

# Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el índice *Normalized Burn Ratio* (NBR)

Burned areas and changes in land uses in southwest Chihuahua, México, during 2013-2017: Identification with the normalized burn ratio index (NBR)

K. M. Valdez-Zavala<sup>1\*</sup>, L. C. Bravo-Peña<sup>2</sup>, L. L. Manzo-Delgado<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Licenciatura en Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, División Multidisciplinaria en Cuauhtémoc, Km. 3.5 Carretera Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México. \*Correo Electrónico: al158008@alumnos.uacj.com.mx

<sup>2</sup>Licenciatura en Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

<sup>3</sup>Instituto de Geografía, Laboratorio de Análisis Geoespacial. Universidad Nacional Autónoma de México.

## Resumen

Los incendios forestales constituyen un problema en los ecosistemas, afectando la diversidad natural. Actualmente, se han implementado diversos índices espectrales para la identificación de áreas quemadas. En este estudio se identificaron y cuantificaron áreas quemadas y transiciones de uso de suelo en el suroeste de Chihuahua, México. Esto se realizó mediante el índice *normalized burn ratio* (NBR) en 28 imágenes satelitales correspondientes al periodo 2013-2017. El NBR identificó 1260.73 ha de áreas quemadas, de las cuales 1030.12 ha presentaron cambio de cobertura y uso del suelo; la superficie restante permaneció sin cambio. En los polígonos con cambio se observó una transición de cobertura forestal a vegetación secundaria, mientras que en los polígonos sin cambio mantuvieron su cobertura agrícola original. El método utilizado facilita el monitoreo y manejo ambiental de zonas afectadas por fuego en Chihuahua y puede replicarse en regiones con condiciones similares.

**Palabras clave:** Incendio; teledetección; Chihuahua; NBR; Landsat 8.

## Abstract

Fires are a problem on forest ecosystems, affecting the natural diversity. Currently, several spectral indices have been implemented for the identification of burned areas. In this study, burned areas and transitions of land use were identified and quantified in the southwest of Chihuahua, Mexico, by the normalized burn ratio index (NBR) obtained from 28 satellite images. The NBR identified 1260.73 ha of burned areas; 1030.12 ha showed change in vegetation coverage and land use, while the remaining area keep unchanged. In polygons with change, a transition from forest cover to secondary vegetation was observed, while the polygons without change maintained their original agricultural coverage. The method used facilitates the monitoring and environmental management of affected areas by fire in Chihuahua, and it can be replicated in regions with similar conditions.

**Keywords:** Fires; remote sensing; Chihuahua; NBR; Landsat 8.

Recibido: 24 de octubre de 2018

Aceptado: 15 de agosto de 2019

Publicado: 30 de octubre de 2019

**Como citar:** Valdez-Zavala, K. M., Bravo-Peña, L. C., & Manzo-Delgado, L. L. (2019). Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el índice *Normalized Burn Ratio* (NBR). *Acta Universitaria* 29, e2418. doi. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2418>

## Introducción

Las zonas forestales son indispensables para la vida en el planeta, apoyan fundamentalmente los ciclos de producción y distribución de materia prima en diversas actividades humanas, mantienen un equilibrio ecológico y determinan una regulación de temperatura y humedad (Fernández, 1997). Estos procesos vitales se ven afectados por actividades ajenas como: degradación de suelos, deforestación, tala inmoderada y fuego, que presentan una influencia negativa a estos recursos (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2010). El fuego puede tener una influencia positiva en la naturaleza, pero cuando este se utiliza de manera irresponsable o por condiciones poco favorables, puede convertirse en un incendio forestal. Este ocurre cuando el fuego se extiende de manera descontrolada y afecta bosques, selvas u otros ecosistemas, dañando el medio ambiente, la diversidad natural e incluso la seguridad humana y económica de la región afectada (Plana Bach, Font Bernet & Serra Davos, 2016).

En términos generales, los incendios logran alterar las cubiertas vegetales y, por ende, reducen significativamente la clorofila y el contenido de humedad presente en las hojas, dando paso a un cambio en los patrones de reflectividad, siendo estos últimos detectados mediante imágenes de satélite (Chuvieco, 2009). Los datos que proporcionan estos sensores de observación terrestre y su tratamiento previo favorecen en gran medida la detección de incendios forestales donde el acceso a la verificación de campo es difícil, dando lugar a buena exactitud en la cuantificación espacial y temporal de dicho fenómeno (Bella *et al.*, 2008). Es por ello que la teledetección de incendios se ha considerado una alternativa viable y apta para tener resultados continuos, precisos y consistentes de la identificación de estas áreas (Cure, 2017).

Actualmente, se han utilizado una gran variedad de técnicas e índices para la detección y discriminación de áreas quemadas mediante imágenes de satélite, desde las más simples como el análisis visual, hasta las más complejas como el análisis de mezclas espectrales (Oliva & Verdú, 2008). Varios estudios han confirmado la aplicabilidad de diversos índices espectrales (Blas, González & Gurría, 2003), siendo los índices de vegetación (NDVI) los primeros en utilizarse en el seguimiento de las condiciones vegetales, aunque pueden presentar una confusión importante en otras cubiertas, como agua, zonas con variedad de sombra y, en algunos casos, coníferas (Bastarrika & Chuvieco, 2006). Por otro lado, al desarrollar e innovar con nuevos sensores y nuevos análisis, se incluyeron otro tipo de índices espectrales, siendo el índice *normalized burn ratio* (NBR), aplicado en trabajos anteriores con imágenes Landsat-TM por López & Caselles (1991), un índice útil para este propósito.

El NBR es uno de los índices más utilizados, tanto para cartografiar las áreas quemadas como para determinar los distintos niveles de severidad de incendio que ha sufrido la vegetación, basándose en las bandas del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) e infrarrojo medio (SWIR, por sus siglas en inglés), donde el contenido de agua en las plantas, representado por la banda del SWIR, se confirma como un parámetro clave a la hora del seguimiento de variaciones en el estado de la vegetación, a través de las imágenes de satélite (Rodríguez & Ríos, 2017). La ecuación del NBR se expresa:

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

NIR = Infrarrojo cercano (Banda 5 del sensor Landsat 8)

SWIR = Infrarrojo medio (Banda 7 del sensor Landsat 8)

El índice permite evaluar la afectación por medio de un análisis multitemporal de imágenes previas y posteriores al incendio, al comparar el cambio de cobertura presente en cada imagen. Esto facilita el análisis al distinguir tres ámbitos de gran importancia: el momento previo del fuego, el momento del incendio y el momento posterior a este. Lo anterior da como resultado la detección de focos de fuego activo, así como la evaluación de las consecuencias ocasionadas por estos (Pérez & De la Riva, 2017). Índices como el NBR permiten el monitoreo de los daños generados por incendios y facilitan la elaboración de cartografía de áreas quemadas y la toma de decisiones posteriores en la gestión ambiental de estas zonas (De Santis & Vaughan, 2009).

