

Evaluación remota de la recuperación de la vegetación afectada por incendios forestales

Remote evaluation of the recovery of vegetation affected by forest fires

José Germán Flores-Garnica

Ana Graciela Flores-Rodríguez*

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

Refugio Ramón Rivera-Leyva

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Mococho, Yucatán, México.

Fernando Arellano-Martin

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bacalar, Quintana Roo, México.

Francisco E. Ursúa-Guerrero

EPSUS

Felipe Ángel Omar Ortiz-Moreno

Oscar Guzmán-Escalante

Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

David Gutierrez-Carbonell

EPSUS

*Autor para correspondencia: ana1386@hotmail.com

Resumen

Los incendios forestales alteran los procesos e interacciones de los ecosistemas. Sin embargo, no todos los incendios son iguales, algunos son más severos que otros, variando su impacto en la vegetación de acuerdo al grado de severidad. Por lo tanto, es importante contar con información que permita dimensionar estas afectaciones y apoye la implementación de estrategias de manejo. Sin embargo, el monitoreo del impacto del fuego no es una tarea sencilla, mucho menos el monitoreo de la respuesta del ecosistema con el paso de los años. De acuerdo a esto, el objetivo de este trabajo fue implementar tecnología satelital para monitorear la dinámica de la recuperación de la cobertura forestal en áreas impactadas por incendios forestales, con la finalidad de dirigir las estrategias de restauración del ecosistema. Para esto se definió la diferencia (antes y después del incendio) de la relación de quemado normalizada (dNBR) para determinar la severidad de un incendio ocurrido en la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an en el 2019. Posteriormente, se evaluó la dinámica de recuperación del ecosistema a través del análisis de una serie de imágenes, mediante: a) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI); b) Relación de quemado normalizado (NBR); c) Relación de quemado normalizado térmico (NBRT); d) Índice de área de quemado (BAI). Se observó, un cambio en el valor de reflectancia en el área quemada después del incendio, el cual se fue restaurando con el paso del tiempo. Sin embargo, aunque los valores muestren una recuperación de la vegetación, en campo el ecosistema está compuesto por especies diferentes a las que se presentaban antes del incendio, por lo que mediante la firma espectral de la vegetación se generó una imagen donde muestra la diferencia de la densidad de vegetación lo que favorece la comprensión de los efectos del fuego y ayuda a definir áreas prioritarias para dirigir las acciones de restauración.

Palabras clave: Índices espectrales, imágenes satelitales, regeneración, severidad de incendios, sensores remotos.

Abstract

Forest fires alter ecosystem processes and interactions. However, not all fires are the same, some are more severe than others, their impact on the vegetation varying according to the degree of severity. Therefore, it is important to have information that allows sizing these impacts and supports the implementation of management strategies. However, monitoring the impact of fire is not an easy task, much less monitoring the response of the ecosystem over the years. Accordingly, the objective of this work was to implement satellite technology to monitor the dynamics of forest cover recovery in areas impacted by forest fires, in order to direct ecosystem restoration strategies. For this, the difference (before and after the fire) of the normalized burning ratio (dNBR) was defined to determine the severity of a fire that occurred in the Sian Ka'an Biosphere Reserve in 2019. Subsequently, the dynamic of ecosystem recovery was evaluated, through the analysis of a series of images, using the following indexes: a) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); b) Normalized burn ratio (NBR); c) Normalized Thermal Burnup Ratio (NBRT); d) Burned Area Index (BAI). A change in the reflectance value was observed in the burned area after the fire, which was restored over time. However, although the values show a recovery of the vegetation, in the field the ecosystem is made up of different species from those that were present before the fire, therefore, by means of the spectral signature of the vegetation, an image was generated showing the difference in the density of vegetation, which favors the understanding of the effects of fire and helps define priority areas to direct restoration actions.

Keywords: Spectral index, satellite images, regeneration, severity of fires, remote sensing.

Introducción

Los ecosistemas forestales son perturbados por varios factores, como son los incendios (González *et al.*, 2008), que pueden presentarse con diferentes niveles de severidad, lo cual condiciona la respuesta que tendrá el ecosistema ante los efectos del fuego. Las variaciones en el nivel de severidad están asociados a la cantidad y calidad del material combustible que se quema, influyendo en la resiliencia del ecosistema forestal (Montorio *et al.*, 2014). Esto implica que incendios severos pueden resultar en una baja respuesta de recuperación del ecosistema (Neris *et al.*, 2016), mientras que incendios moderados permiten que los mecanismos de resiliencia lleven al ecosistema a la condición que prevalecía antes del incendio. No obstante, los efectos del fuego son difícilmente generalizables, debido a la interacción de las variables ambientales propias de cada ecosistema y las características del incendio. Lo que dificulta la selección de estrategias para atenuar las consecuencias negativas que se generan (Pausas y Vallejo, 2008).

