Revista Cartográfica 112 | 2026 | Artículos 7-25
ISSN (impresa) 0080-2085 | ISSN (en línea) 2663-3981
DOI: https://doi.org/10.35424/rcarto.i112.5988
Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0

Desarrollo de una plataforma espacialmente explícita para el análisis de la vegetación y la frecuencia y periodo de retorno de incendios forestales en el Área Natural Protegida Bosque La Primavera, Jalisco

Development of a spatially explicit platform for the analysis of vegetation and the frequency and return period of forest fires in the Bosque La Primavera Protected Natural Area, Jalisco

Hugo de Alba Martínez[1]
David Koch[2]

Recibido 25 de mayo de 2025; aceptado 28 de julio de 2025

Resumen

Este artículo presenta la metodología para el desarrollo de la Plataforma Integral de Análisis de Vegetación e Incendios en La Primavera (PIAVIP), una herramienta que permite analizar tendencias históricas de la cobertura vegetal del Área de Protección a la Flora y a la Fauna La Primavera, Jalisco, México. PIAVIP se desarrolló en el entorno de *Earth Engine Apps* de Google y utiliza el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para identificar cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo y generar gráficas históricas descargables, ya sea para toda el área protegida o lugares definidos por el usuario. Adicionalmente, la plataforma genera mapas de frecuencia de incendios forestales y sus periodos de retorno. Para evaluar la funcionalidad de PIAVIP se llevaron a cabo análisis a dos escalas espaciales distintas. En primer lugar, se analizaron imágenes satelitales del final de la temporada de estiaje en años con incendios forestales significativos en el área protegida, reportados en la literatura y fuentes hemerográficas. En todos los casos, PIAVIP logró obtener imágenes que reflejan dichos incendios.

[1] Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, México, correo electrónico: hdealba@iteso.mx. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8612-6047

[2] Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, México, correo electrónico: david.koch@iteso.mx. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9116-6744

Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre dos sitios específicos del Bosque La Primavera, para los cuales se obtuvo el total de eventos de incendio y se calcularon los periodos de retorno correspondientes, los resultados fueron consistentes con los mapas generados por PIAVIP. La prueba t de Student arrojó que existen diferencias significativas en las series de NDVI históricas entre los dos sitios, indicando patrones espaciotemporales distintos en cada sitio.

Palabras clave: *Bosque La Primavera, Teledetección, Incendios Forestales, Google Earth Engine.*

Abstract

This study presents the methodology for the development of the Platform for Vegetation and Fire Analysis in La Primavera (PIAVIP), a tool which enables the analysis of historical trends in vegetation cover within the La Primavera Flora and Fauna Protection Area, Jalisco, Mexico. PIAVIP was developed in the Google Earth Engine Apps environment and utilizes the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to identify changes in vegetation cover over time and to generate downloadable historical graphs for either the entire protected area or user-defined locations. Similarly, the platform generates maps depicting fire frequency and their return periods. To evaluate the functionality of PIAVIP, analyses were conducted at two different spatial scales. Initially, satellite images from the end of the dry season in years with significant forest fires in the protected area, as reported in the literature and hemerographic sources, were analyzed. In all instances, PIAVIP successfully retrieved images of the fires. Subsequently, a comparative analysis was conducted at two specific sites in the La Primavera Forest, where fire events were identified and return periods calculated. The results were consistent with the maps generated by PIAVIP. The Student's t-test revealed significant differences in the historical NDVI series between the two sites, indicating different spatiotemporal patterns at each location.

Key words: *Bosque La Primavera, Remote Sensing, Wildfires, Google Earth Engine.*

1. Introducción

El Bosque La Primavera (BLP) es un Área Natural Protegida de 30,500 hectáreas contigua a la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), ver Figura 1, la cual provee numerosos servicios ecosistémicos a sus habitantes. Entre los documentados se encuentran servicios recreativos y culturales (Álvarez-Contreras, 2016; Balderas-Torres & De Alba-Martinez, 2015), mitigación al cambio climático (Balderas-Torres *et al.*, 2015) y de regulación de inundaciones (De Alba-Martinez, 2019). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los tipos de vegetación predominantes son bosque tropical caducifolio, bosque de encino (*Quercus*), bosque de encino-pino (*Quercus-Pinus*), bosque de pino (*Pinus*), comunidades ripiaras, rupícolas y ruderales (INEGI, 2017). El BLP que cuenta con un listado de flora de más de 1 000 especies y de

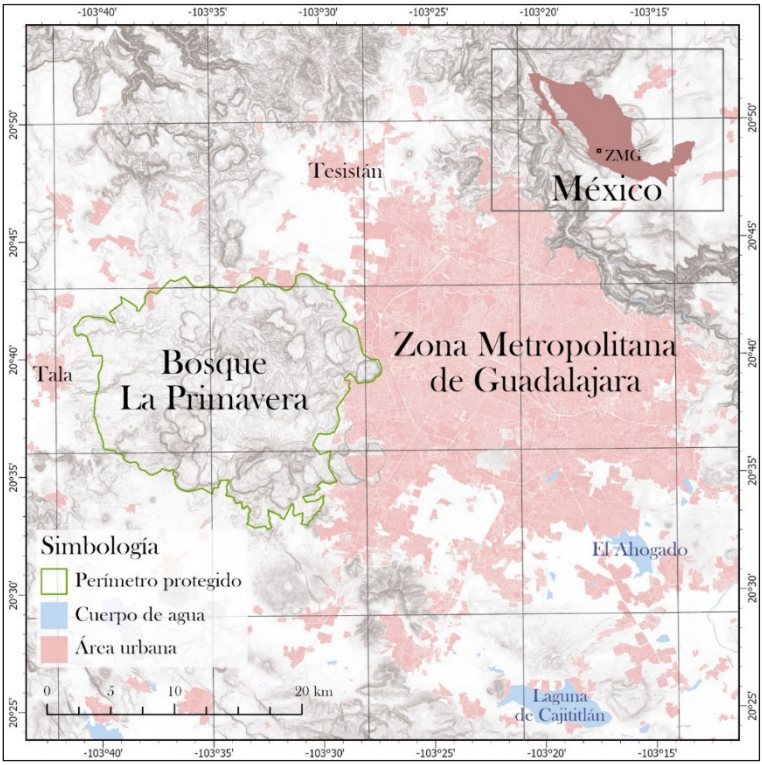

Figura 1. Localización del Bosque La Primavera.
Fuentes: INEGI (2020) y CONANP (2017).

cerca de 350 especies de vertebrados (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2000).

