

CASO PRÁCTICO

Detección semiautomática de áreas quemadas en Chimborazo-Ecuador utilizando medias compuestas de dNBR con umbrales ajustados

César Cisneros-Vaca^{ORCID}*, Julia Calahorrano^{ORCID}, María Abarca^{ORCID}, Mery Manzano^{ORCID}

Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental, Riobamba, Ecuador.

Resumen: En este trabajo se implementó una metodología semiautomática para la delimitación de áreas quemadas en la provincia de Chimborazo en Ecuador, durante el periodo 2018-2021 utilizando la base de datos de incendios forestales suministrada por el Programa Amazonia sin fuego del Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (MAATE). Se utilizaron las colecciones de imágenes de Landsat 7 y Landsat 8 corregidas atmosféricamente y disponibles en la plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Para delimitar las áreas quemadas se calcularon medias compuestas de índices normalizados de áreas quemadas (NBR) en GEE y se evaluaron los umbrales de la diferencia de índices normalizados de quema (dNBR) más adecuados por encima de los cuales se delimita la quema para el herbazal de páramo. La investigación muestra: (a) el valor del umbral de dNBR, sobre imágenes de medias compuestas de Landsat 7 y Landsat 8 que mejor se ajusta para identificar áreas quemadas en la zona de estudio es de 0,15; (b) se encontraron nueve eventos con áreas iguales o mayores a 100 ha, pero sólo pudieron ser ubicados siete; (c) la mayoría de las áreas quemadas registradas en la base de datos del MAATE fueron sobrestimadas desde un 45% hasta un 91,5% en comparación con las áreas quemadas digitalizadas sobre las imágenes satelitales. Estos hallazgos proporcionan información que contribuye al fortalecimiento de estadísticas nacionales de incendios, útil para la construcción de políticas públicas de monitoreo y gestión de incendios forestales en el Ecuador.

Palabras clave: Landsat, incendios, páramo, umbral, dNBR.

Semiautomatic detection of burnt areas in Chimborazo-Ecuador using dNBR mean composites with adjusted thresholds

Abstract: A semi-automatic methodology was implemented for the delimitation of burning areas in the province of Chimborazo in Ecuador, during the period 2018-2021, by using the database of forest fires provided by the "Amazonia sin fuego" program of the "Ministerio de Ambiente Agua y Transición Ecológica" (MAATE). The collections of atmospherically corrected Landsat 7 and Landsat 8 images available on the Google Earth Engine (GEE) platform were used. To delimit the burning areas, mean composite images of normalized burning indices (NBR) were calculated in GEE and the most appropriate thresholds of the difference of normalized burning indices (dNBR) were evaluated above which the burning for paramo ecosystem is delimited. The results shows: (a) the dNBR threshold value, based on Landsat 7 and Landsat 8 composite mean images, that best fits to identify burning areas in the study area is 0.15; (b) nine events with areas equal to or greater than 100 ha were found, but only seven could be located; (c) most of the burned areas recorded in the MAATE database were overestimated from 45.0% to 91.5% compared to the burn areas digitized on satellite images. These findings provide information that contributes to the strengthening of national fire statistics, useful for the construction of public policies for monitoring and managing forest fires in Ecuador.

Key words: Landsat, fire, paramo, dNBR, threshold.

To cite this article: Cisneros-Vaca, C., Calahorrano, J., Abarca, Manzano, M. 2023. Semiautomatic detection of burnt areas in Chimborazo-Ecuador using dNBR mean composites with adjusted thresholds. *Revista de Teledetección*, 62, 89-99. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19428>

* Corresponding author: ramiro.cisneros@unach.edu.ec

1. Introducción

Los incendios forestales afectan alrededor de 400 millones de hectáreas anuales a nivel global (Zheng *et al.*, 2021). Se estima que para la región Iberoamericana son alrededor de 40 millones de hectáreas quemadas anualmente, lo que representa entre 7% y 14% del total mundial (Bilbao *et al.*, 2020). Están presentes en gran parte de los ecosistemas terrestres y sus impactos pueden ser positivos o negativos, dependiendo del tipo y régimen de incendios y del contexto en el que ocurren (Bilbao *et al.*, 2020).

En Ecuador los incendios forestales producen severos impactos. Desde la década anterior han ocurrido un número significativo de incendios que han ido aumentando con los años (MAATE, 2023). Chimborazo es una de las provincias más afectada del país con respecto a la ocurrencia de incendios forestales. En el año 2016 se identificaron 54 incendios en Chimborazo, ubicados en 8 cantones a excepción de Cumandá y Chambo. Un mayor número de incendios ocurrieron en los cantones: Colta con 14 eventos, Guamate con 11 y Riobamba con 10 (Espinoza *et al.*, 2017). La mayoría de los incendios forestales surgen como producto de las quemaduras que forman parte del ciclo de cultivo, muchas de esas quemaduras son pequeñas y controladas, pero también suelen salir de control (Galindo *et al.*, 2012).

La gestión de riesgos para la prevención o mitigación de incendios forestales requiere de herramientas de decisión que permitan realizar una planificación preventiva y una mejora en la respuesta de atención ante la presencia de este tipo de eventos. Entre los esfuerzos recientes para generar herramientas de decisión, el Ministerio de Agua Ambiente y Transición Ecológica del Ecuador (MAATE), el Programa Amazonía sin Fuego (“Programa Amazonía sin fuego- PASF”, s/f) y el Servicio Nacional de Gestión de Riesgo y Emergencias (SNGRE) generaron el documento: Estadísticas de Incendios Forestales del Ecuador (MAATE, 2023) que proviene de una base de datos de los incendios registrados por la SNGRE en el período 2011-2021. Sin embargo, uno de los aspectos que falta por completar en estas estadísticas es la delimitación precisa de las áreas quemadas de los eventos registrados.