Si bien existen dos técnicas de restauración; la pasiva, que se basa en proteger o facilitar que se den los procesos de sucesión y colonización natural (Clewel *et al.*, 2005), y la activa que involucra la intervención por medio de manejo de la sucesión secundaria, como plantaciones o siembra directa (Zahawi *et al.*, 2013). Para definir cuál es la estrategia correcta es necesario realizar evaluaciones y contar con información de precisión que ayuden a dirigir los planes de manejo. Debido a la limitación de recursos económicos, de personal, de tiempo y de accesibilidad para recorrer todas las áreas afectadas por incendios y evaluar el impacto que ha tenido el fuego de manera específica en cada área, existe la necesidad de aplicar métodos para evaluar las consecuencias ecológicas de las perturbaciones de manera remota (Van Leeuwen *et al.*, 2010). Ante esto, las imágenes satelitales, derivadas de sensores remotos, han mostrado un buen potencial en el estudio, tanto de la severidad de los incendios forestales como en la determinación de la recuperación de la vegetación (Röder *et al.*, 2008). Lo cual se basa en poder detectar, mediante índices espectrales (Viana-Soto *et al.*, 2017), el cambio en la reflectancia de las áreas quemadas y las áreas sin quemar (Briones *et al.*, 2020; Montorio *et al.*, 2014),

definiendo firmas espectrales que permiten diferenciar, por ejemplo, la vegetación sana en comparación con la vegetación no sana o la detección del carbón resultante de la quema (De Santis y Chuvieco, 2009). Esto con el propósito de ampliar los conocimientos de la investigación ecológica (Chen *et al.*, 2020) y que éstos se puedan aplicar en una política de restauración adecuada (Viana-Soto *et al.*, 2017). Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo es implementar tecnología satelital para monitorear la dinámica de la recuperación de la cobertura forestal en áreas impactadas por incendios forestales, con la finalidad de dirigir las estrategias de restauración del ecosistema.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El incendio ocurrió entre el 30 de agosto al 8 de septiembre del 2019, dentro de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, Quintana Roo, México, en la zona núcleo de Muyil entre las coordenadas -87° 30' 25" O, 19° 56' 30" N, en las cercanías a la laguna de Xamach, fue un incendio superficial y mixto (aéreo y subterráneo) (CONANP, 2021) el cual afectó vegetación de selva mediana subperennifolia en un total de 13.7 hectáreas.

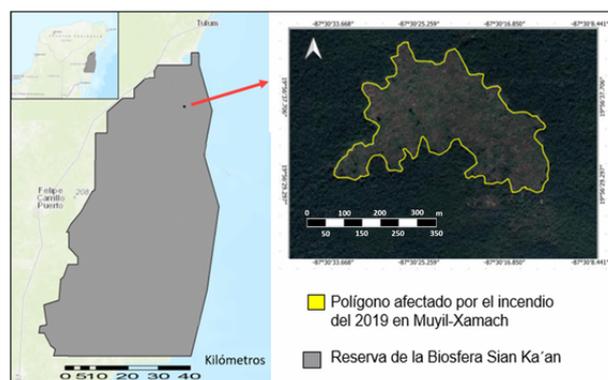


Figura 1. Ubicación del incendio forestal Muyil-Xamach dentro de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an.

Evaluación de severidad en campo

Tres años después del incendio (mayo 2022), se realizaron recorridos de campo, dentro y fuera del área quemada, con el objetivo de ubicar diferentes condiciones de recuperación de la vegetación, basadas en los siguientes niveles de densidad: a) Alta. Implica una severidad del fuego baja; b) Media.

Se relaciona con una severidad del fuego moderada; c) Baja. Se asocia a un impacto alto del fuego provocado por una severidad alta; y d) Muy baja. Define una lenta restauración de la vegetación, como resultado de una severidad extrema. Estas variaciones son definidas, principalmente, por la heterogeneidad del material combustible (cantidad y calidad) a lo largo del área incendiada.

Detección remota de la severidad

Para conocer la severidad del incendio se utilizó el índice de Diferencia de Relación de Quemado Normalizado (dNBR) (Differenced Normalized Burn Ratio) (Parks *et al.*, 2018) (1).

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (1)$$

Dónde: NBR pre= Relación normalizada de quemado antes del incendio; NBR post= Relación normalizada de quemado después del incendio.

Para la aplicación de la formula se descargaron, de la plataforma Google Earth Engine®, imágenes con el índice de Relación de Quemado Normalizado NBR de antes del incendio (enero 2019) y después (diciembre 2019). Estas imágenes fueron procesadas haciendo uso de algebra de mapas en la plataforma Qgis 3.16 (QGIS.org, 2021), y los valores resultantes del índice se dividieron en cinco categorías de severidad (no quemado, nivel de severidad bajo, medio, alto y extremo).