La severidad de los incendios se estima a partir de la diferencia del coeficiente normalizado de quemas o dNBR, el cual considera el NBR pre incendio menos el NBR post incendio. Los valores resultantes tienen un rango de -2 a +2 (Key & Benson, 2006). La clasificación de los valores del dNBR se relaciona con los niveles de severidad, los valores negativos están asociados a la repoblación de la vegetación después del incendio, los pixeles que no están quemados presentan valores cercanos a cero (-0.1 y 0.1), los valores positivos máximos (> 0.66) están relacionados con una mayor severidad. El dNBR discrimina áreas quemadas recientemente en bosques, arbustos y algunas comunidades herbáceas (Key & Benson, 2006). Con base en estos principios, se han desarrollado otros índices como el RdNBR (Miller, Skinner, Safford, Knapp & Ramírez, 2012) y RBR Relativized Burn Ratio, (Parks, Dillon & Miller, 2014). Aunado a esto, el uso de dicho índice tiene una repercusión importante en la determinación de cambios de uso de suelo y vegetación. Eva & Lambin (2000) han monitoreado incendios y cambio de uso de suelo con imágenes de satélite en regiones tropicales, obteniendo resultados satisfactorios.

En los últimos años, dentro del estado de Chihuahua, se han producido una gran cantidad de incendios forestales ubicados especialmente en regiones cercanas a la Sierra Tarahumara. En el año 2015, se presentaron condiciones totalmente atípicas, presentando 252 incendios, afectando a su paso miles de hectáreas de bosque de pino y encino, así como una gran extensión de pastizales (Conafor, 2018). Esto ha provocado un cambio importante en la cobertura original de dicha zona. Destaca el caso de los municipios de Bocoyna, Carichí, Guachochi, Guerrero, Maguarichi, Ocampo y Urique, ubicados en el suroeste de la entidad, donde se ha presentado un aumento importante de incendios forestales. Por las razones anteriores, los objetivos principales de este trabajo fueron: 1) Cuantificar las áreas quemadas durante el periodo 2013–2017 en los municipios de Bocoyna, Carichí, Guachochi, Guerrero, Maguarichi, Ocampo y Urique en el estado de Chihuahua, mediante el índice NBR en imágenes de satélite correspondientes a este periodo y 2) Identificar las transiciones de uso del suelo en las áreas quemadas.

## **Materiales y Métodos**

### **Área de estudio**

El área de estudio comprende la región suroeste del estado de Chihuahua, específicamente a los municipios de Bocoyna, Carichí, Guachochi, Guerrero, Maguarichi, Ocampo y Urique, localizados en su mayoría en la zona más alta de la Sierra Madre Occidental. En conjunto suman una superficie de 23 969 Km<sup>2</sup> aproximadamente (figura 1).

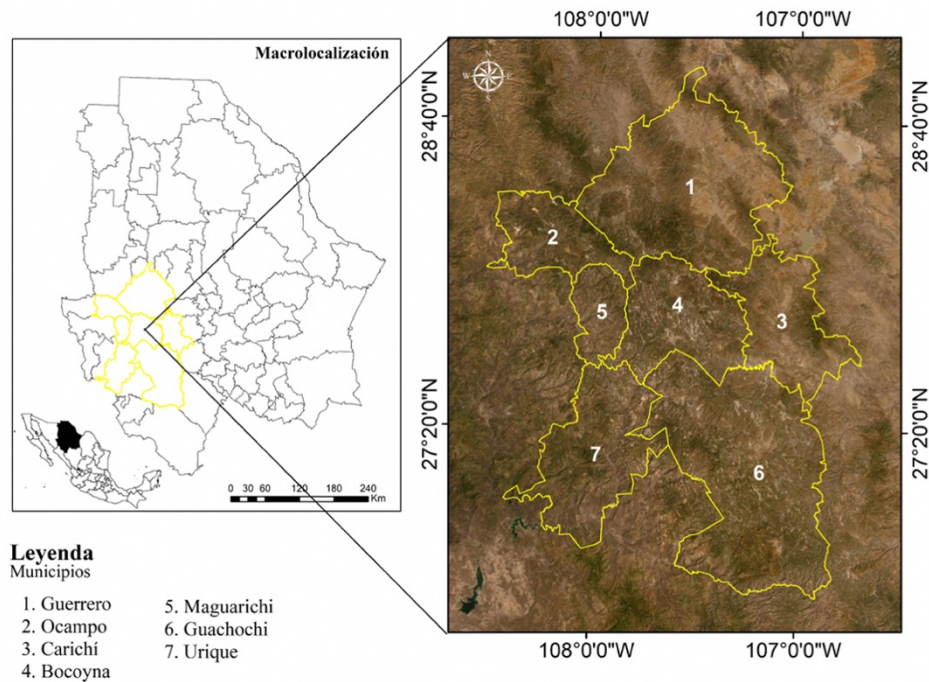


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

Esta zona, por su ubicación geográfica, topográfica y tipo de cobertura vegetal, presenta una alta vulnerabilidad a la presencia de incendios forestales, provocados en su mayoría por el ser humano con finalidades diversas, siendo los bosques de pino-encino los más afectados por prácticas agropecuarias que involucran el uso del fuego. No se han hecho evaluaciones previas en estos municipios, pero, para ilustrar la gravedad del problema, puede señalarse que tan solo en el año 2018 se registraron en la región suroeste de Chihuahua 596 incendios, con una superficie de afectación de 14 750.41 ha (Conafor, 2018). Es importante indicar que en años previos también se registró una gran cantidad de incendios, pero la cuantificación de la superficie afectada es imprecisa debido a la ausencia de esfuerzos sistemáticos -en particular sustentados en insumos satelitales- para su medición y monitoreo. Esa ausencia otorga relevancia al trabajo que aquí se presenta.