En la actualidad, gracias a la libre disponibilidad de imágenes satelitales, una de las maneras más comunes de cartografiar áreas quemadas es utilizando el cálculo de índices espectrales (Chuvieco *et al.*, 2019) como el “*normalized burned ratio*” (*NBR*: Key y Benson, 2006), así como su versión multitemporal “*differenced normalized burned ratio*” (*dNBR*) cuya aplicación se enfoca principalmente en la estimación de severidad de incendios (Key y Benson, 2006; Eidenshink *et al.*, 2007).

El cálculo original de *dNBR* implica la búsqueda de imágenes disponibles pre-incendio y post incendio necesarias para realizar la diferencia multitemporal. Hoy en día las plataformas de almacenamiento y procesamiento de imágenes en la nube como *Google Earth Engine- GEE* (Gorelick *et al.*, 2017) facilitan y agilizan la búsqueda particularmente en lugares con alta presencia de cobertura de nubes como la cordillera de los Andes y sus estribaciones.

Una de las metodologías recientes para el cálculo de índices de quema de una manera semiautomática es la propuesta por Parks *et al.* (2018), quienes aplican la plataforma GEE para calcular métricas de severidad de incendios basadas en imágenes Landsat. Parks *et al.* (2018) optimizan el tiempo de búsqueda de imágenes pre y post incendio utilizando el enfoque de “medias compuestas” el cual consiste en seleccionar píxeles válidos (libres de nubosidad, nieve, agua) para un período de tiempo determinado (ej. época de incendios), calcular sobre estos píxeles el índice *NBR* y promediarlos. En función de estos promedios se puede calcular índices multitemporales como el *dNBR* considerando una época previa y una posterior a la fecha de un incendio determinado. Este enfoque ha sido validado y ha demostrado mayor eficiencia versus el cálculo original de *dNBR* (Parks *et al.*, 2018).

Una vez calculados los valores de *dNBR* el siguiente paso para delimitar un área quemada es definir un umbral que permita diferenciar entre la superficie afectada y no afectada. Los valores de umbrales comúnmente utilizados son los aplicados por Key y Benson (2006) en la escala de severidad. Esta escala tiene un rango de -0,5 a 1,3. Los valores entre -0,1 y 0,099 se consideran como áreas no quemadas, mientras que los valores entre 0,1 y 0,27 son considerados como áreas

quemadas de baja severidad y a partir de los cuales varios autores definen el umbral para obtener áreas quemadas (Carrión-Paladines *et al.*, 2022; Morante-Carballo *et al.*, 2022; Celi Díaz *et al.*, 2023). Estos umbrales necesitan ser ajustados y evaluados para diferentes tipos de cobertura del suelo para obtener mejores resultados (Eidenshink *et al.*, 2007; Delegido *et al.*, 2018; Sánchez *et al.*, 2023). En Ecuador hay pocos estudios que han calibrado valores de umbral *dNBR*. La mayoría han utilizado la escala de severidad de Key y Benson (2006) para otros objetivos específicos (Cabrera *et al.*, 2020; Carrión-Paladines *et al.*, 2022; Morante-Carballo *et al.*, 2022).

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar umbrales de *dNBR* sobre imágenes de medias compuestas de datos Landsat para delimitar grandes áreas quemadas en vegetación de páramo registrados en la Provincia de Chimborazo en el período 2018-2021. Se busca con esto contar con una potencial herramienta semiautomatizada que permita complementar las estadísticas nacionales de incendios con polígonos de quema para todo el territorio nacional y en diferentes períodos de tiempo.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Se toma como área de estudio la Provincia de Chimborazo, situada en la región central andina ecuatoriana entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental con una extensión de ~6500 km². Su territorio se divide en diez cantones: Alausí, Colta, Chunchi, Guamote, Guano, Penipe, Pallatanga, Chambo, Cumandá y Riobamba, la capital provincial (Figura 1).

En la provincia de Chimborazo la diversidad de alturas debido a la presencia de la Cordillera de los Andes origina una gran variedad de climas y cambios considerables a cortas distancias. La provincia presenta en el 59% de su superficie un clima Ecuatorial de Alta Montaña caracterizado por temperaturas bajas casi constantes durante todo el año, precipitación regular y superiores a 1500 o 2000 mm por año. El 24% de la provincia posee un clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo con precipitación anual entre 500 a 2000 mm y la temperatura media oscila entre 12 y 20°C. El 13% restante lo caracterizan climas de tipo: Ecuatorial

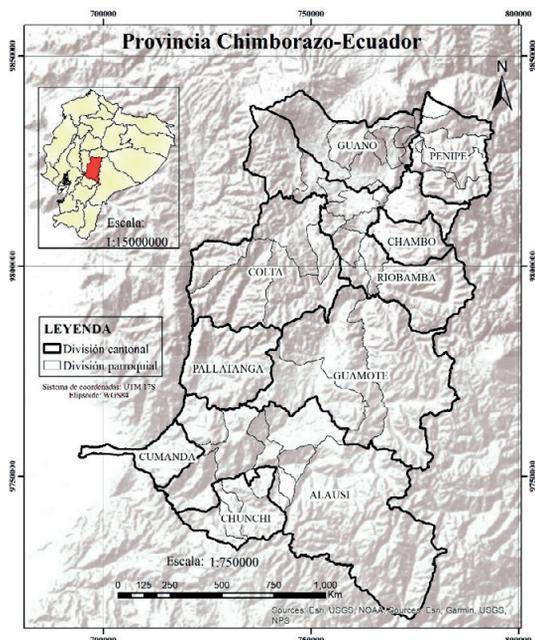


Figura 1. Mapa de ubicación de la provincia de Chimborazo-Ecuador.

Mesotérmico Seco y Tropical Mega térmico Húmedo (GADPCH, 2015).

La provincia tiene una topografía irregular que se encuentra en un rango altitudinal de 143 a 6263 m.s.n.m. Los suelos son principalmente andosoles (suelos negros de formaciones volcánicas). El 78% de la superficie de la provincia posee relieve de cordillera y cuenta con pendientes abrupto-montañas en 28% del territorio. En cuanto las principales clases de cobertura vegetal que ocupan la provincia tenemos: tierras agropecuarias (47%), seguido del ecosistema de páramo (34%) y bosque nativo (8%) (GADPCH, 2020).