Monitoreo de la dinámica de recuperación

Se seleccionaron imágenes historias usando la plataforma Google Earth Engine®, antes del incendio (enero 2019) y después del incendio (diciembre 2019, Julio 2020, agosto 2020, octubre 2021, diciembre 2021). No se puede contar con imágenes del mismo mes, ya que fueron seleccionadas mediante un filtro de nubes. De las fechas seleccionadas, se descargaron imágenes Landsat 8 OLI correspondientes a los índices espectrales con mayor sensibilidad tanto a la detención de daño por el fuego como en la sensibilidad de la recuperación de la vegetación:

Índice de vegetación de diferencia normalizada **NDVI** (Normalized Differenced Vegetation Index) detecta la cantidad de biomasa mediante la actividad fotosintética (Gitas *et al.*, 2012), por lo que, se ha utilizado para analizar la recuperación de la vegetación y su comparación con las condiciones previas al fuego, evaluando cambios en la vegetación que podrían estar relacionados con las especies sucesionales (Goetz *et al.*, 2006) (2).

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (2)$$

Dónde: NIR = banda de infrarrojo, banda 5 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 0.85 - 0.88 μm); Red = banda roja, banda 4 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 0.64 - 0.67 μm).

Relación normalizada de quemado **NBR** (Normalized Burn Ratio) (3). Detectar la severidad del incendio y monitorear la recuperación de la vegetación (López, 2020).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \quad (3)$$

Dónde: NIR = banda de infrarrojo, banda 5 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 0.85 - 0.88 μm); SWIR2 = banda de infrarrojo de onda corta, banda 7 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 2.11 - 2.29 μm)

Relación de quemado normalizado térmico **NBRT** (Normalised Burn Ratio Thermal) (4). Se basa en incorporar la banda térmica TIR de imágenes Landsat en el índice NBR, ya que después de la quema de un área se ve un aumento en la temperatura de brillo (Tran *et al.*, 2018).

$$NBRT = \frac{(NIR - SWIR2 * TRI)}{(NIR + SWIR2 * TRI)} \quad (4)$$

Dónde: NIR = banda de infrarrojo, banda 5 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 0.85 - 0.88 μm)
SWIR2 = banda de infrarrojo de onda corta, banda 7 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 2.11 - 2.29 μm); TRIS = banda de infrarrojo térmico, banda 10 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 10.60 - 11.19 μm)

Índice de área de quemado BAI (Burn Area Index).

Diferencia áreas quemadas de las no quemadas y la severidad de quemado ya que la respuesta espectral de este índice depende de la persistencia de depósitos de carbón (Chen *et al.*, 2020) (5).

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - Red)^2 + (0.06 - NIR)^2} \quad (5)$$

Dónde: *NIR* = banda de infrarrojo, banda 5 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 0.85 - 0.88 μm); *Red* = banda roja, banda 4 en Landsat 8 OLI (longitud de onda de 0.64 - 0.67 μm).

Firma espectral

Se obtuvo la firma espectral utilizando imágenes Landsat 8 OLI de diciembre 2021, basada en densidades de cobertura vegetal, (Mercan y Alam, 2011), con lo que se compararon primeramente dos condiciones: a) la vegetación más densa, encontrada fuera del área del incendio; y b) la vegetación menos densa, presente dentro del polígono afectada por el fuego.

Resultados y discusión

Severidad de incendio

Se aplicó el índice NBR a la imagen previa al incendio (Figura 2a) y a la imagen posterior al incendio (Figura 2b) para obtener la imagen de seve-

ridad, donde se observó claramente de color más oscuro la vegetación afectada por el incendio. Posteriormente, se observa que la imagen de severidad obtenida mediante el índice dNBR concuerda con lo encontrado en campo, ya que este incendio se dio por liquidado con una extensión de 9 ha. Sin embargo, en evaluaciones posteriores en campo se encontró que el incendio continuó de manera subterránea y superficial hasta abarcar un total de 13 ha. En la imagen de severidad se observó que las primeras nueve hectáreas registran una severidad extrema y que el área restante, por donde se propagó el incendio posteriormente tiene una severidad menor (Figura 2c y 2d).

Dinámica de recuperación

Al aplicar los índices espectrales a cada imagen temporal se obtuvo seis evaluaciones del polígono incendiado por cada índice (NDVI, BAI, NBR y NBRT), los cuales mostraron resultados similares entre ellos. Un ejemplo de esto se presenta en la Figura 3, donde se muestran los valores del índice NBRT. Antes del incendio no se apreció daño en la vegetación, ya que los valores de los píxeles de la imagen son similares entre sí (Figura 3a). Por el contrario, al analizar la imagen más próxima después del incendio (Figura 3b), se define claramente el polígono correspondiente al área que-