El BLP ha sido objeto de diversas declaratorias territoriales a lo largo del tiempo. En el año 1980, se estableció a La Primavera como una Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre (Diario Oficial de la Federación [DOF], 1980). Posteriormente, en el año 2000, se le designó como Área de Protección de Flora y Fauna "La Primavera" (CONANP, 2000). En 2011, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) decretó al BLP como Reserva de la Biósfera (UNESCO, 2011). A pesar de que estas declaratorias reflejan el valor y la importancia que se le ha atribuido al BLP, en términos de biodiversidad y servicios ecosistémicos, estas medidas no han sido eficientes ante las diversas amenazas que comprometen la integridad del ecosistema. Entre las más preocupantes, se encuentran los incendios forestales de alta severidad, debido a que causan grandes daños al ecosistema, a la salud humana y a la propiedad, y ponen en peligro la vida. Por ejemplo, las emisiones de humo y gases de los incendios forestales en el BLP empeoran la calidad del aire en la ZMG y contribuyen al cambio climático. La

pérdida de cobertura vegetal aumenta el riesgo de inundaciones y arrastre de sedimentos a los centros de población aguas abajo del BLP.

Huerta-Martínez & Ibarra-Montoya (2014) reportaron que la tasa de incendios del BLP para el periodo 1998-2012 fue del 1.13%, por encima de la media nacional, siendo las prácticas de quema de cultivo de caña de azúcar de zonas aledañas y que se propagan al BLP el principal factor de incidencia de los incendios. De acuerdo con Jardel-Peláez (2020), se registraron 1,582 incendios en el BLP y sus áreas cercanas entre 2001 y 2019. De éstos, 52% afectó superficies pequeñas (menores a 2.5 ha), mientras que el 44% afectó entre 2.5 y 50 ha, y solo 4% superó las 50 ha. Sin embargo, solo seis incendios que abarcaron más de 800 ha fueron responsables del 63% del área total quemada durante este periodo.

La gran la mayoría de los incendios que ocurren en el BLP son durante los meses de marzo, abril y mayo cuando las condiciones ambientales son cálidas y secas (ver Figura 2). Los efectos de los incendios forestales en los ecosistemas son variables dependiendo de la severidad del fuego y la superficie alcanzada (Flores Rodríguez *et al.*, 2021). La topografía, el tiempo meteorológico y el combustible acumulado (hojarasca, pastos secos) juegan un papel fundamental en la ocurrencia y propagación de grandes incendios (Jardel-Peláez, 2020).

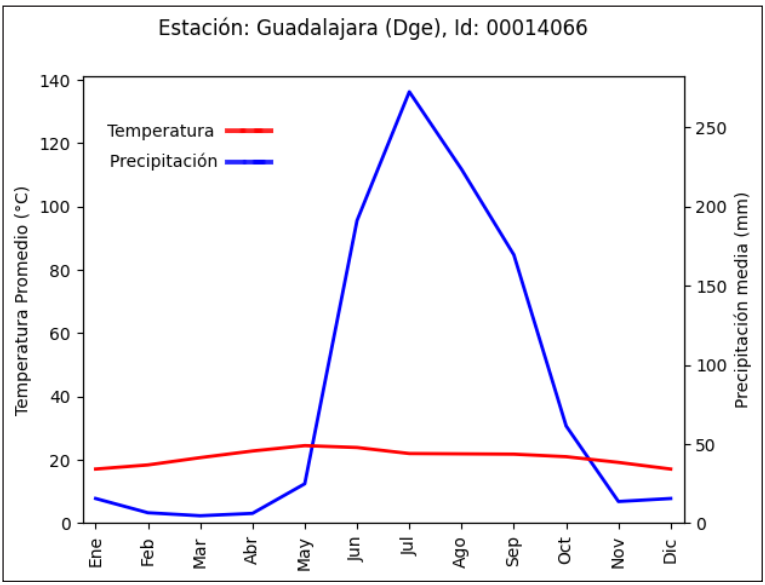

Figura 2. Diagrama ombrotérmico de la Estación Guadalajara, elaborado con datos del Servicio Meteorológico Nacional del periodo 1951-2010 (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2010).

La evaluación de los incendios forestales en campo puede suponer una inversión de recursos significativa, dependiendo de la amplitud o inaccesibilidad

en el terreno (Flores Rodríguez e*t al.*, 2021). Sin embargo, éstos se pueden monitorear y analizar de manera eficiente mediante el uso de imágenes de sensores satelitales, en combinación con el análisis espacial proporcionado por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Sunar & Özkan, 2001).

Desde el lanzamiento del programa Landsat, en 1972, han existido diferentes misiones espaciales que han colectado datos de la Tierra a través de sensores montados en satélites para distintas aplicaciones. A la fecha, el acervo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) cuenta con más de 8 millones de imágenes de la misión Landsat (Rocchio *et al.*, 2018). Esta gran cantidad de datos acumulados a lo largo de décadas puede ser utilizada como insumo por científicos y desarrolladores para aplicar técnicas avanzadas de análisis espacial orientadas a detectar cambios, cartografiar tendencias y medir diversos procesos en la superficie terrestre (Mas, 2022).

Los investigadores requieren un marco geoespacial que sea eficiente y con algoritmos avanzados para obtener resultados inmediatos de grandes conjuntos de datos (Ghosh *et al.*, 2022). *Google Earth Engine* (GEE) surgió de la necesidad de aprovechar ese gran volumen de datos, al ofrecer una herramienta que pueda manejar eficientemente dicha información, permitiendo que los usuarios se enfoquen en la generación de resultados y nuevos desarrollos científicos (Solórzano Villegas & Perilla Suárez, 2022). Para lograr esto, la plataforma GEE brinda acceso a (1) petabytes de imágenes de teledetección y otros productos listos para usar con una aplicación web; (2) procesamiento paralelo de alta velocidad y algoritmos de aprendizaje automático utilizando la infraestructura computacional de *Google*, y; (3) una biblioteca de interfaces de programación de aplicaciones (API) con entornos de desarrollo que admiten lenguajes de programación populares como *JavaScript* y *Python* (Tamiminia *et al.*, 2020). Sin embargo, crear prototipos y algoritmos en GEE implica el costo de aprender *JavaScript* y sus APIs, que puede resultar en un trabajo que consume mucho tiempo, especialmente para quienes no tienen una fuerte base técnica. Para abordar este problema, GEE proporciona una biblioteca de clientes JavaScript/*Python* que permite desarrollar aplicaciones a través de *Earth Engine Apps* para realizar análisis puntuales y herramientas listas para usarse para usuarios no expertos (Zhang *et al.*, 2020).