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Datos de incendios forestales

La base de datos de incendios forestales (BD-MAATE-SNRGE) fue solicitada al Programa Amazonía sin Fuego del MAATE, información con la que se generó el documento: estadísticas de incendios forestales de Ecuador (MAATE, 2023). Esta información se basa principalmente en los reportes generados por el SNGRE, que recopila información por medio de las Unidades de monitoreo de efectos adversos (UMEVA) quienes,

según la evolución de los incendios forestales, emite las alertas y coordina la atención del evento junto a Cuerpo de Bomberos, Fuerzas Armadas, GAD Cantonales, MAATE.

La BD-MAATE-SNRGE de datos proporciona información a nivel nacional de los incendios forestales para el período 2011-2021. Para el presente estudio, se filtró los registros de eventos ocurridos en la provincia de Chimborazo en el período 2018-2021, en los meses de julio a noviembre considerada la época de incendios (Pazmiño, 2019) y aquellos de una extensión reportada igual o mayor a 100 ha, considerando que esta superficie puede ser claramente identificable en una imagen satelital Landsat 7 o Landsat 8 (30 m de resolución espacial).

La BD-MAATE-SNRGE no incluye límites de áreas quemadas y aunque reporta las coordenadas de ubicación para cada registro, estas no son precisas. Para superar este problema se utilizó datos de los campos PARROQUIA y COMUNIDAD/BARRIO/SECTOR para ubicar las coordenadas en la cartografía oficial del Ecuador 1:50000 del IGM (Instituto Geográfico Militar del Ecuador,

2013, 2023). Alrededor de las coordenadas de las ubicaciones se determinó un cuadro de análisis de 6 km×6 km.

En base a las fechas registradas de los eventos en la BD-MAATE-SNRGE se realizó una búsqueda, en la plataforma *Google Earth Engine* – GEE (Gorelick et al., 2017), de imágenes Landsat 7 y Landsat 8 con la menor presencia de nubosidad dentro de los cinco meses posteriores al evento. Se identificó y digitalizó manualmente las áreas quemadas utilizando la combinación de bandas infrarrojo de onda corta, infrarrojo cercano, azul (Landsat 7: B5/B4/B1; Landsat 8: B6/B5/B2) a una escala entre 1:25000 y 1:50000 (Eidenshink et al., 2007).

Dentro de la plataforma GEE los polígonos que corresponden a zonas quemadas fueron rasterizados (resolución 30 m) codificando con el valor de 1 a las áreas quemadas y generando un ráster con una extensión de 6 km×6 km alrededor del punto de ubicación. Estos ráster son utilizados para la validación de las áreas quemadas Figura 2.

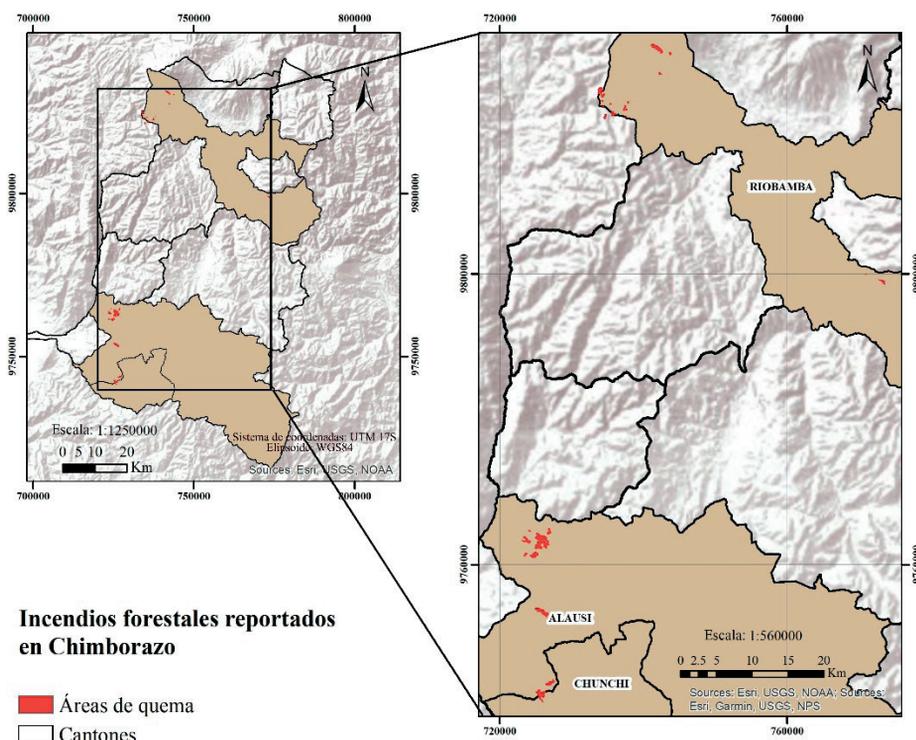


Figura 2. Polígonos de incendios forestales digitalizados.

2.2.2. Imágenes satelitales

Se utilizó las colecciones de imágenes disponibles en la plataforma GEE: Landsat 7, *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) de la Colección 01, nivel de procesamiento L1TP corregidas atmosféricamente con LEDAPS (Schmidt *et al.*, 2013); y Landsat 8, *Operational Land Imager* (OLI) de la Colección 01, nivel de procesamiento L1TP y corregidas atmosféricamente con el algoritmo LaSCR (Vermote *et al.*, 2016). Los píxeles con errores asociados al SLC-Off en las imágenes Landsat 7 han sido enmascarados y excluidos del análisis y no influyen en los cálculos de la metodología propuesta. Las imágenes que cubren la provincia de Chimborazo se ubican con los Path/Row: 10-61 y 10-62.