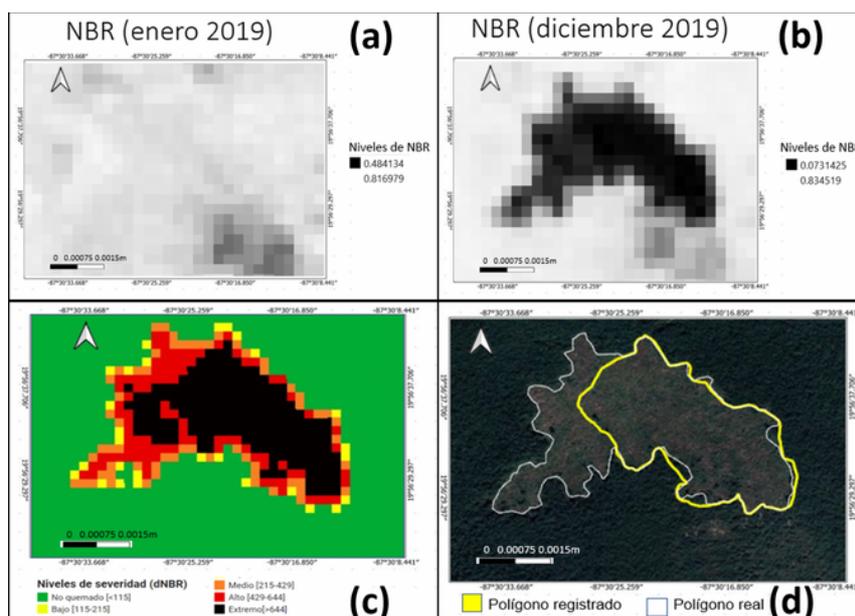


Figura 2. Mapa de severidad de incendio. (a) Índice NBR previo al fuego (b) Índice NBR posterior al fuego que se utilizó para crear el (c) Mapa temático de severidad del Índice de Diferencia de Relación de Quemado Normalizado(dNBR). (d) imagen satelital donde se muestran los polígonos del incendio del 2019.

mada, donde se aprecia un cambio en la vegetación después del incendio, presentándose una disminución de los valores del índice y, por consiguiente, un color más oscuro en la imagen. Sin embargo, en las imágenes correspondientes a los años posteriores (Figura 3c, 3d y 3e) se apreció nuevamente un aumento de los valores del índice (disminución del color oscuro), lo que indica una recuperación en la vegetación. Finalmente, dos años después del incendio (Figura 3f) se observó una recuperación en los valores de la vegetación, sobre todo en la esquina inferior derecha del polígono incendiado, donde los píxeles se ven un poco más claros que en los años anteriores. Sin embargo, la vegetación no presentó los mismos niveles de reflectancia del índice, comparado con los niveles que se obtienen antes del incendio (Figura 3a).

A partir de las imágenes temporales de cada índice, se obtuvo el promedio del valor de cada uno de los píxeles del polígono incendiado. Estos valores se

graficaron para observar los cambios del índice a través el tiempo. Como se observa en la Figura 4, todos los índices muestran de una manera muy notoria el cambio de reflectancia justo después de la ocurrencia del incendio (diciembre 2019). Estos valores se recuperaron considerablemente para el siguiente año (Julio 2020) y, conforme pasa el tiempo, se van acercando al valor inicial registrado antes del incendio. Esto indica una recuperación en la presencia de la vegetación después del paso del fuego. Sin embargo, con ninguno de los índices se aprecia una recuperación total de la vegetación, ya que ninguno de los valores se restablece a como estaban inicialmente.

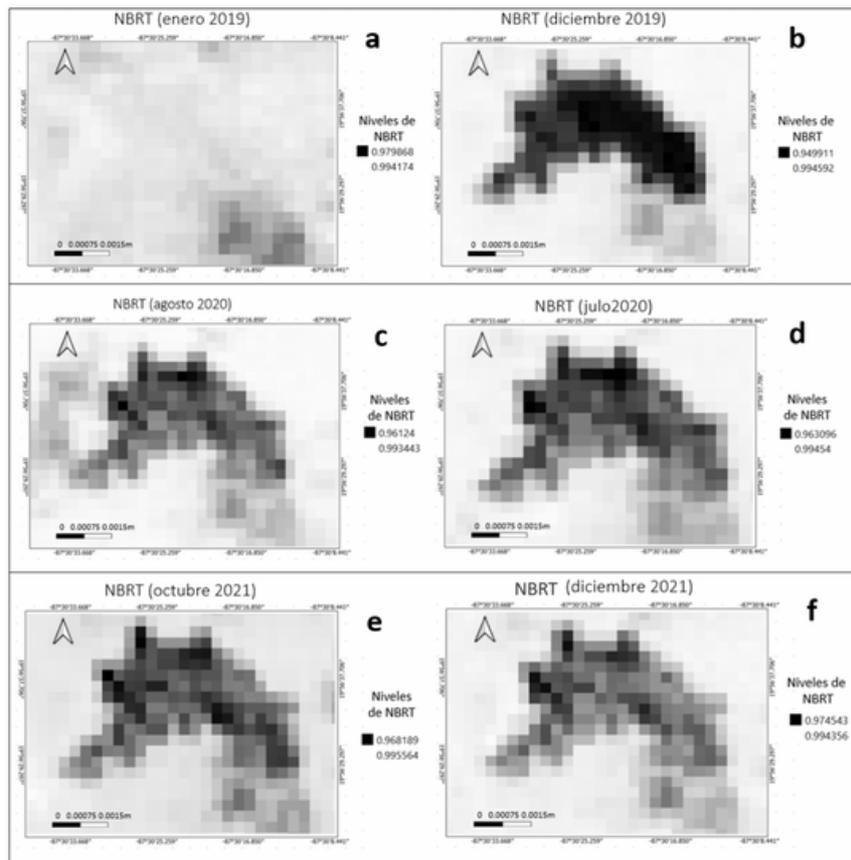


Figura 3. Mapas temáticos del índice NBRT del polígono afectado por el incendio Muyl Xamach 2019, en imágenes temporales antes y después del incendio. a) Antes del incendio; b) inmediatamente después del incendio; c),d),e) y f) dinámica después del incendio. No fue posible usar las imágenes de un mismo mes ya que su selección fue a través de un filtro para evitar la presencia de nubes.