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar una aplicación en GEE, denominada Plataforma Integral de Análisis de Vegetación e Incendios en La Primavera (PIAVIP), una herramienta accesible, técnicamente robusta y útil para el análisis de dinámicas espaciotemporales en el Bosque La Primavera, orientada a evaluar la cobertura vegetal e identificar patrones asociados a incendios forestales. Para ello, se integraron diversos conjuntos de datos espaciales, algoritmos y capacidades de cómputo de GEE para calcular y realizar mapas del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), total de eventos de incendio y sus periodos de retorno dentro del BLP. PIAVIP permite generar gráficas históricas del NDVI descargables, ya sea para toda el área protegida o para sitios definidos por el usuario.

2. Metodología

Mediante *Earth Engine Apps*[1] se desarrolló PIAVIP (https://geoiteso.users.earthengine.app/view/piavip), una herramienta que permite la visualización de imágenes Landsat, tanto históricas como recientes. Permite calcular el NDVI para periodos de tiempo determinados por el usuario, dentro del polígono protegido del BLP. Adicionalmente, esta plataforma se ofrece un análisis de frecuencia y periodo de retorno de incendios forestales aplicado a cada píxel de las imágenes. El proceso de desarrollo de PIAVIP incluyó tres elementos: 1) Construcción de las colecciones de las imágenes, 2) Procesamiento de los datos, y; 3) Interfaz de usuario, mostradas en la Figura 3 y descritas a continuación.

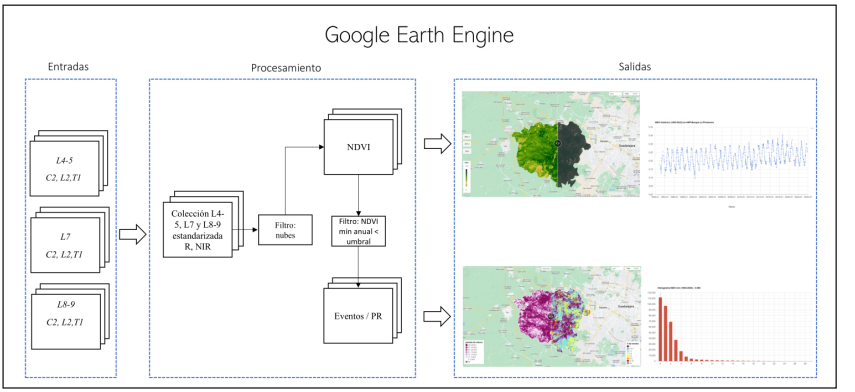

Figura 3. Diagrama general del flujo de trabajo.

2.1. Construcción de las colecciones de imágenes

Los sensores a bordo de cada uno de los satélites Landsat fueron diseñados para adquirir datos en diferentes rangos de longitudes de onda a lo largo del espectro electromagnético. El Multispectral Scanner (MSS) utilizado en Landsat 1, 2, 3, 4 y 5 colectó datos en cuatro bandas, mientras que el sensor Thematic Mapper (TM) en Landsat 4 y Landsat 5 incluyó las bandas del MSS y añadió una banda térmica y una de infrarrojo de onda corta. En Landsat 7 se incorporó una banda pancromática al sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+). En cambio, Landsat 8 utiliza dos sensores diferentes, el *Operational Land Imager* (OLI) y el *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), para adquirir datos en 11 bandas, los instrumentos en Landsat 9 son copias mejoradas de los sensores de Landsat 8 (USGS, s/f), ver Figura 4.

A partir de las colecciones de imágenes Landsat del USGS Collection 2, Level 2, Tier 1, que contienen la reflectancia superficial corregida atmosféricamente

[1] https://developers.google.com/earth-engine/guides/apps

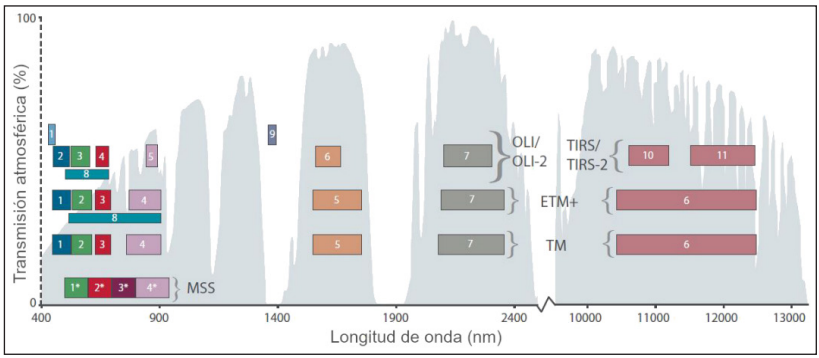

Figura 4. Intervalos de las bandas espectrales para los sensores en los satélites Landsat. Modificada de USGS (2017).

y la temperatura de la superficie terrestre, derivadas de los datos obtenidos por los sensores TM, ETM+ y OLI, a un tamaño de píxel correspondiente a 30 m. Debido a la diferencia en el número de las bandas entre los sensores Landsat 4-5 (TM), Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8-9 (OLI & TIRS), se creó una nueva colección histórica estandarizada donde las bandas correspondientes al Rojo e Infrarrojo Cercano se renombraron como R y NIR, respectivamente (véase Tabla 1). Esta colección se sometió a un filtro que enmascara los píxeles clasificados como nubes o sombras de nubes, utilizando la banda de calidad (QA) de las colecciones de EE.

Tabla 1. Bandas utilizadas en la colección histórica estandarizada

Landsat 4-5 (TM)		*Landsat 7 (ETM+)*		*Landsat 8-9 (OLI & TIRS)*	
Bandas	Longitud de onda (µm)	Bandas	Longitud de onda (µm)	Bandas	Longitud de onda (µm)
Banda 3 - Rojo (R)	0.63-0.69	Banda 3 – Rojo (R)	0.63-0.69	Banda 4 – Rojo (R)	0.64-0.67
Banda 4 – Infra-rrojo cercano (NIR)	0.76-0.90	Banda 4 - Infra-rrojo cercano (NIR)	0.77-0.90	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85-0.88

2.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un indicador que se utiliza para evaluar la presencia y salud de la vegetación de un área de estudio, bajo el principio de que la porción del infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético es altamente reflejada por la vegetación fotosintética, mientras que la porción del rojo (R) es absorbida. Por el contrario, la vegetación

poco saludable refleja menos NIR y más R. El NDVI (Ecuación 1) se calcula como la diferencia entre la reflectancia en el NIR y la reflectancia en el R, dividida por la suma de ambas, resultando valores que van de -1 a 1.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Para cada una de las imágenes de la colección histórica estandarizada, se calculó el NDVI y se agregó como una banda más a dicha colección.