2.3. Métodos

2.3.1. Cálculo de dNBR en Google Earth Engine

Para delimitar las áreas quemadas se calcularon índices normalizados de quema (*NBR*) (Ecuación 1) empleando las bandas: infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). Se aplicó la diferencia de índices *dNBR*: pre-incendio (NBR_{pre}) y post incendio (NBR_{post}) (Ecuación 2) concepto propuesto por Key y Benson (2006).

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

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (2)$$

Uno de los inconvenientes para el procesamiento de *dNBR* es la selección adecuada de imágenes, pre y post incendio, que cubran el área de interés sin la presencia de nubes y evitando escenas que presenten cambios estacionales en la vegetación.

Para facilitar el procesamiento de *dNBR* se utilizó el enfoque de “medias compuestas” (Parks *et al.*, 2018). Este enfoque simplifica la necesidad de una selección de escenas a priori y permite automatizar la detección de áreas quemadas.

Para producir las medias compuestas *NBR* el código implementado por Parks *et al.* (2018) utiliza las máscaras de evaluación de calidad para excluir los píxeles con nubes, sombras, agua y nieve generadas con el algoritmo “CFMask” (Foga *et al.*, 2017).

Parks *et al.* (2018) utiliza GEE para calcular promedios de *NBR* pre y post incendios a lo largo de un rango de fechas. El rango de datos para aplicar las medias compuestas para el presente estudio fue de julio a diciembre (temporada de incendios) tanto para las composiciones pre incendio como post incendio.

En el código utilizado por Parks *et al.* (2018) se considera las medias compuestas de *NBR* pre incendio de un año previo y post incendio para el año posterior al evento. Considerando que la vegetación de páramo es de los tipos de cobertura más susceptibles a incendios forestales en Chimborazo, y que puede recuperarse en un tiempo relativamente rápido de ~2 años (Ramsay, 2001) se optó por seleccionar como período post incendio solo aquel año en el cual ha ocurrido el incendio y se modificó el código original.

2.3.2. Análisis de umbrales dNBR para delimitar áreas quemadas

Para definir las áreas quemadas en función del *dNBR* es necesario establecer los umbrales por encima de los cuales se considerará como tal. Estos están en función del tipo de cobertura vegetal (i.e Sánchez *et al.*, 2023). En los datos de la BD-MAATE-SNGRE, para Chimborazo en el período 2018-2021, todos los incendios mayores a 100 ha ocurren sobre áreas de pajonal de páramo, situación confirmada cuando se realizó la digitalización de áreas quemadas sobre las imágenes Landsat.

Se evaluaron valores de umbrales desde 0,5 a 4,0 en intervalos de 0,5 según lo que establece la literatura (Sánchez *et al.*, 2023). El umbral se aplicó para generar ráster binarios en donde el valor de 1 representa áreas quemadas y 0 para no quemadas. Se trabajó a la misma resolución espacial de las imágenes Landsat (30 m). Para minimizar el ruido generado en el ráster binario, se aplicó en GEE dos filtros, el primero de suavizado usando *focal_mode* de 2 píxeles de tamaño, y el segundo una operación de erosión y dilatación: *focal_max* de 1 píxel y *focal_min* de 2 píxeles. Finalmente, el resultado es redimensionado a la resolución de 30 m y recortado al área de interés de 6 km×6 km.

Para validar los resultados obtenidos con cada umbral se utilizó el coeficiente de similitud Sorensen-Dice (*SorDice*) (Dice, 1945; Sorensen,

1948). Una ventaja de este coeficiente es que permite evaluar de mejor manera los verdaderos positivos en una clasificación (Santana *et al.*, 2020). Este coeficiente se calculó multiplicando por dos el número de píxeles comunes entre el ráster con zonas quemadas digitalizado (Q_{dig}) y el ráster resultante de áreas quemadas (Q_{dNBR}). Este valor se divide para la suma total de píxeles identificados como quema en ambos ráster (Ecuación 3)

$$SorDice = \frac{2 \times |Q_{dig} \cap Q_{dNBR}|}{|Q_{dig}| + |Q_{dNBR}|} \quad (3)$$

El índice Sorensen-Dice da como resultado valores en el rango entre 0 y 1; 0 significa que no hay coincidencia entre los dos conjuntos de datos y 1 significa una coincidencia completa entre los dos conjuntos de datos; mientras el resultado sea más cercano a 1 significará una mejor aplicación de umbral de $dNBR$ para identificar áreas quemadas.

Este coeficiente se calculó independientemente para cada umbral e incendio identificado en la base de datos filtrada para Chimborazo y se escogió el mejor umbral en base al mejor promedio de *SorDice* identificado, considerando que el tipo de cobertura sobre el que han ocurrido los incendios es el mismo en todos los casos.

2.3.3. Implementación de código en GEE

El código proporcionado por Parks *et al.* (2018) fue modificado según lo descrito en la metodología y adaptado a los incendios identificados para Chimborazo. Se incorporó una rutina que permite ubicar la imagen Landsat más próxima a la fecha del evento, de manera que se pueda identificar los

incendios cercanos a las coordenadas de la comunidad donde ocurre el evento. De las diferentes opciones con que trabaja el código original, se escogió solo el índice $dNBR$ para este estudio, y se implementó los filtros de suavizado en los $dNBR$ resultantes. También, se incorporó el cálculo del coeficiente Sorensen-Dice y se adaptó la exportación de resultados para diferentes valores de umbrales escogidos.

3. Resultados

Se delimitaron áreas quemadas de la Provincia de Chimborazo en el período 2018-2021 utilizando registros administrativos de la BD-MAATE-SNGRE y aplicando medias compuestas de NBR de imágenes Landsat 7 y Landsat 8 con un código implementado en *Google Earth Engine*. Se encontró que el valor de umbral de $dNBR$ de 0,15 fue el que mejor se ajusta para identificar zonas quemadas en la vegetación de páramo.