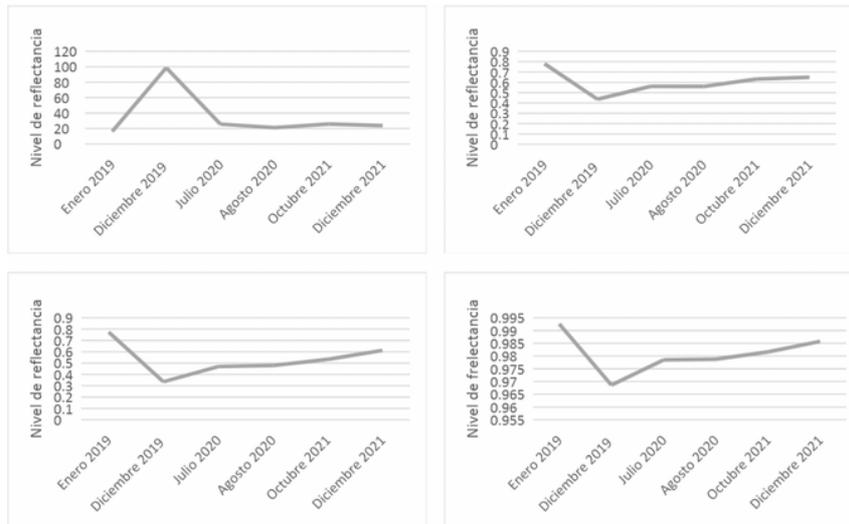


Figura 4. Comportamiento de los valores de los Índices espectrales en imágenes antes y después del incendio. NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada; NBR= Relación de quemado normalizado; NBRt= Relación de quemado normalizado térmico; y BAI= Índice de área de quemado.

Validación de campo

Teóricamente, se esperaba que la recuperación, en las áreas afectadas por el fuego, fuera con el mismo tipo de vegetación o especies que propiciaran una sucesión vegetal hacia selva mediana subperennifolia. Esto debido a que se han reportado para otros ecosistemas rebrotes y germinación de especies y semillas preexistentes después de un incendio forestal, lo que genera recubrimiento del suelo. Esta autosucesión se presenta ya que solo se pierde parte del contenido biológico y se conservan aún ciertas condiciones edáficas en el suelo (Pérez-Cabello *et al.*, 2011). Sin embargo, dentro del polígono afectado por el incendio (en el presente estudio) se aprecia la pérdida del arbolado propio de la selva, aunque el suelo no se encuentra desprovisto de vegetación, el área está cubierta en su mayoría por Tular- *Typha dominguensis* Pers. (Figura 5a) y Helecho - *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn (Figura 5b). No obstante, estas especies se consideran como oportunistas, principalmente por su rápido crecimiento, que aunque no se clasifican como invasoras, ya que si son originarias del lugar, si son capaces de desplazar a la vegetación previa (selva mediana). Esto implica que existe recuperación de biomasa, lo que puede explicar la recuperación de los valores de la vegetación reportada por los índices espectrales. Sin embargo, es importante señalar que, al no recuperarse la vegetación de arbolado inicial, no se está restaurando el ecosistema.

El éxito del establecimiento de estas especies se debe a las adaptaciones que tiene ante el impacto del fuego, en el caso del helecho *Pteridium aquilinum* conocido comúnmente como cilantrillo, tiene rizomas subterráneos que no mueren al ocurrir un incendio forestal, y en pocas semanas vuelve a rebrotar. Más aun, al ocurrir un incendio la cobertura vegetal se quema, abriendo claros en donde la luz favorece su crecimiento. De manera natural la sombra es lo único que inhibe el crecimiento de estos helechos, es por esto que, si la vegetación crece y genera sombra, el helecho deja de crecer. El problema se presenta debido a que además existe una abundancia de helechos, que compiten por recursos, es de más rápido crecimiento que las especies de arbolado. Más aún, debido a que este helecho cumple su ciclo de vida (cada 2 a 3 meses), se seca generando mucho material combustible (Macario, 2011). Lo cual aumenta nuevamente el riesgo de la ocurrencia de incendios forestales, reiniciando el ciclo, impidiendo así que la vegetación arbórea se recupere.

En cierta manera, estas adaptaciones favorecen la recuperación de la biomasa vegetal que contribuye a la captura de carbono y protegen el suelo de la erosión, sin embargo, provocan la traslocación de la sabana a la selva. La única manera de romper este ciclo de invasión es aplicando estrategias de restauración (Cepeda y Amoroso, 2016). Por lo que, es importante identificar zonas que requieran

de atención prioritaria para el establecimiento de estrategias de restauración activa, las cuales propicien el desarrollo de la sucesión para lograr la restauración del ecosistema (Van Andel y Aronson, 2006). Dentro de estas se tienen las plantaciones, y la ubicación de áreas donde solo se apliquen estrategias de restauración pasiva, las cuales solo modifican los factores que limitan la recuperación natural de un ecosistema, como por ejemplo la aplicación de aclareos (Jaksic y Fariña, 2015).