Según el inventario de uso de suelo y vegetación serie V del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el área de estudio destaca por la presencia de bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de encino, pastizal natural, pastizal inducido, agricultura de temporal y riego anual, selva baja caducifolia y vegetación secundaria arbustiva (figura 2). Esto obedece a la gran diversidad fisiográfica, altitudinal y climática generada por las elevaciones y cañadas de la Sierra Madre Occidental, que abarca la totalidad del área de estudio.

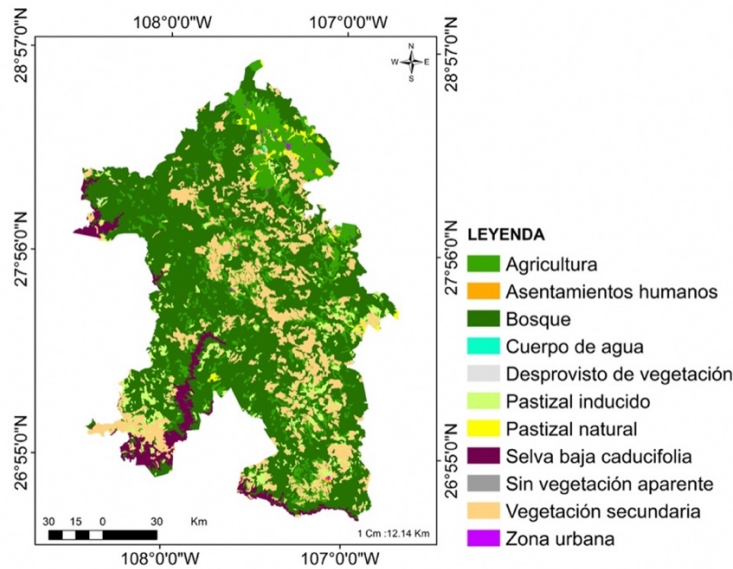


Figura 2. Cobertura y uso de suelo, área de estudio. Reclasificación del mapa de uso de suelo y vegetación serie V de INEGI.  
Fuente: Elaboración propia.

El trabajo involucró las siguientes fases: selección de las imágenes satelitales; corrección atmosférica de las imágenes; detección de las áreas quemadas; detección y cuantificación de los cambios de cobertura y uso de suelo; y cartografía de áreas quemadas para el periodo 2013-2017 (figura 3).

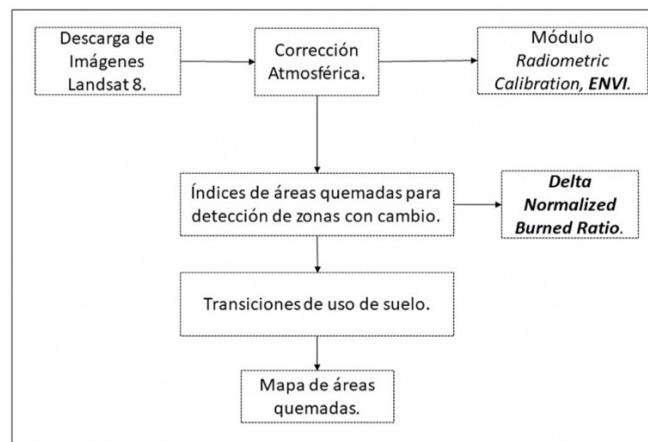


Figura 3. Esquema metodológico para el análisis espacial y multitemporal de las áreas incendiadas.  
Fuente: Elaboración propia.

### Selección de las imágenes satelitales

En este caso se seleccionaron 28 imágenes Landsat correspondientes al periodo comprendido entre el 18 de marzo del 2013 y el 24 de noviembre de 2017. Las imágenes provienen del satélite Landsat-8, siendo en términos generales adecuadas para la cartografía temática y el análisis multitemporal. Las imágenes Landsat proporcionan dos sensores: sensor operacional de imágenes de tierra (OLI), formado por nueve bandas espectrales, destacando una banda de aerosol costero (1), tres visibles (2 a 4), una en el infrarrojo cercano (5), dos en el infrarrojo medio (6 y 7), banda pancromática y cirrus (8 y 9), cuya resolución espacial oscila entre los 15 m y 30 m; y un sensor de infrarrojo térmico (TIRS), conformado por dos bandas espectrales (10 y 11), las cuales detectan infrarrojos térmicos, ayudando en la medición de temperatura de

la superficie terrestre (*United States Geological Survey* [USGS], 2018). Las características espectrales para las bandas del sensor Landsat utilizadas en estudio se presentan en color gris en la tabla 1.

**Tabla 1.** Características espectrales del sensor Landsat 8. Se indican en gris las bandas utilizadas en este trabajo.

| Banda    | Longitud de onda (m) |
|----------|----------------------|
| Banda 1  | 0.43-0.45            |
| Banda 2  | 0.45-0.51            |
| Banda 3  | 0.53-0.59            |
| Banda 4  | 0.63-0.67            |
| Banda 5  | 0.85-0.87            |
| Banda 6  | 1.56-1.65            |
| Banda 7  | 2.10-2.29            |
| Banda 8  | 0.50-0.67            |
| Banda 9  | 1.36-1.38            |
| Banda 10 | 10.60-11.19          |
| Banda 11 | 11.50-12.51          |

Fuente: Elaboración propia a partir de (USGS, 2018).

Además de las imágenes anteriores, se utilizaron tres imágenes de alta resolución del tipo *Geoeye* y *Quick Bird* para realizar la validación de las áreas incendiadas mediante fotointerpretación. Estas imágenes, con fechas 23 de octubre de 2015, 24 de diciembre de 2016 y 9 de abril de 2017, se visualizaron en la plataforma digital de *Google Earth*.

## Corrección atmosférica de las imágenes satélites utilizadas en la generación del NBR

Las imágenes de satélite presentan distorsiones que influyen en los valores de la imagen, estas pueden ser generadas por la interferencia atmosférica o por los procesos incluidos en la teledetección para la captura de estas imágenes. Por lo tanto, para realizar un análisis más preciso, se recurrió al uso de la herramienta *Radiometric Calibration* para la corrección atmosférica mediante el software *ENVI 5.0*, en el cual es indispensable ajustar los valores de reflectancia y brillo de la imagen, utilizando en su proceso los valores de radiancia, distancia del sol a la Tierra, irradiancia solar y elevación del sol contenidos en los metadatos de las bandas utilizadas (Brizuela, Aguirre & Velasco, 2007).