2.3. Cálculo de la frecuencia y periodo de retorno

La frecuencia (F) se refiere a la periodicidad del evento, mientras que el periodo de retorno (PR) determina cada cuánto tiempo ocurre (Rodríguez Trejo, 2014). Para el cálculo de estos indicadores se utilizan las definiciones propuestas por White & Pickett (1985).

La Ecuación 2, define F como el número de eventos en un periodo de tiempo:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i}{n} \quad (2)$$

Donde p es igual a cero si no ha ocurrido ningún evento o igual a uno si hubo algún evento de incendio en el año (i) y n es el número de años en el periodo de tiempo estudiado. El periodo de retorno, PR (Ecuación 3), que corresponde al inverso de la frecuencia, representa el tiempo promedio en años que debe transcurrir para que ocurra nuevamente un incendio en el mismo sitio.

$$PR = \frac{1}{F} \quad (3)$$

Se creó una nueva colección utilizando los valores mínimos de NDVI de cada año y para cada píxel a partir de la colección estandarizada. Se estableció empíricamente, tras explorar series históricas de sitios con incendios documentados, que valores de NDVI inferiores a 0.070 reflejan consistentemente pérdidas abruptas de vegetación asociadas a incendios. Se asumió que no puede ocurrir más de un incendio por año en un mismo sitio, dado que la regeneración del combustible vegetal requiere varios meses y al menos una temporada de lluvias. A partir de esta colección se generaron las imágenes de F y PR, tomando 1993 como año base (i), puesto que las series de años previos presentan muchas lagunas de datos.

2.4. Interfaz del usuario

La interfaz del usuario de PIAVIP consta de dos componentes principales (Figura 5). El primero es una vista de mapa donde se despliegan imágenes y otros datos geoespaciales. En esta vista, se encuentra una barra deslizante para mostrar dos imágenes de manera contigua. El mapa base de fondo puede cambiarse por los predeterminados de Google (mapa o satélite), las capas pueden prenderse y apagarse. El segundo componente es un panel donde el usuario elige el tipo

de mapa. Los tipos de mapas que se pueden elegir son “NDVI” o “Periodo de retorno/Eventos”. Dependiendo del tipo de mapa elegido, las funcionalidades de la vista de mapa y herramientas varían (Tabla 2).

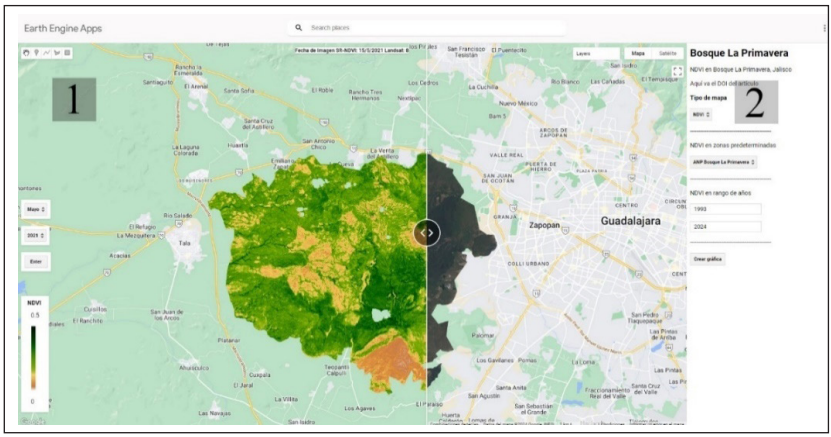

Figura 5. Los dos componentes principales de la interfaz de usuario.

En el tipo de mapa “NDVI”, la parte izquierda de la vista de mapa permite visualizar el NDVI de un mes y año definidos por el usuario. El rango se limitó de 0 a 0.5 debido a que dentro del polígono protegido no se rebaza dicho umbral. La parte derecha es una imagen de la misma fecha en “color real”. El panel está diseñado para calcular estadísticas zonales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en todo el polígono protegido, siendo esta la opción predeterminada. También permite al usuario seleccionar una zona específica para el análisis, cuya geometría puede ser un punto, una línea o un polígono. Además, el panel permite la generación de gráficas correspondientes, las cuales se pueden descargar en los formatos de valores separados por comas (csv), gráficos vectoriales escalables (svg) y gráficos de red portátiles (png).

Para el caso del tipo de mapa “Periodo de retorno/Eventos” el panel izquierdo muestra, para cada píxel de la imagen, el periodo de retorno de eventos anuales con un NDVI menor a 0.070. Estos eventos se clasificaron en intervalos quinquenales, con excepción de la primera clase que abarca periodos de dos a cinco años. Se marcan como “NA” aquellos lugares donde el periodo de retorno es de un año, posiblemente debido a prácticas agrícolas dentro del bosque o laderas con pendientes muy escarpadas. En la parte derecha, se muestra el número absoluto de eventos, distribuidos en intervalos exponenciales. Se eligió este tipo de clasificación debido a que los datos que se están representando en el mapa están altamente sesgados, con un pequeño número de valores muy altos y un gran número de valores considerablemente bajos. Además, el panel de funciones se ofrece la posibilidad de ajustar el valor mínimo del umbral del NDVI. Cada vez que se cambia el umbral, la imagen correspondiente se acumula como una capa en la vista de mapa, permitiendo al usuario comparar

los resultados de distintos umbrales. También despliega un histograma que muestra la cantidad total de píxeles por número total de eventos. Este histograma se puede descargar en los formatos csv, svg y png.

Tabla 2. Funcionalidad de la plataforma por tipo de mapa

Tipo de Mapa	*División de la vista de mapa*	*Zona de análisis*	*Temporalidad*	*Funcionalidad*
NDVI	NDVI / imagen en color real	Polígono protegido / zona delimitada por el usuario	Mensual elegida por el usuario	Gráfico histórico
Periodo de retorno / Eventos	PR / Total de eventos	Polígono protegido	a partir de 1993	Umbral modificable / Histograma

3. Estudios de caso y discusión

Para evaluar la funcionalidad de PIAVIP, se llevaron a cabo diversos análisis a dos escalas espaciales distintas. En primer lugar, se obtuvieron las imágenes al final de la temporada de estiaje en los años donde ocurrieron incendios forestales importantes en el polígono protegido, documentados en la literatura y en fuentes hemerográficas (ver Tabla 3 y Figura 6). Se contrastaron las imágenes obtenidas para 2019 y 2021 con los polígonos de incendios reportados por la Comisión Nacional Forestal CONAFOR (2025).Posteriormente, se generó la gráfica histórica de NDVI promedio para todo el polígono protegido del BLP (Figura 7).