De la BD-MAATE-SNGR para la provincia de Chimborazo, se encontraron nueve eventos catalogados con un área mayor o igual a 100 ha para el período 2018-2021 (Tabla 1). De los nueve eventos identificados, estos ocurrieron principalmente en tres cantones de la provincia: Alausí (2), Chunchi (1), Riobamba (6).

Dos eventos fueron descartados del análisis: el evento de Caserío Guanín (ID: 45342) no pudo ser ubicado en los datos de la cartografía oficial IGM y al presentar solo coordenadas del centroide de la parroquia no fue considerado para análisis; el evento de Caserío Chiquicas (ID: 45408), indicaba coordenadas distintas a las

Tabla 1. Incendios registrados para Chimborazo en BD-MAATE-SNGR, mayores a 100 ha, período 2018-2021 (julio-noviembre).

ID	Provincia	Canton	Parroquia	Comunidad/ Barrio/Sector	Lat.	Lon.	Fecha
31095	Chimborazo	Riobamba	San Juan	Ganquis Cuiquiloma	-1,567	* -78,830	* 24/8/2018
31146	Chimborazo	Chunchi	Llagos	Cerro Puñay	-2,365	* -78,970	* 27/8/2018
31161	Chimborazo	Riobamba	San Juan	La Chorrera	-1,567	* -78,830	* 2/9/2018
31431	Chimborazo	Alausí	Sibambe	Pagma	-2,192	* -78,914	* 23/9/2018
31668	Chimborazo	Alausí	Multitud	El Frondoso	-2,143	* -78,987	* 16/10/2018
45331	Chimborazo	Riobamba	Pungala	Daldal	-1,852	* -78,498	* 10/8/2020
45342	Chimborazo	Riobamba	Pungala	Caserío Guanín	-1,852	* -78,498	* 24/8/2020
45351	Chimborazo	Riobamba	San Juan	Gallo Rumi Caserío	-1,608	-78,882	26/9/2020
45408	Chimborazo	Riobamba	Calpi	Caserío Chiquicas	-1,651	-78,737	11/11/2020

*Coordenada perteneciente al centroide del límite de Parroquia.

Tabla 2. Eventos de incendios analizados en el estudio, registros originales de BD-MAATE-SNGR.

ID_Fire	Comunidad/ Barrio/ Sector	Coeficientes de similitud Sorensen-Dice								
		Umbral:	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
31095	Ganquis Cuiquiloma		0,205	0,467	0,614	0,647	0,561	0,457	0,362	0,298
31146	Cerro Puñay		0,196	0,599	0,802	0,765	0,579	0,198	0,025	0
31161	La Chorrera		0,212	0,518	0,697	0,708	0,653	0,54	0,467	0,405
31431	Pagma		0,144	0,432	0,710	0,020	0	0	0	0
31668	El Frondoso		0,292	0,198	0,075	0,046	0,021	0	0	0
45331	Daldal		0,121	0,323	0,451	0,403	0,081	0	0	0
45351	Gallo Rumi Caserío		0,133	0,178	0,131	0,111	0,076	0,051	0,016	0
		Media	0,186	0,388	0,497	0,386	0,282	0,178	0,124	0,100

del centroide de parroquia, pero dentro del área de análisis no se identificaron áreas quemadas para ser digitalizadas.

Una vez evaluados los diferentes valores de umbrales *dNBR* para cada evento, se encontró en base a la media de los siete valores de coeficientes de similitud, que el umbral de 0,15 ofrecía un mejor resultado de similitud entre las áreas quemadas digitalizadas y las encontradas por *dNBR* de medias compuestas de imágenes Landsat (Tabla 2).

De los valores de umbrales analizados se pudo observar que entre 0,1 y 0,2 se obtienen los mejores resultados de similitud, en los casos de Ganquis, Cerro Puñay, La Chorrera y Pagma el valor medio de coeficiente de similitud fue de 42,4%. Para los valores de umbral superiores a 0,2 se observa una notable disminución del valor de coeficiente de similitud calculado, llegando a ser cero a partir de 2,5 para Pagma, 3,0 para El Frondoso y Daldal, y 4,0 para Gallo Rumi y Cerro Puñay.

Los eventos de El Frondoso (ID: 31668) y Gallo Rumi (ID: 45351) presentan los valores más bajos de similitud utilizando el umbral de 0,15. En ambos casos se presenta una mejor similitud utilizando valores de umbral de 0,05 y de 0,1, respectivamente (Tabla 2). Estos casos pueden estar relacionados con la severidad de la quema, tal como se aprecia en la Figura 3, la cual parece ser más baja que en los otros casos identificados.

En la Figura 3 se puede apreciar los resultados de delimitación de áreas quemadas con el umbral de 0,15. Para la validación se digitalizaron todas las áreas quemadas que se observan dentro de la unidad de análisis, algunas de esas áreas no son continuas con los parches de mayor tamaño lo que

puede indicar que hacen referencia a otros eventos tal vez de menor extensión. En los resultados también aparecen pequeños parches de falsos positivos los cuales pueden deberse a la actividad agrícola de esas zonas.

Considerando las áreas de los polígonos continuos digitalizados dentro de la unidad de análisis (recuadro 6 km×6 km) versus los obtenidos con el umbral de 0,15 de *dNBR* se identificó que las superficies son similares ($\pm 9\%$) para los casos de: Ganquis Cuiquiloma, Cerro Puñay, La Chorrera y Pagma. Mientras que, para El Frondoso y Gallo Rumi el área obtenida con el *dNBR* es subestimada (-69,3% y -60,6% respectivamente). En el caso del Daldal la superficie delimitada con *dNBR* se sobreestima con 73,7% (Tabla 3).

Al comparar las superficies de los polígonos digitalizados con los datos reportados en la BD-MAATE-SNGR, en cuatro casos (Ganquis Cuiquiloma, La Chorrera, Daldal, y Gallo Rumi Caserío) se identifica que los registros de la base de datos sobreestiman por encima del 45% el área quemada. En los casos de Pagma, Cerro Puñay y El Frondoso los valores de superficie son similares. Algo similar ocurre al comparar las superficies de la BD-MAATE-SNGR con los polígonos obtenidos con el umbral de 0,15 de *dNBR*, en donde además la superficie quemada de El Frondoso es subestimada 66% en el polígono delimitado con *dNBR* (Tabla 3).

