

El acoso al suelo de conservación de la Ciudad de México a través de los incendios forestales

The harassment of conservation land in Mexico City through forest fires

María Hernández¹, Nadxely Andrews² y Luis M. Vilches-Blázquez³ 

RESUMEN

Este trabajo lleva a cabo un análisis espacio-temporal del acoso al suelo de conservación a través de los incendios forestales ocasionados en este espacio dentro de la Ciudad de México. Para caracterizar y dimensionar este acoso ambiental se utilizan datos oficiales procedentes de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF), Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), Infraestructura de Datos Espaciales Forestales (IDEFOR) y Registro Único de Situaciones de Emergencia (RUSE) del periodo 2015 - 2020. A partir de estos datos se realizan análisis espacio-temporales combinando técnicas tradicionales y algoritmos de *machine learning*. Los resultados muestran que el acoso al suelo de conservación se está produciendo de forma sistematizada en ciertos momentos y espacios, ocasionando un deterioro de la superficie y biodiversidad que podrían ser irreversibles.

Palabras claves: Suelo de conservación, Incendio forestal, Análisis espacio-temporal, *Machine learning*, Ciudad de México.

ABSTRACT

This paper aims to carry out a spatio-temporal analysis of the environmental harassment of conservation land through forest fires caused in this space within Mexico City. To characterize and measure the environmental harassment, official data from the National Forestry Information and Management System (SNIGF), the National Forestry Commission (CONAFOR), the Forest Spatial Data Infrastructure (IDEFOR), the Environment Secretariat (SEDEMA), and the Single Registry of Emergency Situations (RUSE) were utilized to characterize and measure this environmental harassment for the period 2015 - 2020. From these data, some spatio-temporal analyses are performed using traditional techniques and machine learning algorithms. The results indicate that the environmental harassment of the conservation land is systematically taking place at certain times and spaces, causing a deterioration of the surface and biodiversity that could be irreversible.

Keywords: Conservation Land, Forest Fire, Spatio-Temporal Analysis, *Machine learning*, Mexico City.

¹ Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México (México), angiehdez45@gmail.com.

² Investigadora independiente. Ciudad de México (México), maria_nad@hotmail.com.

³ Ontology Engineering Group, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid (España), luis.vilches@upm.es. Anteriormente, adscrito al Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México (México)

Introducción

El mundo se está transformando en un espacio predominantemente urbano y, en este sentido, las ciudades han experimentado un crecimiento sin precedentes durante las últimas cuatro décadas. Según Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2018a), el 55% de la población mundial reside en zonas urbanas, cifra que se espera avance al 70% para 2050. En América Latina y el Caribe, la tendencia hacia la urbanización ha sido más drástica, pasando del 50,5% en 1961 al 81% en 2018 (Naciones Unidas, 2018), produciéndose este comportamiento de una forma más contundente en las ciudades de los países emergentes (Ortiz-Pech, Celis Fajardo y García Gil, 2017).

Esta tendencia del crecimiento urbano está provocando una desmesurada presión sobre los espacios contiguos no urbanizados (especialmente en el suelo rural y espacios naturales), empujando a la fauna y flora silvestre y a la naturaleza, en general, a una esquina cada vez más pequeña del planeta, devorando así a dichos espacios que paulatinamente sucumben a la presión de la urbanización.

En el caso de la Ciudad de México, con frecuencia, se piensa como un continuo urbano. No obstante, en aproximadamente el 50% de su extensión se encuentran diversos tipos de ecosistemas (pastizales de alta montaña, humedales, pedregales y bosques) con diferentes grados de conservación (Dirección de Ordenamiento Ecológico, Dirección de Centros Regionales, Dirección de Comunicación e Información, 2016). A este territorio se le conoce como suelo de conservación, el cual adquiere una renovada importancia con la declaración por parte de las Naciones Unidas de la Década para la Restauración de los Ecosistemas⁴ (2021-2030), que pretende detener, prevenir y revertir la degradación de los ecosistemas de todo el mundo.

En el Informe de Evaluación Global sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES, 2019) se reveló que la salud de nuestros ecosistemas se está deteriorando de forma muy rápida. Esta situación está impactando a nuestras economías, salud, seguridad alimentaria, calidad de vida y medios de subsistencia presentes en el planeta. La situación reflejada en este informe unida a las amenazas que viven las sociedades del mundo actual frente a los problemas del cambio climático hace que la conservación y restauración de espacios como el suelo de conservación de la Ciudad de México se convierta en una prioridad. La mitigación del impacto negativo en el medio ambiente a través de la conservación y restauración de este espacio natural contribuye, de forma directa, a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, particularmente al Objetivo 15 que promueve la gestión sostenible de bosques, lucha contra la desertificación, interrumpir e invertir la degradación de las tierras, así como detención de la pérdida de biodiversidad. Sin embargo, la presencia de incendios forestales sobre la zona de estudio parece tender a todo lo contrario, produciendo afectaciones que pueden tener consecuencias irreversibles como pérdidas de biodiversidad (en flora y fauna) o degradación del suelo que, consecuentemente, impactarán sobre la calidad de vida de los habitantes de la capital mexicana.