## Detección de las áreas quemadas

Para la detección de las áreas quemadas se utilizó el índice NBR (Ecuación 2).

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (2)$$

NIR = Infrarrojo cercano (Banda 5 del sensor Landsat 8)

SWIR = Infrarrojo medio 2 (Banda 7 del sensor Landsat 8)

Este define una operación aritmética con las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio, la cual identifica una diferencia significativa entre las reflectancias de estas bandas. La vegetación viva es muy reflectiva en la banda del NIR cercano y bajo en el infrarrojo medio, mientras que la vegetación que más ha sufrido algún tipo de daño tiende a contener valores de reflectividad más bajos en el NIR cercano y más altos en la banda del infrarrojo medio (Pérez & García, 2013). Cabe mencionar que el NBR se ha utilizado con anterioridad en otros trabajos de monitoreo y mapeo de incendios (Beltrán, Pacheco, Plata & Monjardín, 2015; Rodríguez, 2012).

Primero, se identificaron de manera preliminar las posibles áreas quemadas mediante la descarga de los puntos de fuego activo para el periodo analizado, obtenidos de la plataforma FIRMS (<http://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/active-fire-data>) y su posterior visualización en un sistema de información geográfica. Estos puntos se obtienen de imágenes MODIS con bandas sensibles al calor con resolución espacial de 1 Km. Se utilizaron los puntos de incendio generados en el producto de fuego activo near real-time fire and corrected reflectance imagery, descrito por Giglio, Schroeder, Hall & Justice (2018).

En las áreas donde se detectaron puntos de calor, ubicadas en cobertura de bosque y agrícola, se determinó la reflectividad espectral en las imágenes Landsat con el *software IDRISI SELVA*, para obtener con ello la diferencia en dos estados: quemado y no quemado. En el caso de este trabajo, se definieron campos de entrenamiento o polígonos digitalizados, a partir de fotointerpretación y reconocimiento de campo, que permitieron contabilizar la respuesta espectral de 14 008 píxeles con área quemada y 3979 píxeles con área no quemada. Estas respuestas espectrales se tabularon y graficaron para verificar la idoneidad del índice a utilizar, el cual requiere que las respuestas espectrales se diferencien adecuadamente.

Posterior al proceso de identificación de áreas quemadas en las imágenes Landsat del periodo 2013-2017, se fotointerpretó en imágenes recientes de las plataformas *Quick-Bird* y *Geoeye* provistas por el servidor de *Google Earth*, para evaluar si las zonas presentaban algún grado de alteración que denotara la ocurrencia de fuego (cobertura vegetal, ceniza, etc). En la fotointerpretación se atendieron criterios como tono, textura y color (Paine & Kiser, 2012), permitiendo identificar además coberturas originales y posteriores del área quemada.

## Detección y cuantificación de los cambios de cobertura y uso de suelo

Se identificó la dirección de las transiciones de uso del suelo y vegetación en las áreas quemadas, mediante una comparación en los inventarios V y VI de uso del suelo del INEGI para saber si las coberturas originales se mantienen.

## Resultados

Se identificaron más de 500 puntos de fuego activo en la zona de estudio, fundamentalmente en las coberturas bosque y agrícola. De acuerdo con el análisis espectral de las diferentes longitudes de banda, se apreció un cambio considerable en la reflectancia pre incendio y post incendio de estas (tabla 2 y figura 4), lo cual sugiere que el NBR es un índice adecuado para la identificación de incendios en estos sitios.

**Tabla 2.** Valores promedio de reflectancia en las coberturas quemadas y no quemadas para diferentes longitudes de onda mediante sensor Landsat 8.

|                            | B5       | B7       |
|----------------------------|----------|----------|
| <i>Bosque quemado</i>      | 0.124823 | 0.228692 |
| <i>Bosque no quemado</i>   | 0.171617 | 0.086911 |
| <i>Agrícola quemado</i>    | 0.239419 | 0.307037 |
| <i>Agrícola no quemado</i> | 0.254202 | 0.248382 |

Fuente: Elaboración propia.

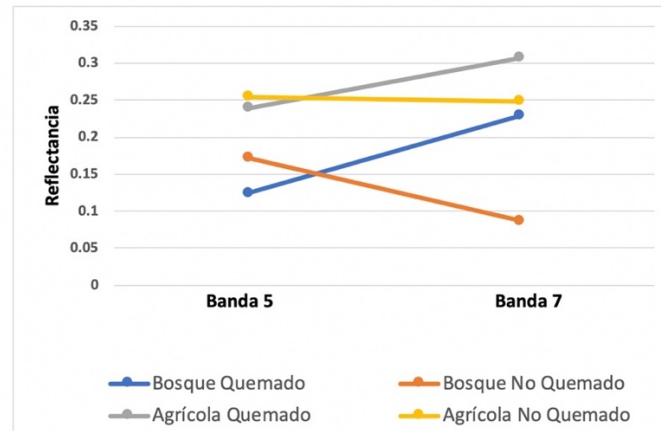


Figura 4. Respuesta espectral de las coberturas de bosque y agricultura quemado y no quemado en las bandas utilizadas en el NBR.  
Fuente: Elaboración propia.

A través de dicho índice, se cuantificó un total de 1260.73 ha de área quemada (tabla 3), de las cuales se detectaron cuatro polígonos donde no hubo cambio de uso de suelo (230 ha) y ocho polígonos (1030 ha) con modificación de cobertura o uso de suelo, de cobertura forestal a vegetación secundaria, evidente mediante fotointerpretación y en la comparación de ambos inventarios. Esto se corroboró mediante una salida de reconocimiento de campo en diciembre de 2017 a poco más del 50% de la superficie afectada por incendio, observándose que la cobertura boscosa original perdió casi todos los elementos arbóreos, predominando los elementos arbustivos y herbáceos. Cambios de este tipo se presentaron en todos los municipios de estudio.