4. Discusión

Trabajos anteriores han demostrado la utilidad del *dNBR* no solo para medir la severidad de zonas forestales afectadas por un incendio sino también

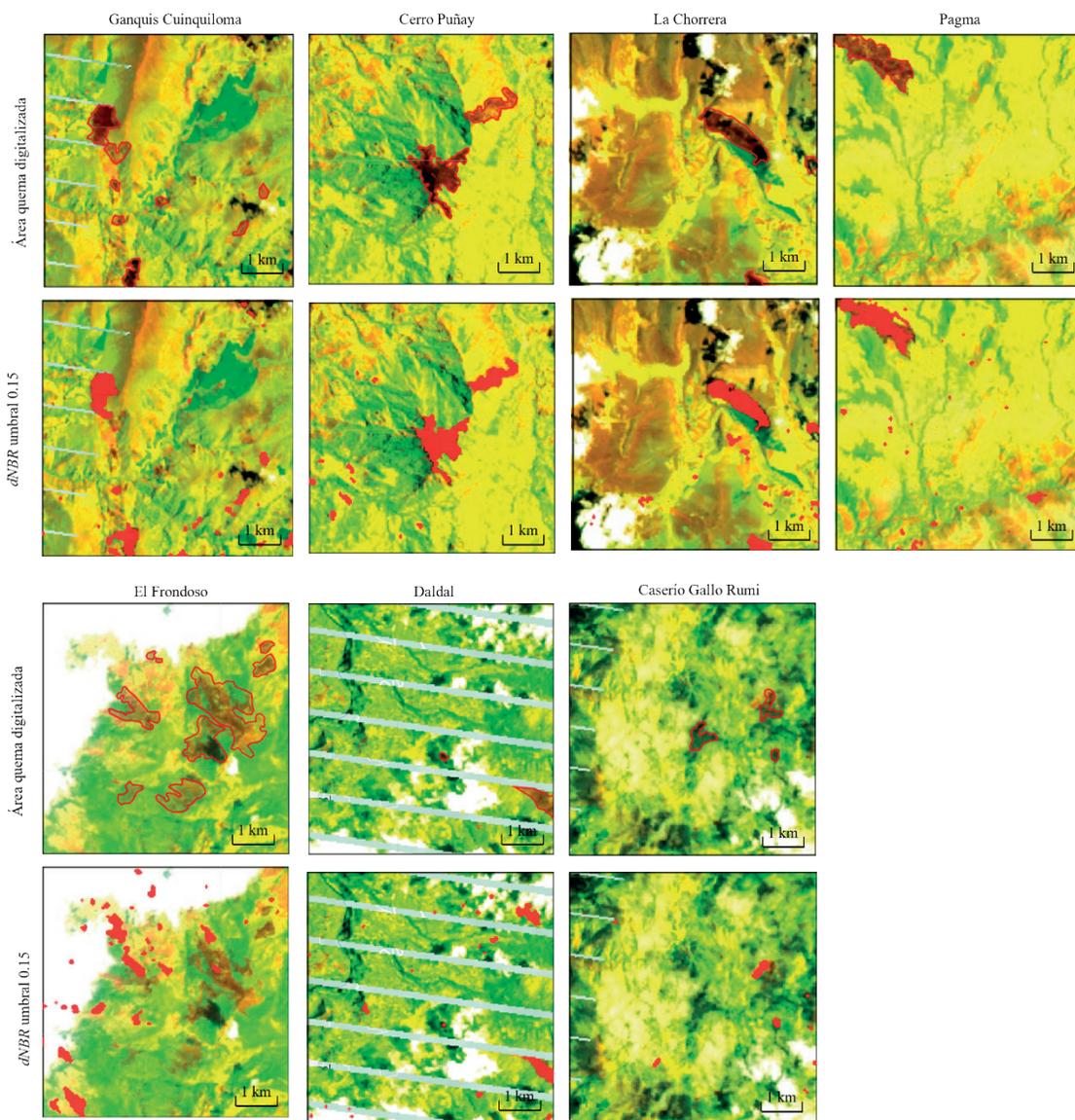


Figura 3. Polígonos de incendios forestales digitalizados versus delimitados con dNBR 0,15. El recuadro corresponde a las áreas estudiadas de 6 km por 6 km alrededor de cada ubicación del evento.

para delimitar su área. Uno de los proyectos pioneros en este campo fue el “*Monitoring Trends in Burn Severity*” (MTBS) implementado por el servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Eidenshink *et al.*, 2007). El MTBS aportó mapas y datos referentes a la severidad de incendios que ayudaron a evaluar las tendencias y desarrollar planes de manejo de uso del suelo. El MTBS utilizó el concepto de *dNBR* implementado por Key y Benson (2006) el cual se extendió a nivel global con una gran cantidad

de aplicaciones (Veraverbeke *et al.*, 2010; Soverel *et al.*, 2011; Randerson *et al.*, 2012).

En el estudio de Sánchez *et al.* (2023) se calibraron valores de *dNBR* por regiones administrativas y diferentes usos del suelo en la macrozona centro-sur de Chile, concluyendo que la precisión en la delimitación de áreas quemadas mejora significativamente; sin embargo, estos resultados son independientes para cada tipo de ecosistema analizado.

Tabla 3. Comparación de la superficie de quema registrada en la BD-MAATE-SNGR y la digitalizada en el presente estudio.