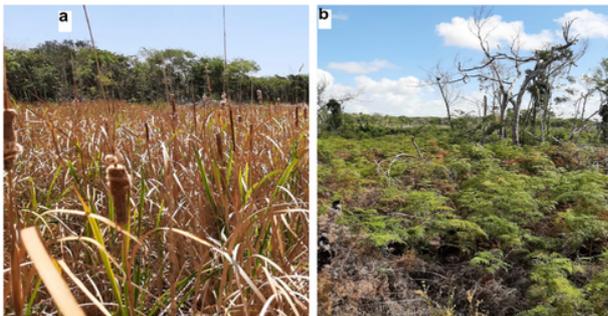


Figura 5. Cobertura del suelo por (a) Tular- *Typha domingensis* y (b) Helecho - *Pteridium aquilinum* en el área afectada por el incendio del 2019 en Muyil Xamach.

Firma espectral

Como los resultados del análisis de las imágenes históricas lo indican, cuando se analiza la respuesta de los ecosistemas después del impacto del fuego se habla de la regeneración de la cubierta vegetal en general, solo considerando el cambio o el incremento de la reflectancia de los valores de los índices espectrales (Tonbul *et al.*, 2016) pero no se analiza en específico como se está comportando esta vegetación. Debido a esto, se generaron las firmas espectrales de las diferentes coberturas de vegetación, para lo cual se consideró el nivel de reflectancia de la vegetación en la imagen más reciente (diciembre 2021). De esta forma, se ubicaron: a) áreas de vegetación densa, fuera del polígono incendiado (punto 1, Figura 6b); b) áreas de densidad media, dentro del polígono incendiado (punto 2, Figura 6b); c) áreas de densidad baja donde se presentan algunas herbáceas (punto 3, Figura 6b); y e) áreas de densidad muy baja donde no se aprecia vegetación (punto 4, Figura 6b).

La firma espectral de la vegetación de densidad media y la densidad baja son exactamente iguales, por lo que solo se pueden apreciar tres firmas espectrales que, aunque son muy similares entre si

se puede identificar una ligera diferencia en la banda 5 (Infrarrojo cercano NIR), la banda 6 (Infrarrojo de onda corta SWIR1) y la banda 7 (Infrarrojo de onda corta SWIR2).

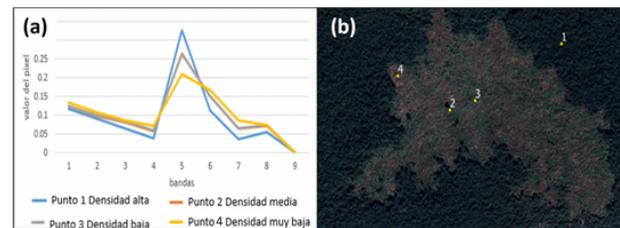


Figura 6. Firma espectral de densidad de cobertura vegetal en el área incendiada en el 2019 en el Muyil Xamach.

Una vez que se han identificado las bandas en donde la densidad de la vegetación presenta mayor diferencia, se definió un algoritmo (bandas 5, 6 y 7) con el que se aprecia una diferencia muy marcada de densidad alta (fuera del polígono donde ocurrió el incendio), y una densidad más baja dentro del polígono afectado. Estudios similares reportan que la banda de infrarrojo de onda corta (SWIR) ha mostrado ser lo suficientemente sensible para detectar características del arbolado, en ecosistemas de coníferas (Sankeya *et al.*, 2013). Sin embargo, para ecosistemas de selva falta continuar con los estudios para definir los alcances que puede tener esta tecnología en cuanto a la detención de la vegetación y sus características. No obstante, la combinación de bandas usadas en este trabajo se pueden seleccionar áreas donde la densidad de la vegetación es menor, las cuales son áreas prioritarias de atención: Donde es conveniente aplicar estrategias de restauración activa, para inducir la cobertura del suelo con especies de arbolado y de esta manera impulsar el restablecimiento de la vegetación de selva (Figura 7). Así mismo se pueden identificar áreas de atención media donde existe cobertura de vegetación, en estas áreas se pueden aplicar estrategias de restauración pasiva y solamente eliminar los factores que están limitando el establecimiento de especies de selva.