Tabla 3. Identificación de polígonos de área quemada.

| Polígono     | Hectáreas (Ha) | Uso de suelo original | Uso de suelo reportado por INEGI | Uso de suelo final    | Hectárea total |
|--------------|----------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------|
| 1            | 21.8763        | Agrícola              | Agrícola                         | Agrícola              | 230.60         |
| 2            | 142.89         | Agrícola              | Agrícola                         | Agrícola              |                |
| 3            | 52.07          | Agrícola              | Agrícola                         | Agrícola              |                |
| 4            | 13.77          | Agrícola              | Agrícola                         | Agrícola              |                |
| 5            | 23.54          | Bosque                | Bosque                           | Vegetación secundaria | 1030.12        |
| 6            | 55.91          | Bosque                | Bosque                           | Vegetación secundaria |                |
| 7            | 13.91          | Bosque                | Bosque                           | Vegetación secundaria |                |
| 8            | 31.11          | Bosque                | Bosque                           | Vegetación secundaria |                |
| 9            | 53.42          | Bosque                | Bosque                           | Vegetación secundaria |                |
| 10           | 12.41          | Bosque                | Bosque                           | Vegetación secundaria |                |
| 11           | 20.805         | Bosque                | Bosque                           | Vegetación secundaria |                |
| 12           | 819.02         | Bosque                | Bosque                           | Vegetación secundaria |                |
| <b>Total</b> | 1260.73        |                       |                                  |                       |                |

Fuente: Elaboración propia.

Se identificaron cuatro polígonos principales con cobertura de área quemada en los municipios antes mencionados (figura 5), basándose principalmente en un análisis visual con ayuda del compuesto RGB con las bandas 4, 3, 2 de imágenes Landsat. En dichos compuestos, las áreas con registro de incendio se presentaron con colores rojizos y tonos oscuros (Barbosa, Jacon, Moreira, Lima & Oliveira, 2015), por lo que, al ser comparados con el índice NBR, efectivamente presentaban una alteración importante. Cabe destacar que los puntos de incendios registrados por la plataforma FIRMS, sobrepuestos a la imagen del índice, concuerdan a la perfección con las zonas con actividad de fuego, mientras que los campos libres de



presencia de fuego se mantienen en tonos verdes, característicos de la vegetación saludable, sin presencia de fuego.

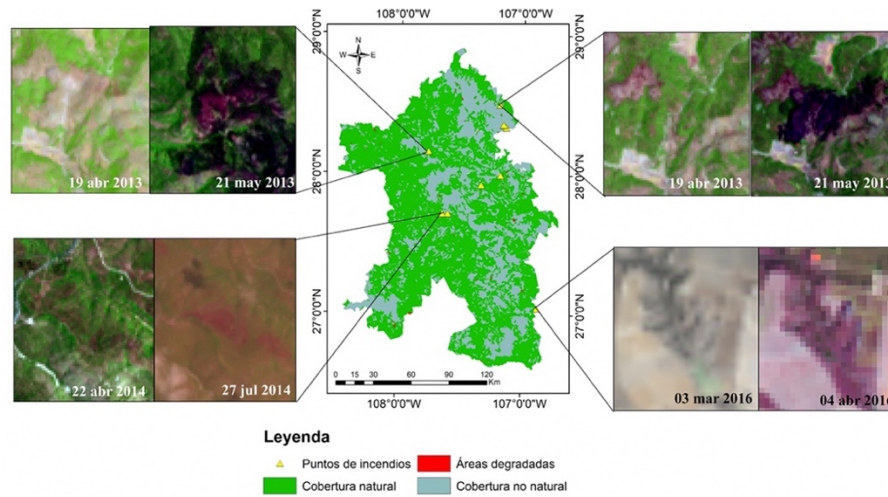


Figura 5. Ejemplo de áreas quemadas pre incendio y post incendio, identificadas con NBR y corroboradas en la composición 654.  
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 6 se aprecia el polígono con mayor extensión de área quemada dentro del área de estudio (819.021 ha). Este se ubica en el municipio de Bocoyna y presenta notablemente un cambio de cobertura si se le compara en imágenes de alta resolución. En el recuadro A, se muestra la cobertura boscosa original en la imagen del 23 de octubre 2015, mientras que en el recuadro B se muestra la misma zona con los puntos de calor observados en mayo de 2016, sobrepuestos a una imagen del 24 de diciembre del 2016, para validación del área afectada. En este recuadro se nota el cambio de cobertura boscosa a vegetación secundaria y áreas que, de acuerdo con el reconocimiento de campo, perdieron casi completamente su vegetación.

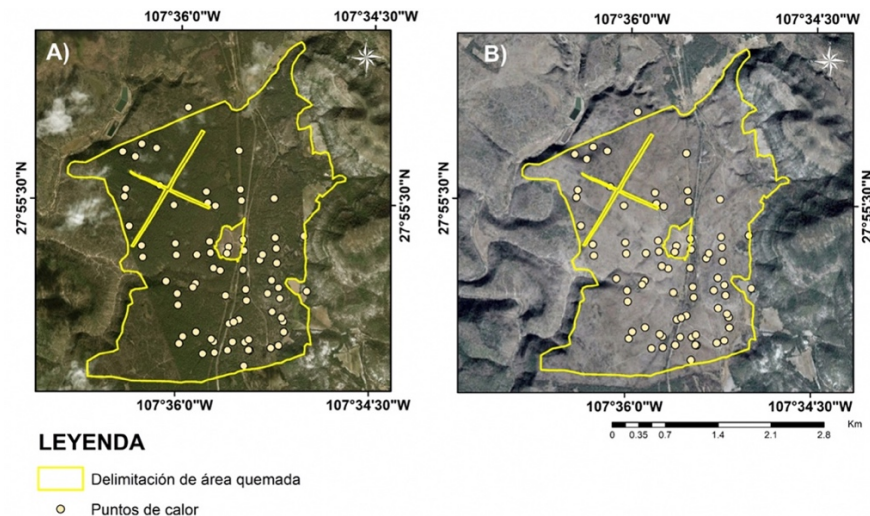


Figura 6. Polígono 12 de área quemada previo (imagen izquierda del 23 octubre 2015) y posterior a incendio (imagen derecha del 24 de diciembre del 2016 y puntos de calor).  
Fuente: Elaboración propia.