ID_Fire	Comunidad	A. Superficie digitalizada (ha)	B. Superficie dNBR-0.15 (ha)	C. Superficie reportada BD-MAATE-SNGR (ha)	Diferencia B-A (%)	Diferencia C-A (%)	Diferencia C-B (%)
31095	Ganquis Cuiqui-loma	129,7	122,0	300,0	-6,0	-56,8	-59,4
31146	Cerro Puñay	157,95	144,2	120,0	-8,7	31,6	20,2
31161	La Chorrera	109,98	114,6	200,0	4,2	-45,0	-42,7
31431	Pagma	104,76	114,1	100,0	8,9	4,8	14,1
31668	El Frondoso	441,09	135,5	400,0	-69,3	10,3	-66,1
45331	Daldal	32,49	56,4	380,0	73,7	-91,5	-85,2
45351	Gallo Rumi Caserío	55,08	21,7	130,0	-60,6	-57,6	-83,3

En Ecuador son pocos los estudios de incendios forestales que han evaluado los umbrales de *dNBR* para delimitación de áreas quemadas. Los estudios existentes lo aplican en combinación con otros enfoques. Por ejemplo, Carrión-Paladines *et al.* (2022) utiliza los valores de la escala de severidad (Key y Benson, 2006) para estudiar los efectos en algunas propiedades físicas y químicas de los suelos en el Ecosistema de Matorral Húmedo Montano en el Sur de Ecuador. El estudio de Cabrera *et al.* (2020) en cambio evalúa el *NBR*, entre otros índices, como el que permite evaluar con mayor precisión la severidad de un incendio forestal. Otro estudio realizado en Ecuador es el de Morante-Carballo *et al.* (2022) quienes también utilizaron la escala de Key y Benson (2006) para evaluar la severidad de los incendios y la recuperación de la vegetación en una comunidad de Ibarra al Norte de Ecuador.

En el presente estudio se han evaluado diferentes valores de umbral de *dNBR*, sobre imágenes de medias compuestas de Landsat 7 y Landsat 8, y se ha encontrado que el valor de umbral de 0,15 es el que produce mejores resultados en la delimitación de áreas quemadas sobre vegetación herbácea de páramo. Otros autores han observado que los valores de umbral para detectar quemas podrían variar entre 0 y 0,37 (Sánchez *et al.*, 2023), y en algunos casos se ha demostrado que pueden ser superiores (Delegido *et al.*, 2018; Sánchez *et al.*, 2023) ratificando la necesidad de la calibración de umbrales de *dNBR* para delimitación de áreas quemadas.

La calibración de umbrales de *dNBR* para el ecosistema de páramo constituye un aporte para mejorar la precisión en la cuantificación de superficie quemada en los registros históricos llevados a cabo por las autoridades competentes. También puede contribuir para estudios que se enfoquen en el análisis de la severidad de incendios dentro del área quemada.

Este es uno de los primeros trabajos en el Ecuador en evaluar una metodología semiautomática de delimitación de áreas quemadas a través de la calibración de umbrales *dNBR*. Si bien un limitante es el número de incendios evaluados (siete eventos), el código para obtener zonas quemadas de manera semiautomática puede ser ajustado para calibrar valores de *dNBR* en otros tipos de ecosistemas. Entre otras ventajas podemos decir que la metodología de medias compuesta con *Google Earth Engine* reduce el tiempo de búsqueda de imágenes pre y post incendio, y a partir de registros históricos de la BD-MAATE-SNGRE se ha podido ubicar geográficamente las áreas quemadas. Además, se ha podido precisar la superficie de área quemada de los registros analizados resultando que en muchos de los casos está sobreestimada (Tabla 3).

Entre las limitaciones encontradas se puede mencionar que algunas coordenadas e información de ubicación de la base de datos no han sido suficientes para ubicar el evento de quema reportado. También que este estudio se ha concentrado en la vegetación herbácea de páramo en Chimborazo, y si bien son de las provincias y tipo de ecosistemas

con mayor amenaza de incendios en el Ecuador (MAATE, 2023), es necesario validar la metodología para otros tipos de ecosistemas de otras provincias.

Para los andes ecuatorianos, una zona propensa a la presencia de nubes, el uso de medias compuestas de *NBR* derivadas de imágenes Landsat 7 y Landsat 8 facilita la delimitación de áreas quemadas, y sería interesante ampliar esta metodología para combinar con el uso de otras imágenes disponibles como Sentinel-2.

5. Conclusiones

Los resultados del presente estudio demuestran que ha sido posible delimitar áreas quemadas de una manera semiautomática utilizando medias compuestas de *dNBR* en la provincia de Chimborazo-Ecuador. Se ha estimado que el umbral de *dNBR* que más se adapta con el propósito de definir zonas quemadas en las áreas de vegetación herbácea de páramo es igual a 0,15. Se ha observado también que las áreas quemadas cartografiadas varían respecto a las áreas indicadas en la base de datos BD-MAATE-SNGR.

La metodología semiautomática utilizada en esta investigación abre una oportunidad para fortalecer la información incluida en las bases de datos de los eventos de incendio históricos registrados en Ecuador en la última década con registros referenciados más precisos de las áreas quemadas.

Acceso al código: El código utilizado es una variante del código compartido por Parks *et al.* (2018). La adaptación realizada para el presente manuscrito se la puede utilizar aquí: <https://code.earthengine.google.com/c5c0b215906b7cf6f93ee4d923aad871>