En futuros trabajos se puede evaluar la regeneración haciendo uso de algunos otros índices que han tenido éxito en otros tipos de vegetación y que contemplan mayor número de variables, como es el índice de resiliencia de la vegetación después del fuego (VRAF), el cual se ha probado en ecosistemas italianos. Donde se resalta que este índice se basa en

la asociación de los incendios con la vegetación, el tipo de suelo, la geología, la pendiente y la exposición (Bisson *et al.*, 2008), con base a lo cual se analizan variables que pueden influir en la regeneración específicamente de especies de arbolado. No obstante, los resultados del presente trabajo muestran un panorama general de las condiciones primeramente del daño que causó el incendio en la vegetación y, posteriormente, filtrando la imagen al identificar la densidad de la vegetación, se ubicaron y dimensionaron las áreas prioritarias de atención donde se requiere aplicar técnicas de restauración asistida. Donde se debe acelerar los procesos de establecimiento de especies arbóreas y promover la recuperación de la selva. Más aun, con el procesamiento de imágenes satelitales temporales y la aplicación de índices espectrales, es posible dar seguimiento a la respuesta de los ecosistemas y monitorear las áreas en las cuales: 1) se dejó que el ecosistema se regenerara por sí solo después del incendio; y 2) áreas en donde se aplicaron algunas medidas de manejo posterior al incendio. De esta forma, se podrá determinar la eficacia de las estrategias establecidas, en su caso, determinar acciones correctivas.

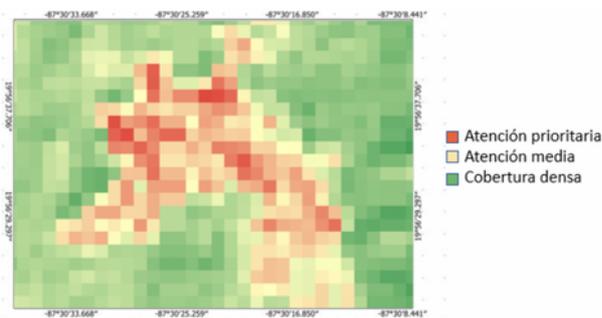


Figura 7. Densidad de la vegetación aplicada para diciembre 2021 en el área del incendio Muyil Xamach en el 2019.

Conclusiones

El índice d NBR muestra resultados congruentes en cuanto a la severidad del incendio, y lo ocurrido en campo. Lo que genera una buena estimación de la severidad del incendio a falta de análisis detallados en campo inmediatamente después del incendio.

Los índices (NDVI, BAI, NBR y NBRT), aplicados a las imágenes temporales muestran resultados similares, en donde los valores previos al incendio muestran alta cobertura vegetal, la cual

disminuye inmediatamente después del incendio y se va restableciendo poco a poco con el paso del tiempo.

No obstante, los valores no llegan a recuperarse por completo a como se presentaban antes del paso del fuego. Esto indica que, si existe una recuperación de biomasa vegetal, sin embargo, la recuperación es de especies que debido a sus adaptaciones al fuego se establecen con éxito compitiendo y limitando la regeneración del arbolado correspondiente a la selva. Esto afirma la necesidad de completar los estudios realizados mediante sensores remotos, con evaluaciones directas en campo que validen y expliquen lo representado en las imágenes.

Finalmente, con la obtención de la firma espectral de la densidad de la vegetación es posible detectar áreas de atención prioritaria donde la densidad de la vegetación es muy baja, y se requiere de la implementación de acciones de restauración activa y así dirigir los planes de manejo.

Literatura citada

- Bisson, M., A. Fornaciai, A. Coli, F. Mazzarini y M.T. Pareschi. (2008). The vegetation resilience after fire (VRAF) index: Development, implementation and an illustration from central Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 10:312–329. DOI:10.1016/j.jag.2007.12.003
- Briones H., C. I., D. J. Vega, N. A. Monjarás, J. Briseño, P. M. López, J. J. Corral, E. Alvarado, S. Arellano, J. G. Álvarez, A. D. Ruiz, W. M. Jolly y S. A. Parks. (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*. <https://doi.org/10.3390/rs12122061>
- Cepeda, C. y A. Amoroso. (2016). Experiencias de desarrollo sustentable y conservación en la Península de Yucatán. *The Nature Conservancy*. Ciudad de México, México. 159 pp.
- Chen, Y., M.J. Lara y F.S. Hu. (2020). A robust visible near-infrared index for fire severity mapping in Arctic tundra ecosystems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 159: 101-113 DOI:10.1016/j.isprsjprs.2019.11.012
- Clewell, A., J. Rieger y J. Munro. (2005). Guidelines for developing and managing ecological restoration projects. 2a ed. *Society for Ecological Restoration*. Disponible en: https://www.ctahr.hawaii.edu/littonc/PDFs/682_SERGuidelines.pdf
- CONANP. (2021). Plan de acción para la restauración del Complejo Sian Ka'an: Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil y Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Selva Maya, KFW, UICN, Amigos de Sian Ka'an y Complejo Sian Ka'an. Producto 7 del proyecto: *Protección de Recursos Naturales Selva Maya*. 48 p.
- De Santis, A., Chuvieco, E., (2009). GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 113: 554–562. DOI:10.1016/j.rse.2008.10.011
- Gitas, I., G. Mitri, S. Veraverbeke y A. Polychronaki. (2012). Advances in Remote Sensing of Post-fire Vegetation Recovery Monitoring-a Review. In Moisan, T., S. Sathyendranath, and H. Bouman (Eds.) *Remote Sensing of Biomass-Principles and Applications*. (Open Access Publisher) Intech. DOI:10.5772/20571.
- Goetz, S. J., G. J. Fiske y A. G. Bunn (2006). Using satellite time-series data sets to analyze fire disturbance and forest recovery across Canada. *Remote Sensing of Environment* 101: 352–365 doi:10.1016/j.rse.2006.01.011
- González, M.A., L. Schwendenmann, J. Jiménez y R. Schulz. (2008). Forest structure and woody plant species composition along a fire chronosequence in mixed pine-oak forest in the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico. *Forest Ecology and Management*. 256:161-167. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.04.021
- Jaksic, F. M. y J. M. Fariña. (2015). Incendios, sucesión y restauración ecológica en contexto. *Anales Instituto Patagonia* (Chile), 43, DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2015000100003>
- López G., A. R. (2020). Estudio de la severidad del incendio de 2012 y regeneración de la vegetación del Bosque La Primavera, México, mediante imágenes LANDSAT 7. *Revista Cartográfica*. 101:35-50. DOI: 10.35424/rcarto.i101.420
- Macario M., P. A. (2011). Restauración de áreas invadidas por el helecho *Pteridium aquilinum* en el sur de Quintana Roo. Presentada en: 4^o *World conference on ecological restoration*.
- Mercan, S. y M.S. Alam. (2011). Anomaly detection in hyperspectral imagery using Stable Distribution. *Proceedings Volume 8049, Automatic Target Recognition XXI*; 80490V DOI: 10.1117/12.884913
- Montorio Ll., R., C. Pérez, F. García, A. Vlassova, L. y J. R. de la Riva. (2014). La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. En: Arnáez, J., González-Sampériz, P., Lasanta, T. y Valero-Garcés, B. L. (Editores). *Geología, cambio ambiental y paisaje*. La Rioja España, 427- 440. ISBN: 978-84-617-3212-8 978-84-96487-83-3.