Tabla 3. Años analizados e imágenes de estiaje en años con incendios forestales documentados

Año	*Fecha de la imagen*	*Fuente*
1995	09/06/1995	Según Rodolfo Chávez Ortega (comunicación personal, 2022)
1998	01/06/1998	Huerta-Martínez & Ibarra-Montoya (2014)
2000	21/5/2000	Huerta-Martínez & Ibarra-Montoya (2014)
2005	11/05/2005	Huerta-Martínez & Ibarra-Montoya (2014)
2008	04/06/2008	Huerta-Martínez & Ibarra-Montoya (2014)
2012	14/05/2012	Huerta-Martínez & Ibarra-Montoya (2014)
2019	10/05/2019	Notimex (2019)
2021	15/05/2021	Partida (2021)

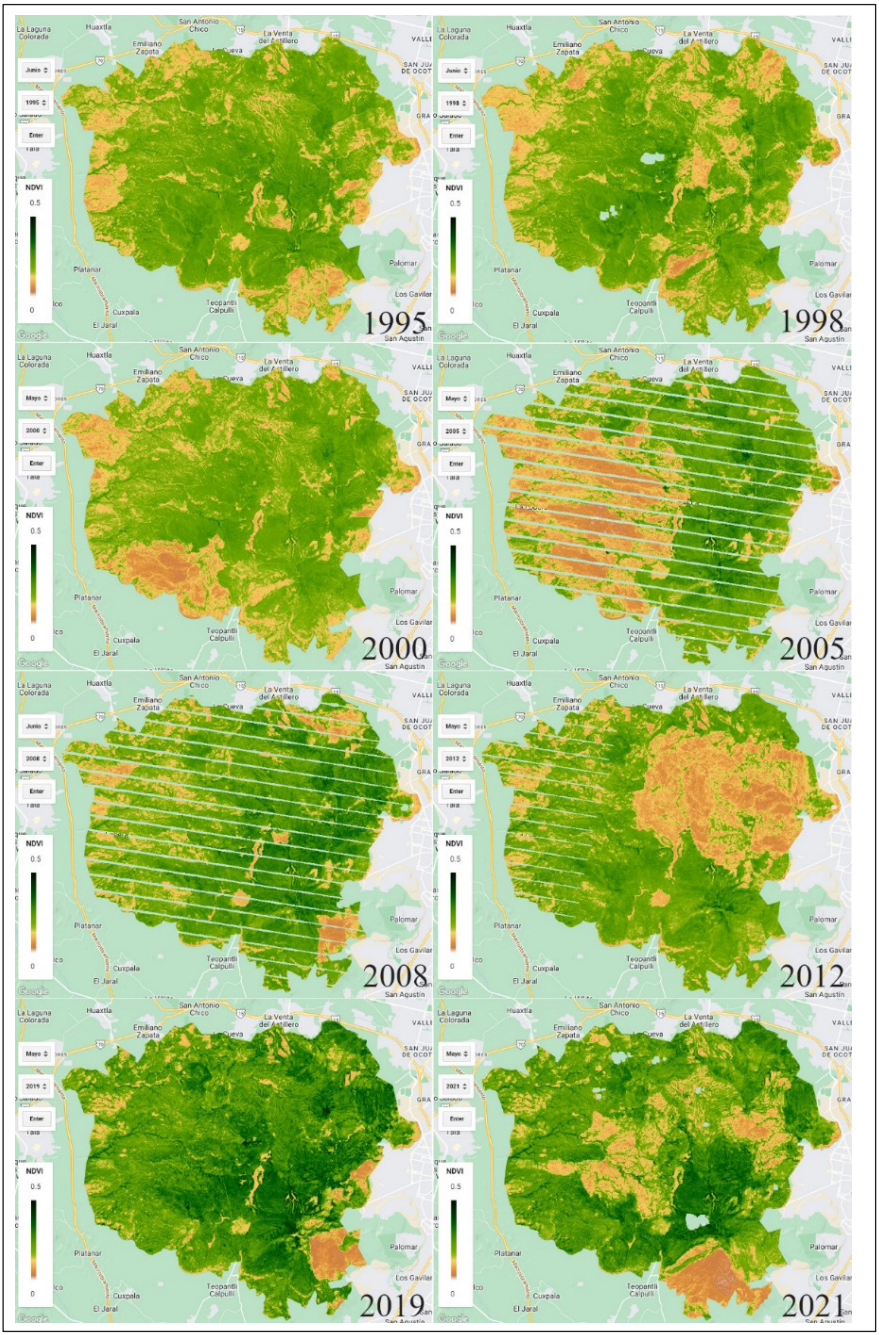

Figura 6. Imágenes en el final de la temporada de estiaje en obtenidas por PIAVIP para los incendios de la Tabla 3.

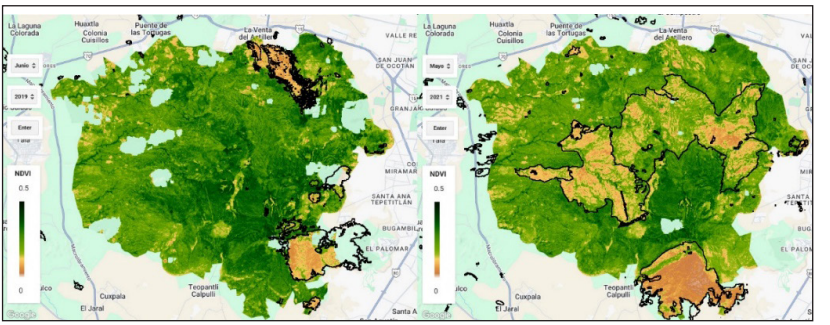

Figura 7. Conjunto de datos de incendios forestales de 2019 (der.) y 2021 (izq.) de la CONAFOR sobrepuestos en la plataforma PIAVIP, del ANP Bosque La Primavera.

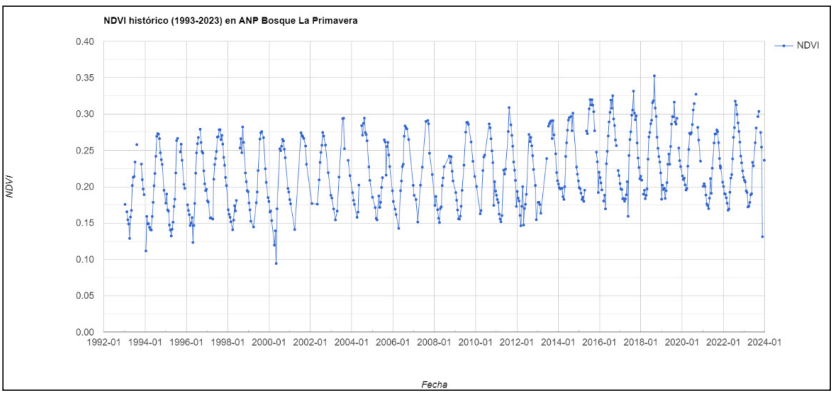

Figura 8. Gráfico del NDVI promedio histórico para todo el polígono protegido del BLP del periodo 1993-2023.