Referencias

- Bilbao, B., Steil, L., Urbietta, I., Anderson, L., Pinto, C., González, M., ... Moreno, J. 2020. Incendios forestales. En *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos* (McGraw-Hill, pp. 459–524). Madrid.
- Cabrera, J. Z., Guerrero, J. Q., Belén, M., Salto, L. y Mora Encalada, C. 2020. Algoritmo Semiautomático para Mapear Incendios Forestales y Estimar la Recuperación Vegetal Mediante Imágenes Landsat-8. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 32(2), 35–42. <https://doi.org/10.37815/rte.v32n2.757>
- Carrión-Paladines, V., Belén Hinojosa, M., Jiménez Álvarez, L., Reyes-Bueno, F., Correa Quezada, L. y García-Ruiz, R. 2022. Effects of the severity of wildfires on some physical-chemical soil properties in a humid montane scrublands ecosystem in Southern Ecuador. *Fire*, 5(3), 66. <https://doi.org/10.3390/fire5030066>
- Celi Díaz, S., Correa Quezada, L., Jiménez Álvarez, L., Loján-Córdova, J. y Carrión-Paladines, V. 2023. Indigenous use of fire in the paramo ecosystem of southern Ecuador: a case study using remote sensing methods and ancestral knowledge of the Kichwa Saraguro people. *Fire Ecology*, 19(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00164-1>
- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanasse, M., Koutsias, N., ... Giglio, L. 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225, 45–64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
- Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P., Jiménez, J. C., ... Moreno, J. 2018. Fire severity estimation in southern of the Buenos Aires province, Argentina, using Sentinel-2 and its comparison with Landsat-8. *Revista de Teledetección*, (51), 47–60. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8934>
- Dice, L. R. 1945. Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species. *Ecology*, 26(3), 297–302. <https://doi.org/10.2307/1932409>
- Eidenshink, J., Schwind, B., Brewer, K., Zhu, Z.-L., Quayle, B. y Howard, S. 2007. A Project for Monitoring Trends in Burn Severity. *Fire Ecology* 2007 3:1, 3(1), 3–21. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0301003>
- Espinoza, V. M., Quinchuela, M. F., Lara Vasconez, N. y Espinoza, A. 2017. Propuesta de un modelo de gestión para la prevención de incendios forestales en pinus radiata en la comunidad Ganquis provincia de Chimborazo. *European Scientific Journal, ESJ*, 13(23), 222–222. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n23p222>
- Foga, S., Scaramuzza, P. L., Guo, S., Zhu, Z., Dilley, R. D., Beckmann, T., ... Laue, B. 2017. Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. *Remote Sensing of Environment*, 194, 379–390. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>
- GADPCH. 2015. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia de Chimborazo*. Riobamba. Recuperado a partir de <https://drive.google.com/file/d/1EzRt-q-q7RN6Cg-t6tjG8Hj4jraXU5qn/view>

- GADPCH. 2020. *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Chimborazo*. Riobamba, GADPCH. Recuperado a partir de <http://chimborazo.gob.ec/principal/wp-content/uploads/2022/06/PDOT.pdf>
- Galindo, G., Sarango, J. y Villarroel, V. 2012. *Los incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito. Evaluación 2012*. Quito-Ecuador.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Instituto Geográfico Militar del Ecuador. 2013. Capas de información geográfica básica del IGM de libre acceso. Recuperado el 9 de enero de 2023, de <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
- Instituto Geográfico Militar del Ecuador. 2023. Visor de datos geográficos oficiales. Recuperado el 9 de enero de 2023, de <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/visualizador/>
- Key, C. y Benson, N. 2006. *Landscape Assessment (LA). FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Dep. of Agriculture, Forest Service. p LA-1-55*. Fort Collins, CO.
- MAATE. 2023. *Estadísticas de Incendios Forestales, Ecuador*. Quito.
- Morante-Carballo, F., Bravo-Montero, Lady, Carrión-Mero, P., Velastegui-Montoya, A. y Berrezueta, E. 2022. Forest Fire Assessment Using Remote Sensing to Support the Development of an Action Plan Proposal in Ecuador. *Remote Sensing*, 14(8), 1783. <https://doi.org/10.3390/rs14081783>
- Parks, S. A., Holsinger, L. M., Voss, M. A., Loehman, R. A. y Robinson, N. P. 2018. Mean Composite Fire Severity Metrics Computed with Google Earth Engine Offer Improved Accuracy and Expanded Mapping Potential. *Remote Sensing*, 10(6), 879. <https://doi.org/10.3390/rs10060879>
- Pazmiño, D. 2019. Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), 10–18. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1800>
- Programa Amazonía sin fuego- PASF. (s/f). Recuperado el 10 de enero de 2023, de <https://pasf.fias.org.ec/contexto/>
- Ramsay, P. M. 2001. *Páramo vegetation recovery in the first two years after a fire on Volcán Chiles, Ecuador. The Ecology of Volcán Chiles: high-altitude ecosystems on the Ecuador-Colombia border*. Plymouth: Pebble & Shell Plymouth.
- Randerson, J. T., Chen, Y., van der Werf, G. R., Rogers, B. M. y Morton, D. C. 2012. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 117. <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>
- Sánchez, R., Briones, M. J., Gamboa, A., Monsalve, R., Berroeta, D. y Valenzuela, L. 2023. Delimitation of burned areas in Chile based on dNBR thresholds adjusted according to region and land cover. *Revista de Teledetección*, 2023(61), 43–58. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.18155>
- Santana, O. J., Hernández-Sosa, D., Martz, J. y Smith, R. N. 2020. Neural Network Training for the Detection and Classification of Oceanic Mesoscale Eddies. *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 2625, 12(16)*, 2625. <https://doi.org/10.3390/rs12162625>
- Schmidt, G. L., Jenkerson, C., Masek, J. G., Vermote, E. y Gao, F. 2013. *Landsat ecosystem disturbance adaptive processing system (LEDAPS) algorithm description*. US Department of the Interior, US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20131057>
- Sorensen, T. A. 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *Biol. Skar.*, 5, 1–34.
- Soverel, N. O., Coops, N. C., Perrakis, D. D. B., Daniels, L. D. y Gergel, S. E. 2011. The transferability of a dNBR-derived model to predict burn severity across 10 wildland fires in western Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 20(4), 518–531. <https://doi.org/10.1071/WF10081>
- Veraverbeke, S., Lhermitte, S., Verstraeten, W. W. y Goossens, R. 2010. The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: The case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2548–2563. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.029>
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M. y Franch, B. 2016. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>
- Zheng, B., Ciais, P., Chevallier, F., Chuvieco, E., Chen, Y. y Yang, H. 2021. Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area. *Science Advances*, 7(39). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abh2646>