- Neris, J., J.C. Santamarta, S.H. Doerr, F. Prieto, P.J. Aguallo y V. P. García. (2016). Post-fire soil hydrology, water erosion and restoration strategies in Andosols: a review of evidence from the Canary Islands (Spain). *Forest*. 9:583-59210. DOI: 10.3832/for1605-008 [online 2016-03-17].
- Pausas, J. y R. Vallejo. (2008). Bases ecológicas para convivir con los incendios forestales en la Región mediterránea: decálogo. *Ecosistemas*. 17 (2): 128-129.
- Parks, S.A, L.M. Holsinger, M.A. Voss, R. Loehman y N.P. Robinson. (2018). Mean composite fire severity metrics computed with Google Earth Engine offer improved accuracy and expanded mapping potential. *Remote Sensing*. 10(879).
- Pérez-Cabello, F., M. Echeverría, J. de la Riva y P. Ibarra (2011). Apuntes sobre los efectos de los incendios forestales y restauración ambiental de áreas quemadas. Estado de la cuestión y principios generales. *Geographicalia* 59-60, 295-308 DOI: 10.26754/ojs_geoph/geoph.201159-60839
- QGIS.org. (2021). Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Röder, A., J. Hill, B. Duguay, J. Alloza, y R. Vallejo. (2008). Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain). *Remote Sensing of Environment*. 112(1):259-273. DOI:10.1016/j.rse.2007.05.001
- Sankeya, J.B., C.S.A. Wallace, y S. Ravi. (2013). Phenology-based, remote sensing of post-burn disturbance windows in rangelands. *Ecological Indicators*. 30:35-4 DOI:10.1016/j.ecolind.2013.02.004
- Tran, B.N., M.A. Tanase, M.A., Bemmett y C. Aponte. (2018). Evaluation of Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Australian Temperate Forests. *Remote sensing*. 10(1680). DOI:10.3390/rs1011168
- Tonbul, H., T. Kavzoglu y S. Kaya. (2016). Assessment of fire severity and post-fire regeneration based on topographical features using multitemporal Landsat imagery: a case study in Mersin, Turkey. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8, 763- 769. DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B8-763-2016
- Van Leeuwen, W.J.D., G.M. Casady, D.G. Neary, S. Bautista, J.A. Alloza, Y. Carmel, L. Wittenberg y B.J. Orr. (2010). Monitoring post-wildfire vegetation response with remotely sensed time-series data in Spain, USA and Israel. *International Journal of Wildland Fire*. 19:75-93. DOI: 10.1071/WF08078
- Van Andel, J. y L., Aronson. (2006). Restoration Ecology. Blackwell Publishing, UK. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/278321008> Restoration Ecology The New Frontier 2nd ed.
- Viana-Soto, A., I. Aguado y S. Martínez. (2017). Assessment of Post-Fire Vegetation Recover Using Fire Severity and Geographical Data in the Mediterranean region (Spain). *Environments*. 4(90). DOI:10.3390/environments4040090
- Zahawi, R.A., K. D. Holl, R. J. Cole y J. L. Reid. (2013). Testing applied nucleation as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *Journal of Applied Ecology*. 50(1):88-96.