transitables (pendientes de > 50 %).

Conclusiones.

En el marco del proyecto CONAFOR-CONACYT de Reforzamiento al Sistema Nacional de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México para el pronóstico de conglomerados y área quemada", con clave B-S-131553, se han desarrollado herramientas para el mapeado de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel, y se ha iniciado la validación en campo de estas herramientas.

Las herramientas de mapeo de área quemada incluyen un código de descarga semiautomatizado de imágenes Sentinel (descrito en el anexo 2.1.1), y un pulg-in para Q.GIS para el mapeo de perímetros de área quemada (anexo 2.1.2), documentados en un manual de usuario (anexo 2.1.3) y en la sección de Videos-> Herramientas de mapeo de área quemada y severidad del Sistema Nacional de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (http://forestales.ujed.mx/incendios2/).

Las herramientas han sido validadas en campo en un total de 266 parcelas en bosques de pino y encino en las regiones Norte (Durango), Noreste (Nuevo León), Occidente (Jalisco), incluyendo su aplicación para la evaluación de emergencia inmediatamente posterior al incendio de Pinalosa (Nuevo León), en colaboración con personal de CONAFOR, permitiendo apoyar las tareas de evaluación de efectos de primer orden en vegetación y suelo, y apoyando a la priorización de las acciones de protección del suelo en las áreas de mayor afectación. El protocolo de monitoreo en campo y los umbrales de severidad y área quemada, serán calibrados y validados en la tercera etapa en 434 parcelas adicionales (para un total de 700) en una variedad de ecosistemas desde bosques templados a tropicales, incluyendo las regiones Sureste (Yucatán) y Centro (México y Michoacán), analizando las posibles especificidades del tipo de ecosistema, tanto en el protocolo de campo como en los umbrales de las herramientas analizadas.

Las herramientas han sido transferidas al personal operacional de CONAFOR, incluyendo personal de la Gerencia de Manejo del Fuego, centros regionales y estatales de manejo del fuego, así como personal de las áreas de sanidad, restauración y monitoreo forestal, permitiendo que las integren operacionalmente en su trabajo diario, tal y como se describe en el Anexo 3 (informe de los talleres de capacitación).

Referencias.

Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D. 2017. Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013. Revista de Teledetección, 49, 49-61. https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137

Briones-Herrera, C.I.; Silva-Cardoza, A. Vega-Nieva, D.J.; Briseño-Reyes J. 2021. Manual de usuario de las herramientas de mapeo de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel. 45 pg. Disponible en: http://forestales.ujed.mx/incendios2/descargas/Manual%20AQ_Sentinel_v1_1_071021.pdf

Briones-Herrera, C.I.; Vega-Nieva, D.J.; Monjarás-Vega, N.A.; Briseño-Reyes, J.; López-Serrano, P.M.; Corral-Rivas, J.J.; Alvarado-Celestino, E.; ArellanoPérez, S.; Álvarez-González, J.G.; Ruiz González, A.D.; Jolly ,W.M.; Parks, S.A. 2020. Near Real-Time automated early mapping of the perimeter of large forest fires from the aggregation of VIIRS and MODIS active fires in Mexico. Remote Sensing, 12(12): 2061. https://doi.org/10.3390/rs12122061

Belenguer-Plomer M.A.; Mihai A. Tanase; Angel Fernandez-Carrillo; Emilio Chuvieco (2018). Insights into burned areas detection from Sentinel-1 data and locally adaptive algorithms. Proceedings Volume 10788, Active and Passive Microwave Remote Sensing for Environmental Monitoring II; 107880G (2018) https://doi.org/10.1117/12.2325672

Botella, M.A.; A. Fernández-Manso. (2017). Study of post-fire severity in the Valencia region comparing the NBR, RdNBR and RBR indexes derived from Landsat 8 images. Revista de Teledetección (2017)