Si bien la Figura 6 ilustra la capacidad de la plataforma para obtener las imágenes que contienen de los incendios históricos de la Tabla 3, se debe ejercer criterio dado que no todos los valores bajos de NDVI representan necesariamente la ocurrencia de un incendio. Esto se ejemplifica en la Figura 7 que contrasta los polígonos de incendios forestales de los años 2019 y 2021 reportados por la CONAFOR (2025) y los resultados de NDVI de PIAVIP para el polígono protegido. La gráfica del NDVI promedio histórico de todo el polígono protegido (Figura 8) muestra claramente la estacionalidad climática, siendo los valores altos de NDVI aquellos que ocurren durante la temporada de lluvias, mientras que los bajos reflejan los periodos de estiaje.

Posteriormente, se analizaron los patrones temporales de incendios forestales en dos sitios en la zona suroriente del BLP (Figura 10). Para cada sitio se creó un polígono de 3.22 ha (aprox. 6X6 pixeles), a través de la plataforma se obtuvieron las gráficas históricas de NDVI del 1 de enero de 1993 al 31

de diciembre 2022 para cada uno de ellos, se identificaron los eventos de incendio y se calcularon los periodos de retornos. En ArcGIS Pro se contrastaron con las imágenes dentro del modo F/PR utilizando un valor umbral del NDVI de 0.070. Finalmente, se utilizaron las librerías SciPy y Pandas del lenguaje de programación Python para una prueba t de Student y así determinar si existe una diferencia significativa entre las dos series de los NDVI históricos de cada sitio.

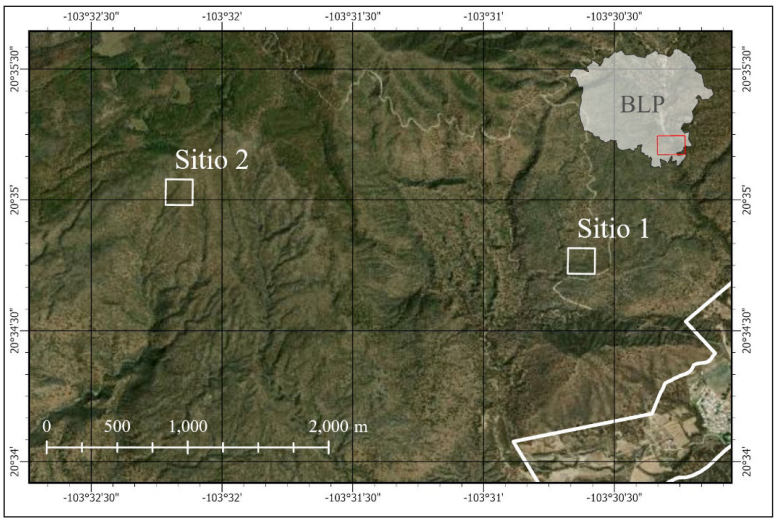

Figura 9. Localización de los sitios experimentales.
Fuentes de datos geoespaciales: CONANP (2017). Crédito de la imagen del fondo: Maxar.

De acuerdo con la Figura 10, el Sitio 1 fue afectado por incendios forestales en los años 1995, 2008 y 2019, mientras que el Sitio 2 tuvo afectaciones en 1995 y 2021 (véase Figura 11).

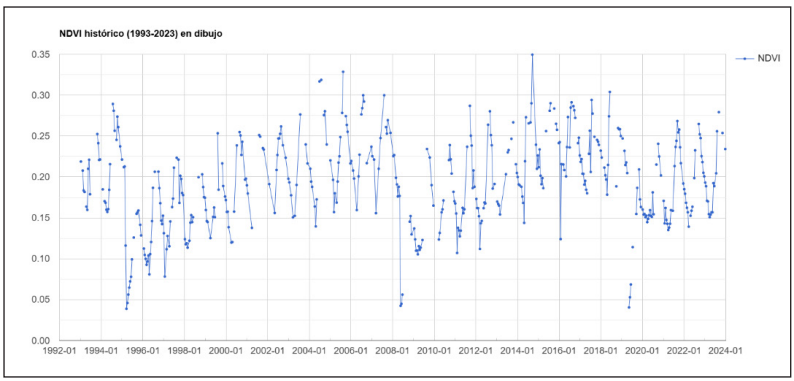

Figura 10. NDVI histórico del Sitio 1.

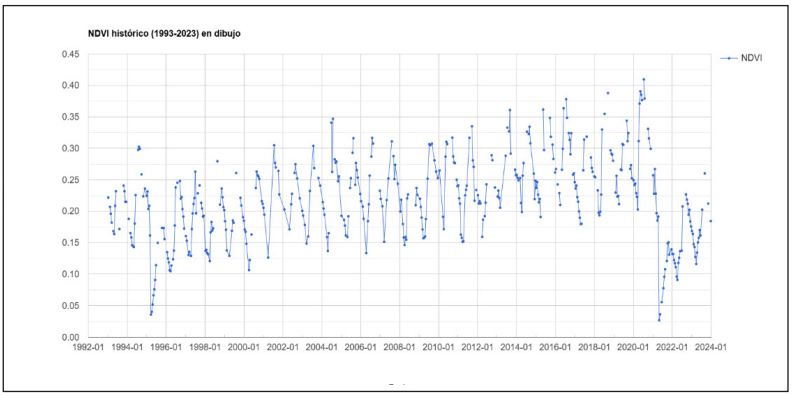

Figura 11. NDVI histórico del Sitio 2.

Para el Sitio 1, F es 0.1 (3/30) y el PR es de 10 años. Mientras que en el Sitio 2 F es (2/30) 0.067 y PR es de 15 años, siendo congruentes con los mapas resultantes del modo F-PR (véase Figura 12). La prueba estadística t de Student (-4.75) sugiere que existe una diferencia significativa entre ambas series históricas y que una media es significativamente menor al de la otra. De igual manera, el valor de p (2.44e-06) indica una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula, lo que respalda la idea de que las dos series de tiempo de NDVI son significativamente diferentes.