## Discusión

La respuesta espectral de las coberturas más afectadas por incendio en este trabajo hizo visible el deterioro del follaje vegetal por la presencia del fuego y evidenció que el NBR era un índice adecuado para el monitoreo de incendio en la zona. Muñoz, Acevedo, Salvo, Fagalde & Vargas (2007) mencionan la importancia de obtener la respuesta espectral y analizar si se presenta algún cambio en la reflectancia de las coberturas, ya que la estructura interna de la hoja afectada por un incendio conduce a un aumento de la respuesta espectral en las longitudes de onda en el SWIR y una pérdida en el NIR, condición que también se observó en este ejercicio. Es importante destacar que el NBR maximiza el contraste entre áreas quemadas y no quemadas, de ahí su utilidad para la caracterización de estas (Guillem-Cogollos, Vinué-Visús, Caselles-Miralles & Espinós Morató, 2017).

De las 1260.73 ha que se identifican como áreas quemadas mediante NBR y verificación de campo, cerca del 82% muestra un cambio de cobertura, pues pasó de bosque a vegetación secundaria. En el 18% restante, la cartografía del inventario VI no indica cambio de cobertura, pero, al analizar estas áreas con imágenes de alta resolución, se observó que en algunos casos este cambio sí ocurrió, de lo que se deduce que, además del inventario, es necesario utilizar siempre una fuente de validación confiable, preferentemente en imágenes de alta resolución y reconocimiento de campo.

Los cambios de cobertura reportados por este estudio podrían tener consecuencias importantes para la biota, la flora, la fauna y las funciones asociadas a la condición del suelo. Harvey & Neuenschwander (1991) mencionan que los incendios forestales afectan dramáticamente el ciclo de nutrientes y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, pues provocan la pérdida parcial o total de la vegetación, y afectan con esto la estructura y la composición de la cobertura, la permeabilidad y la fertilidad del suelo. También, cabe mencionar los efectos potenciales en la sobrevivencia de la fauna silvestre por falta de hábitat, pues este se deteriora notablemente y ocasiona la pérdida de alimento, refugio y espacios.

Cabe señalar que, en el total de las áreas incendiadas detectadas por el índice, la validación identificó que efectivamente ocurrió un incendio. Este confirma que el NBR es un índice muy eficiente para detectar incendios y coincide con los resultados obtenidos por otros autores. Fuentes (2015), por ejemplo, obtuvo una eficiencia por arriba del 80%, validando mediante interpretación en distintas imágenes generadas con combinación de bandas y los puntos de calor.

En el caso de nuestro ejercicio, por cada zona quemada corresponden de 35 a 45 puntos de calor establecidos por FIRMS, dependiendo directamente de la superficie incendiada (a mayor superficie, mayor número de puntos) (Dorrego, 2009). También es importante destacar que no todos los puntos de calor se asociaron a un incendio, pues se observaron puntos de calor donde no se registra área quemada de acuerdo con el NBR. Esto es coincidente con lo reportado por Tamayo & González (2014), quienes sugieren utilizar imágenes post incendio adquiridas en fechas próximas a la ocurrencia del fuego, generando con ello una adecuada discriminación y delimitación de las zonas afectadas.

En este trabajo el 100% de las zonas identificadas como área quemada mediante el NBR corresponden a zona quemada en la realidad. Se trata de una eficiencia de identificación alta, que no siempre se obtiene en los trabajos de detección de incendios. Aunque muchos factores pueden influir en el error, un aspecto que pudiera ser importante para mejorar la eficiencia en la detección y mapeo de incendios es el efecto asociado a las diferentes resoluciones de los sensores utilizados en este proceso, ya que los puntos de calor se extraen de imágenes de resolución pobre (MODIS), mientras que el NBR se calcula usualmente con imágenes de resolución media (Landsat), lo que puede provocar discordancias

espaciales y espectrales en la manifestación y visualización del incendio (Lentile *et al.*, 2006; Meng & Zhao, 2017).

El NBR discrimina adecuadamente las áreas quemadas, pero en algunos casos puede sobreestimar su extensión (Epting, Verbyla & Sorbel, 2005), por lo que es conveniente realizar una revisión polígono por polígono durante el proceso de validación. A pesar de lo laborioso de este proceso, es la única forma segura de no sobreestimar ni subestimar dicha área y, preferentemente, debe acompañarse con trabajo de campo.

Cabe mencionar que existe gran variedad de índices espectrales para la detección de áreas quemadas, tales como: *burn area index modis* (BAIM), *burn area index* (IAQ), *normalize difference vegetation index* (NDVI) que favorecen el análisis de la detección de zonas incendiada (Conese & Bonora 2005). Algunos de ellos fueron ensayados previamente en este ejercicio en los municipios de Chihuahua y se puede decir de manera preliminar, simplemente por discriminación visual, que la eficiencia del NBR parece superar a todos ellos. El BAIM, por ejemplo, indica zonas quemadas en lugares donde no hay vegetación que, al ser validados con las imágenes de alta resolución, no muestran signo o presencia de fuego. Esta limitante también se encontró por otros autores en otros índices (Sirtori, Barberis, Gamba, Chuvieco & Mariotti, 2012).

Debe decirse que, independientemente del índice elegido, la calidad de las imágenes de trabajo es fundamental, en particular, que no tengan presencia de nubes, pues estas impiden la visualización de la superficie terrestre mediante índices espectrales (Miller & Thode, 2007). Dicha situación se consideró en este trabajo al elegir imágenes con un porcentaje mínimo de nubosidad. Esto evita posibles errores de interpretación y detección de áreas incendiadas dentro de la zona de estudio, facilitando con ello el proceso de creación de combinación de bandas a color verdadero para mejorar la visualización.

El NBR también permite evaluar y asignar distintos grados de severidad del fuego (Montoria, Pérez-Cabello, García-Martín, Vlassova & de la Riva, 2014). Existe una escala teórica para definir distintos grados de severidad, pero esta escala debe calibrarse mediante un reconocimiento de campo que traduzca el diferencial de valores del NBR a severidad de afectación de las coberturas quemadas. Esta calibración no se desarrolló en este estudio, porque implica un reconocimiento exhaustivo que idealmente involucraría la evaluación de biodiversidad en cuadrantes y medición de la cobertura vegetal en los mismos, lo que no se realizó por las condiciones de inseguridad en la Sierra Tarahumara, asociada a la presencia de grupos delincuenciales que operan tala clandestina y narcotráfico en la zona (García, 2018). A pesar de esta limitación, los resultados permiten identificar áreas afectadas y definir prioridades de restauración de estas, con base en la superficie quemada.