Cruz I., Cuahutle M., Ressl R., Vega-Nieva D.J. 2017. Módulo de mapeo satelital de áreas quemadas en México. Anexo 2. Informe segunda etapa del proyecto CONAFOR-CONACYT 252620 "Desarrollo de un Sistema de Predicción de Peligro de Incendios" Clave 252620

Fernández-Manso, A.; O. Fernández-Manso, C. Quintano SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 50 (2016), pp. 170-175

Huang, H., D.P. Roy, L. Boschetti, H.K. Zhang, L. Yan, S.S. Kumar, J. Gomez-Dans, J. Li. (2016). Separability analysis of sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination. Remote Sens., 8 (10) (2016), p. 873

Jardel-Peláez, EJ; Quintero-Gradilla, SD; Lomelí-Jiménez, AJ; Graf-Pérez, D; Rodríguez Gómez, JM. 2017. Generación de modelos de comportamiento del fuego para los tipos de combustibles forestales de México. Reporte del Proyecto: "Caracterización y clasificación de combustibles para generar y validar modelos de combustibles forestales para México" CONAFOR-CONACyT 2014- CO2-251694.

Key, C.H., Benson, N.C. (2006). Landscape Assessment (LA). In: Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S., & Gangi, L.J. (eds,). FIREMON:

Fire effects monitoring and inventory system. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Gen. Tech. Rep. RMRSGTR-164-CD, 1-55

Lentile, L. ; Z. Holden, A. Smith, M. Falkowski, A. Hudak, P. Morgan, S. Lewis, P. Gessler, N. Benson. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects Int. J. Wildland Fire, 15 (3) (2006), p. 319

Loboda T., O'Neal K.J., Csiszar I. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data Remote Sensing of Environment, 109 (2007), pp. 429-442

Mallinis, G.; I. Mitsopoulos, I. Chrysafi (2017). Evaluating and comparing Sentinel 2A and landsat-8 operational Land imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. GISci. Remote Sens., 55 , pp. 1-18

Miller J.D. and Thode, A.E. 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). Remote Sens. Environ., 109 (2007), pp. 66-80

Miller, J.D., Knapp, E.E., Key, C.H., Skinner, C.N., Isbell, C.J., Creasy, R.M., Sherlock, J.W. 2009. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. Remote Sensing, 113, 645-656. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.009

Parks, SA; Dillon, GK; Miller, C. 2014. A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio. Remote Sensing 6(3); 1827-1844.

Parks, SA; Holsinger, LM; Voss, MA; Loehman, RA; Robinson, NP. 2018. Mean composite fire severity metrics computed with Google Earth Engine offer improved accuracy and expanded mapping potential. Remote Sensing, 10(6), p.879.

Quintano, C. A. Fernández-Manso, O. Fernández-Manso. (2018) Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf, 64 , pp. 221-225

Silva-Cardoza A., Vega-Nieva, D.J., López Serrano, P.M., Dr. Corral Rivas J.J., Rodríguez-Trejo, D.A.; Jardel Peláez, E.; Balcázar O.; Alvarado, E. 2021a. Metodología para la evaluación de la severidad de incendios forestales en campo. Anexo 2.2.1 del informe de la segunda etapa del proyecto CONAFOR-CONACYT-2018-C02-B-S-131553 "Reforzamiento al sistema nacional de predicción de peligro de incendios forestales de México para el pronóstico de conglomerados y área quemada". 58 pg.

Silva-Cardoza, A. 2021. Evaluación y mapeo de la severidad en la sierra madre occidental de Durango. Tesis de Maestría. 55 pg. Maestría en Geomática Aplicada a Recursos Ambientales y Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango.

Silva-Cardoza A., Vega-Nieva, D.J., Briones-Herrera C.I., López-Serrano P.M., Corral-Rivas J.J., Briseño-Reyes J., Alvarado-Celestino E. 2021b. Evaluación de severidad de incendios forestales con imágenes Sentinel en el Estado de Durango. XV Congreso Mexicano de Recursos Forestales 2021. SOMEREFO. Guadalajara, Jalisco.