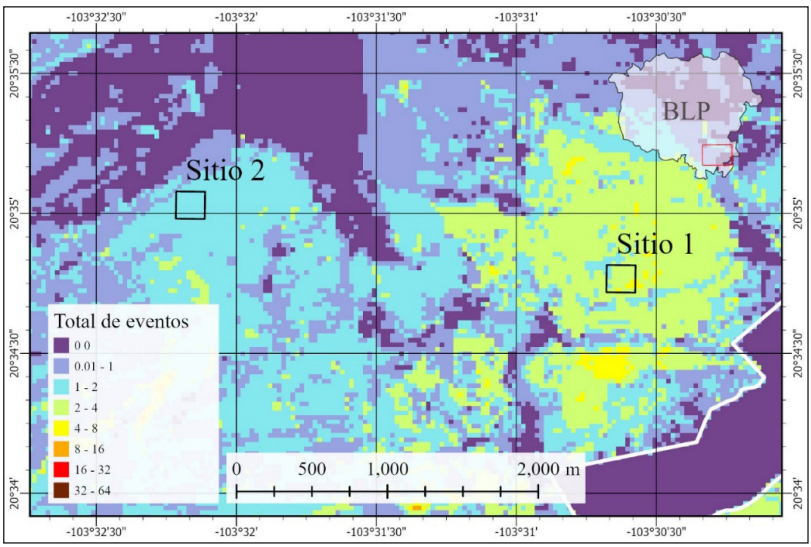

Figura 12. Total de eventos de NDVI mínimo anual menor a 0.70.
Fuentes: PIAVIP y CONANP (2017).

4. Limitaciones de PIAVIP

En este estudio, se optó por emplear NDVI en lugar del Índice Normalizado de Incendios (NBR) debido a que la finalidad principal era realizar un análisis centrado en la dinámica de cobertura de vegetación, más que en la severidad de los incendios. El uso del NDVI puede ser altamente efectivo siempre y cuando se comprendan sus limitaciones y capacidades (Huang *et al.*, 2020). Es importante tener en cuenta que un NDVI alto no refleja necesariamente a un ecosistema saludable. Por ejemplo, el NDVI de un campo de golf es mayor que el de un bosque de encino. De igual manera, el NDVI es indicador de cantidad de vegetación, sin tomar en cuenta su estructura (arbóreo, arbustivo, herbáceo) o etapa sucesional (primaria o secundaria). Por estas razones, debe ejercerse un juicio apropiado a la hora de interpretarlo.

Para el caso de F-PR, un umbral de 0.070 no asegura que no haya ocurrido un incendio, ya que este pudo ser uno de baja severidad. De igual manera, un incendio podría hacer que en los consecuentes años un sitio tenga valores más bajos que ese umbral, y, por tanto, contabilizarlos como eventos independientes resultando en una sobreestimación de incendios. Por esta razón, se recomienda tener cuidado cuando se analice un sitio y apoyarse de las gráficas del NDVI histórico y, si es necesario, reajustar el umbral.

Las nubes, sombras y pendientes pronunciadas pueden alterar significativamente el patrón espaciotemporal del NDVI, dado que pueden contabilizarse como un evento.

El 31 de mayo de 2003, el corrector de líneas de escaneo (SLC, por sus siglas en inglés) de Landsat 7 ETM+ dejó de funcionar de manera permanente. Las imágenes resultantes de ETM+ sin el SLC tienen una pérdida de al menos 22% de píxeles en las áreas no escaneadas, lo cual limita significativamente su utilidad (Wang *et al.*, 2021).

El uso del polígono del área protegida, así como los sitios determinados por el usuario, están sujetos al Problema de la Unidad de Área Modificable y sus efectos (Dark & Bram, 2007), que derivan en la variación de los resultados dependiendo del tamaño y forma de las unidades espaciales utilizadas, así como de su interpretación (falacia ecológica).

Se debe tomar en cuenta que la gráfica histórica se construyó a partir de colecciones históricas correspondientes a distintos sensores (véase Figura 3), y que a pesar de ser semejantes entre sí (Figura 4) la diferencia de instrumentos de medición podría tener implicaciones en la comparabilidad.

5. Conclusiones

PIAVIP ha demostrado ser una herramienta útil en la evaluación y comprensión de las dinámicas de la cobertura del suelo e incendios forestales en el Área Natural Protegida Bosque La Primavera. Sus capacidades se destacan en los siguientes aspectos clave.

Con su interfaz del usuario y análisis automatizados, permite que personas no especializadas en sistemas de información geográfica o programación

accedan a datos y algoritmos complejos y los conviertan en información útil, aportando a la democratización de la información sobre los incendios forestales en el BLP.

Los estudios de caso realizados a las dos escalas espaciales demostraron la versatilidad de la plataforma. A nivel general, PIAVIP permitió identificar y visualizar eventos de incendio documentados en años específicos, así como analizar las fluctuaciones estacionales del NDVI promedio del área protegida. A escala local, la comparación entre dos sitios del bosque, mediante una prueba t de Student, reveló diferencias estadísticamente significativas en sus series históricas de NDVI. Estos resultados confirman que la plataforma es capaz de distinguir dinámicas contrastantes dentro del territorio, reforzando su utilidad como herramienta de análisis espaciotemporal. Asimismo, los análisis realizados evidenciaron patrones diferenciados en términos de frecuencia y periodo de retorno de incendios, lo que subraya la complejidad y heterogeneidad del paisaje forestal del Bosque La Primavera.

Además de aportar a una comprensión científica de la problemática, PIAVIP también puede utilizarse en aplicaciones prácticas en la gestión del bosque. Por ejemplo, podría ser muy útil para establecer y evaluar programas de quemas prescritas, una técnica crucial en la gestión de incendios forestales y la conservación de ecosistemas.

Finalmente, PIAVIP se constituye como una herramienta avanzada y accesible para el análisis de datos de vegetación e incendios forestales, ofreciendo un enfoque integral que combina tecnología de punta con facilidad de uso. Su aplicación en el Bosque La Primavera ilustra su potencial para contribuir a la gestión sostenible y la conservación de esta área natural protegida.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), Raúl Arturo García Huerta, Jaime Severino Romo, Iván Villalón Turrubiates, Maximiano Bautista Andalón, Gabriela Ochoa Covarrubias, Gabriel Vázquez Sánchez, Ma. Cruz Carrillo Rodríguez, José Antonio Márquez Michel, Comité Ciudadano del Organismo Público Descentralizado Bosque La Primavera, Juan Fernando Escobar Ibáñez, Jared Jiménez Rodríguez, Marinés de la Peña Domene, Carlos Alberto Montaño García, Juan Gabriel Morales Padilla, Rodolfo Chávez Ortega, Lydia Hernández Rivera, estudiantes del PAP y a todas las personas que han apoyado al proyecto Bosque Escuela ITESO.