Gracias a lo anterior, la cartografía de áreas quemadas mediante un índice como el NBR se constituye en un insumo fundamental para el manejo ambiental de las áreas afectadas por fuego. Su identificación facilita, por ejemplo, la asignación de recursos para la restauración de ecosistemas degradados o la vigilancia preventiva de las brigadas que atienden incendios, en aquellas que presentan fuego de manera recurrente. Estas condiciones ayudan a reducir la amenaza del fuego en ecosistemas como el bosque en la Sierra Tarahumara, ya amenazado por la tala clandestina, los cambios de uso del suelo asociados a la ganadería, la agricultura, la minería o el cambio climático.

## Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se han cuantificado e identificado las zonas incendiadas mediante el índice NBR entre los años 2013 y 2017 en siete municipios de Chihuahua que destacan por su cobertura boscosa. En estos se cuantificaron 1260.73 ha de área quemada, de las cuales 230.60 ha no presentaron cambio de cobertura y

1030.12 ha presentaron modificación en la cobertura o uso de suelo, tendiente a la antropización de las coberturas naturales.

Se encontró que el NBR tuvo una eficiencia muy elevada en la detección de áreas quemadas, lo cual lo hace recomendable para trabajos posteriores. En el proceso de evaluación resultó sumamente útil combinar información obtenida de diferentes sensores y plataformas, como los datos de fuego activo de la plataforma FIRM y los valores espectrales de NBR obtenidos de las imágenes Landsat 8. Ambos constituyen insumos sumamente útiles para realizar este tipo de estudios, pues se complementan entre sí, aunque proceden de fuentes con diferentes resoluciones espaciales, temporales y espectrales.

En este particular, la selección cuidadosa y la corrección atmosférica de las imágenes constituye un proceso fundamental para el análisis, junto con la utilización de combinaciones en color verdadero (RGB: 4-3-2) y falso color (RGB 7-5-4 y 6-5-4), que ofrecen excelentes resultados en la detección de los espacios afectados y evitando las confusiones entre coberturas. Para obtener mejores resultados, se recomienda validar con imágenes satelitales (pre y post incendio) de alta resolución, esto para mejorar la visualización y delimitación de las zonas afectadas.

La identificación de áreas quemadas permite que las dependencias encargadas del manejo y protección forestal apliquen programas de restauración de las zonas afectadas. Cabe mencionar que este análisis permite apoyar en la detección de focos activos, primordialmente en coberturas de uso natural, reduciendo considerablemente el tiempo y mejorando la precisión de dichos análisis. Ejercicios de este tipo pueden realizarse en otros sitios con condiciones físicas y de cobertura vegetal parecidas.

Es importante continuar las evaluaciones en la zona, en particular, en series de tiempo largas. También, es muy importante establecer la correspondencia entre los valores espectrales de los índices y el grado de afectación y recuperación de la vegetación quemada, lo cual facilitaría el monitoreo ecológico de los predios afectados, integrando metodologías de sensoria remota y de reconocimiento en el sitio. Además, conviene explorar la idoneidad de otros índices para evaluar incendio y compararlos entre sí, a fin de elegir aquel que, de acuerdo con datos duros, arroje mejores resultados.

## Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto Modelado Predictivo de la Deforestación en el Oeste y Suroeste de Chihuahua y las actividades de colaboración académica entre la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y la Universidad Nacional Autónoma de México.

## Referencias

- Barbosa, V. L., Jacon, A. D., Moreira, P. A. C., Lima, A., & Oliveira, C. L. E. (Abril, 2015). Detection of burned forest in amazonia using the normalized burn ratio (NBR) and linear spectral mixture model from landast 8 images. *Brasil. Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto*, Brasil. Recuperado el 2 de septiembre de 2018 de <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0594.pdf>
- Bastarrika, I. A., & Chuvieco, S. E. (2006). Cartografía del área quemada mediante crecimiento de regiones: aplicación en entornos mediterráneos con imágenes TM y ETM+. *GeoFocus Revista internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica*, 6, 182-204.
- Bella, C. M. D., Posse, G., Beget, M. E., Fischer, M. A., Mari, N., & Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas, Revista científica de ecología y medio ambiente*, 17(3), 39-52.

- Beltrán, G. J. C., Pacheco, A. C. E., Plata, R. W., & Monjardín, A. S. A. (Octubre, 2015). Evaluación de variables continuas derivadas de una imagen Landsat 5 tm para la detección de áreas quemadas. *Memorias de resúmenes en extensos SELPER-XXI-México-Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)*, Culiacán, Sinaloa: Recuperado el 2 de septiembre de 2018 de [http://selper.org.mx/images/Memorias2015/assets/sra\\_006.pdf](http://selper.org.mx/images/Memorias2015/assets/sra_006.pdf)
- Blas, R., González, A. F., & Gurría, G. J. L. (2003). Cartografía de áreas quemadas con Spot 5. *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas, 14, XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Granada*, 623-635.
- Brizuela, A. B., Aguirre, C. A., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN-Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Buenos Aires, Argentina: Martín.
- Chuvieco, S. E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista de la Real Academia de las ciencias exactas, físicas y naturales*, 103(1), 173-181.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2010). *Incendios forestales Guía práctica para comunicadores. Comisión Nacional Forestal*. Recuperado el 18 de septiembre de 2018 de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Guía%20práctica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2018). *Incidencia de Incendios Forestales. Temporada 2018*. Recuperado el 31 de enero de 2019 de [https://www.cnf.gob.mx:8443/snif/seif\\_chihuahua/programas/prevencionycombatedeincendios](https://www.cnf.gob.mx:8443/snif/seif_chihuahua/programas/prevencionycombatedeincendios)
- Conese, C., & Bonora, L. (Octubre, 2005). Burned land mapping from remote sensing imagery, 4. South Dakota. *Global Priorities in Land Remote Sensing*. Recuperado el 16 de diciembre de 2018 de [http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/pecora16/Conese\\_C.pdf](http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/pecora16/Conese_C.pdf)
- Cure, L. L. (2017). Análisis de métodos para la cartografía de incendios forestales en el cantón Cuenca a partir de imágenes TERRA/AQUA MODIS. *Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (Confibsig)*. Ecuador. Recuperado el 2 de diciembre de 2018 de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4637/1/11122.PDF>
- De Santis, A., & Vaughan, P. (2009). Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *Recursos Rurais*, 5, 93-100.
- Dorrego, X. (2009). Teledetección y sig en la gestión de los incendios forestales en Galicia. *Pecora 16 "Global Priorities in Land Remote Sensing"*, Sioux Falls, Dakota del Sur.
- 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(3-4), 328-339. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.002>
- Eva, H., & Lambin, E. F. (2000). Fires and land-cover change in the tropics: a remote sensing analysis at the landscape scale. *Journal of Biogeography*, 27(3), 765-776. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00441.x>
- Fernández, P. I. (1997). *Influencia de los incendios forestales sobre la materia orgánica edáfica* (Tesis de Doctorado). Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España.
- Fuentes, N. H. L. (2015). Monitoreo de cicatrices de quemas en el departamento de Pando-Bolivia mediante sistemas de información geográfica y teledetección. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Brasil. Recuperado el 17 de noviembre de 2018 de <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0105.pdf>
- García, V. (8 de junio de 2018). El crimen organizado se apodera de la sierra Tarahumara. *El Sol de México*. Recuperado el 22 de noviembre de 2018 de: <https://www.elsoldemexico.com.mx/republica/justicia/el-crimen-organizado-se-apodera-de-la-sierra-tarahumara-1747114.html>
- Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J. V., & Justice, C. O. (2018). *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision B*. USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA)
- Guillem-Cogollos, R., Vinué-Visús, D., Caselles-Mirallas, V., & Espinós Morató, H. (2017). Estudio crítico de los índices de severidad y la superficie afectada por el incendio de Sierra de Luna (Zaragoza). *Revista de Teledetección*, 49, 63-77. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7117>

- Harvey, A. E., & Neuenschwander, L. F. (1991). *Proceedings - Management and productivity of western-montane forest soils*. USA: United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Intermountain Research Station. doi: <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-280>
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment: Remote sensing Measure of severity, the Normalized Burn Ratio. En: D. C. Lutes (Ed.). *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system* (pp. LA25- LA41). UT, USA: United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- López, G. M. J., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6(1), 31-37. doi: <https://doi.org/10.1080/10106049109354290>
- Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Lewis, S. A., Gessler, P. E., & Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 319-345. doi: <https://doi.org/10.1071/WF05097>
- Meng, R., & Zhao, F. (2017). Remote sensing of fire effects: A review for recent advances in burned area and burn severity mapping. En: G. P. Petropoulos (Ed.). *Remote Sensing of Hydrometeorological Hazards* (pp. 261-281). Florida, USA: Chemical Rubber Company (CRC) Press Taylor y Francis Group.
- Miller, J. D., & Thode, A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66-80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>
- Miller, J. D., Skinner, N., Safford, H. D., Knapp, E. E., Ramirez, C. M. (2012). Trends and causes of severity, size, and number of fires in northwestern California, USA. *Ecological Applications*, 22(1), 184-203.
- Montoria, R., Pérez-Cabello, F., García-Martín, A., Vlassova, L., & de la Riva, F. J. (2014). La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. En: J. Arnaéz, P. González Sampérez, T. Lasanta, & B. L. Valero Garcés (Eds.). *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz* (pp. 427-440). España: Instituto Pirenaico de Ecología, Universidad de la Rioja.
- Muñoz, C., Acevedo, P., Salvo, S., Fagalde, G., & Vargas, F. (2007). Detección de incendios forestales utilizando imágenes NOAA/16-LAC en la Región de La Araucanía, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 28(2), 119-128. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002007000200004>
- Oliva, F., & Verdú, P. (2008). Revisión de la utilización de distintos índices espectrales y técnicas para la cartografía de área quemada en imágenes MODIS. *Espacio, Tiempo y Forma. Serie VI, Geografía*, 1, 129-152. doi: <https://doi.org/10.5944/etfvi.1.2008.1451>
- Paine, D., & Kiser, J. (2012). Photo Interpretation. En: D. P. Paine, & J. D. Kiser (Eds.). *Aerial Photography and Image Interpretation* (p. 648). New Jersey, USA: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Parks, S., Dillon, G., & Miller, C. J. R. S. (2014). A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio. *Remote Sensing*, 6(3), 1827-1844.
- Pérez, C. F., & De la Riva, F. J. (2017). El empleo de imágenes Landsat TM para la detección y cartografía de áreas incendiadas en el Prepirineo occidental oscense. *Geographicalia*, 36, 131-145. doi: [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.1998361684](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1998361684)
- Pérez, G. M. E., & García, R. M. P. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 61, 285-308.
- Plana Bach, E., Font Bernet, M., & Serra Davos, M. (2016). *Los incendios forestales: guía para comunicadores y periodistas*. España: Efficient fire risk communication for resilient societies (Efirecom), Co-financed by the EU-Union Civil Protection Mechanism (CTFC). Recuperado el 6 de enero de 2019 de [http://efirecom.ctfc.cat/docs/efirecomperiodistes\\_es.pdf](http://efirecom.ctfc.cat/docs/efirecomperiodistes_es.pdf)
- Rodríguez, B. L. R., & Ríos, M. J. E. (2017). *Identificación de áreas quemadas por incendios forestales en el departamento del meta y determinación de medidas de intervención para su reducción*. Manizales, Colombia: Universidad Católica de Manizales.
- Rodríguez, M. A. (2012). Cartografía multitemporal de quemas e incendios forestales en Bolivia: Detección y validación post-incendio. *Ecología en Bolivia*, 47(1), 53-71.
- Sirtori, M., Barberis, G., Gamba, P., Chuvieco, E., & Mariotti, M. (Septiembre, 2012). Detección y monitorización de áreas quemadas en Liguria (Italia) mediante imágenes de satélite Landsat y Quickbird. *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, Madrid, España. Recuperado el 11 de enero de 2019

de <https://docplayer.es/16936694-Deteccion-y-monitorizacion-de-areas-quemadas-en-liguria-italia-mediante-imagenes-de-satelite-landsat-y-quickbird.html>

Tamayo, C. O., & González, C. R. V. (2014). *Determinación cartográfica de zonas incendiadas mediante la aplicación del algoritmo nbr con imágenes Landsat 5 TM* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Chiapas, México.

United States Geological Survey (USGS). (2018). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. South Dakota, USA: Department of the Interior, United States Geological Survey (USGS).