Bibliografía

Álvarez-Contreras, M. D. (2016). *El ocio y la cultura ambiental en áreas naturales de Guadalajara: el bosque de La Primavera y la barranca del río Santiago*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores de Antropología Social (CIESAS), Guadalajara, México.

Balderas-Torres, A. & De Alba-Martinez, H. (2015). Valoración de áreas forestales próximas a zonas urbanas en México: incorporando a los usuarios de los servicios

ambientales en REDD+. En F. Paz & J. Wong (eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales*. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida y el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. http://www.pmcarbono.org/pmc/publicaciones/Libro_Merida_2014_PMC_ISBN-web.pdf

Balderas-Torres, A.; MacMillan, D. C. Skutsch, M. & Lovett, J. C. (2015). 'Yes-in-my-backyard': Spatial differences in the valuation of forest services and local co-benefits for carbon markets in México. *Ecological Economics*, 109, 130-141. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.11.008

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2025). Estadísticas de incendios forestales 2015-2024. *Bases de datos de la Comisión Nacional Forestal*.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2010). *Normales climatológicas 1951-2010. Estación Guadalajara (14066)*. Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2000). *Programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna "La Primavera",* México, vol. 1. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2017). Límite del Área de Protección de la Flora y Fauna (APFF) La Primavera. En *Información Espacial de las Áreas Naturales Protegidas*. Comisión Nacional de Áreas Protegidas.

Dark, S. J. & Bram, D. (2007). The modifiable areal unit problem (MAUP) in physical geography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 31 (5), 471-479. https://doi.org/10.1177/0309133307083294

De Alba-Martinez, H. (2019). [*Servicio ecosistémico de regulación de inundaciones en la microcuenca "El Guayabo*, Jalisco, México, tesis doctoral, Universidad de Guadalajara]. https://hdl.handle.net/20.500.12104/90648

Diario Oficial de la Federación (DOF) (1980). Decreto por el que por causa de utilidad pública se establece zona de protección forestal y refugio de la fauna silvestre la región conocida como La Primavera, que se localiza dentro de una superficie aproximada de 30.500 ha, de propiedad particular en los Municipios de Tala, Zapopan y Tlajomulco, Jalisco. Secretaría de Gobernación, Estados Unidos Mexicanos.

Flores Rodríguez, A. G.; Flores-Garnica, J. G.; González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P. & Mena-Munguía, S. (2021). Análisis comparativo de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales. I*nvestigaciones Geográficas*, 106. https://doi.org/10.14350/rig.60396

Ghosh, S.; Kumar, D. & Kumari, R. (2022). Cloud-based large-scale data retrieval, mapping, and analysis for land monitoring applications with Google Earth Engine (GEE). *Environmental Challenges*, 9, 100605. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100605

Huang, S.; Tang, L.; Hupy, J.; Wang, Y. & Shao, G. (2020). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32, 1-6. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1

Huerta-Martínez, F. M. & Ibarra-Montoya, J. L. (2014). Incendios en el bosque la primavera (Jalisco, México): un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias. *CienciaUAT*, 9, 23-32. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582014000100023

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2020). *Marco Geoestadístico Nacional 2020*. https://www.inegi.org.mx

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación 1:250 000, Serie VI (Conjunto Nacional)*. https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/

Jardel-Peláez, Enrique J. (2020). *Programa de Manejo del Fuego del Bosque La Primavera* [Borrador Final V1.4].

Mas, J.-F. (2022). Cómo usar *Google Earth Engine* y no fallar en el intento. *Revista Cartográfica*, (106), 173-174. https://doi.org/10.35424/rcarto.i106.3374

Notimex (2019, abril 13). Dependencias tratan de sofocar incendio forestal en Bosque La Primavera. *Excelsior*. https://www.excelsior.com.mx/nacional/dependencias-tratan-de-sofocar-incendio-forestal-en-bosque-la-primavera/1307480

Partida, J. C. G. (2021, abril 20). Nuevo incendio en La Primavera, Jalisco, consume 2 mil 384 hectáreas. *La Jornada*. https://www.jornada.com.mx/notas/2021/04/20/estados/nuevo-incendio-en-la-primavera-jalisco-consume-2-mil-384-hectareas/

Rocchio, L. E. P.; Connot, P.; Young, S.; Ramsayer, K.; Owen, L.; Bouchard, M.; Barnes, C. & NASA. (2018). *Landsat benefiting society for fifty years*. http://pubs.er.usgs.gov/publication/70201780

Rodríguez Trejo, D. A. (2014). *Ecología del fuego. Su ecología, manejo e historia*. Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, SEMARNAT, Programa de Prevención y Combate de Incendios Forestales, CONAFOR, CONANP, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl, ANCF, AMPF.

Solórzano Villegas, J. V. & Perilla Suárez, G. A. (2022). *Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento (Primera)*. Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/3671

Sunar, F. & Özkan, C. (2001). Forest fire analysis with remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 22 (12), 2265-2277. https://doi.org/10.1080/01431160118510

Tamiminia, H.; Salehi, B.; Mahdianpari, M.; Quackenbush, L.; Adeli, S. & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152-170. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2011). *Biosphere Reserve Information, La Primavera*. UNESCO- MAB Biosphere Reserves Directory.

Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (s/f). *What are the band designations for the Landsat satellites?* Frequently Asked Questions, Science Technology. https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites

Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (2017). *Spectral Bandpasses for all Landsat Sensors. Images, Illustrations*. https://www.usgs.gov/media/images/spectral-bandpasses-all-landsat-sensors

Wang, Q.; Wang, L.; Wei, C.; Jin, Y.; Li, Z.; Tong, X. & Atkinson, P. M. (2021). Filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images with Sentinel-2 MSI images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101, 102365. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102365

White, P. S. & Pickett, S. T. A. (1985). Chapter 1 - Natural Disturbance and Patch Dynamics: An Introduction. En S. T. A. Pickett & P. S. White (eds.), The Ecology of Natural +Disturbance and Patch Dynamics (pp. 3–13). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050495-7.50006-5

Zhang, C.; Di, L.; Yang, Z.; Lin, L. & Hao, P. (2020). AgKit4EE: A toolkit for agricultural land use modeling of the conterminous United States based on Google Earth Engine. *Environmental Modelling & Software*, 129, 104694. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104694