El presente artículo plantea como hipótesis de partida que el suelo de conservación de la Ciudad de México se está viendo acosado, de forma directa, por acciones y actividades humanas

⁴ <https://www.decadeonrestoration.org/es>

que generan numerosos incendios forestales. En consecuencia, creemos que estos incendios están ejerciendo presión y amenazan la estabilidad ecosistémica del suelo de conservación de la Ciudad de México, produciendo un deterioro continuado de este espacio producto del acoso sistematizado a la zona de estudio. Para validar estas hipótesis, este trabajo realiza un análisis espacio-temporal combinando técnicas tradicionales (*kernel*) y algoritmos de *machine learning* (DBSCAN y *K-means*). Los resultados permiten evidenciar el crecimiento del acoso sobre dicho suelo en el periodo 2015-2020, provocando el deterioro y reducción de este espacio. Para realizar este trabajo, se plantea la descripción de la zona de estudio, la justificación de este trabajo a través de las problemáticas del suelo de conservación, la metodología aplicada, los resultados y discusión sobre los mismos, así como las conclusiones del trabajo.

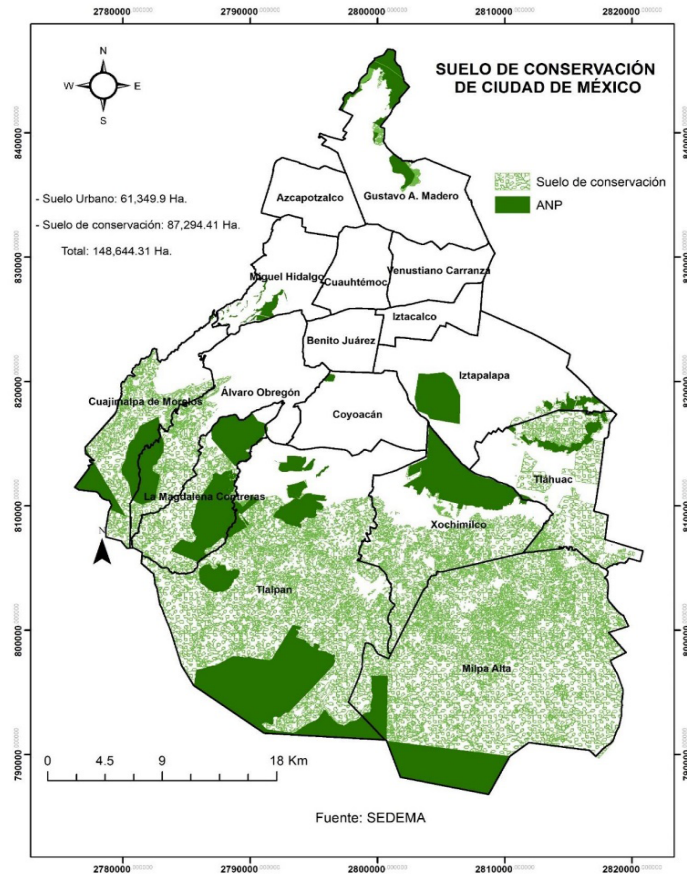
El suelo de conservación como zona de estudio

El suelo de conservación de la Ciudad de México fue creado en 1992 para salvaguardar los servicios ambientales de la ciudad. Este espacio, compuesto por diversos tipos de ecosistemas como bosques, pastizales, humedales o, incluso, tierras agrícolas (Dirección de Ordenamiento Ecológico, Dirección de Centros Regionales, Dirección de Comunicación e Información, 2016); se caracteriza por estar conformado por zonas delimitadas por el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal que proporcionan servicios ambientales orientados al mantenimiento de la calidad de vida de los ciudadanos de la capital mexicana (Federal, 2015).

La Ciudad de México abarca el 0.1% del territorio nacional mexicano, y más de la mitad de su extensión está protegida de la urbanización, distribuyendo su territorio en 61350 hectáreas de suelo urbano y 87294 hectáreas de espacio protegido (suelo de conservación, áreas naturales protegidas y espacio rural), lo que equivale al 59% del territorio de la Ciudad de México. Este territorio protegido se localiza en las alcaldías de Xochimilco, Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón, Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Milpa Alta, Magdalena Contreras, Tlalpan y Tláhuac. La Figura N°1 muestra la distribución del suelo de conservación y áreas naturales protegidas de la Ciudad de México. Dentro de estas alcaldías, el reparto del suelo de conservación resulta desigual, distribuyéndose de la siguiente manera: 32.2% en Milpa Alta, 29.4% en Tlalpan, 11.9% en Xochimilco, 7.5% en Cuajimalpa de Morelos, 7.2% en Tláhuac, 5.9% en Magdalena Contreras, 3.1% en Álvaro Obregón, 1.4% en Gustavo A. Madero y 1.4% en Iztapalapa (Ambiental, 2016).

Figura N°1.

Suelo de conservación y áreas naturales protegidas de la Ciudad de México



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SEDEMA.

Como se mencionaba con anterioridad, la relevancia del suelo de conservación para la Ciudad de México se asocia con los servicios ambientales que se generan dentro de este espacio, entre los que destacan la producción de agua, contribución a la reducción de los niveles de contaminación, regulación del clima, turismo alternativo y cultural, reservorio de biodiversidad, producción agropecuaria y posibilidades de recreación y retención de agua y suelo. Estos servicios, desde la óptica regional, son indispensables para el sustento de la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México y son pieza clave para el desarrollo económico; mientras que desde el ámbito local resultan vitales, ya que permite el aprovechamiento agropecuario, turístico y forestal realizado en el área de estudio por comunidades rurales. Dichos aprovechamientos conforman la base del desarrollo económico y social para estas comunidades (Dirección de Ordenamiento Ecológico et al., 2016).

Considerando la importancia de los servicios ambientales generados dentro del suelo de conservación de la Ciudad de México, la preservación de este espacio resulta una cuestión prioritaria para respaldar su sustentabilidad y desarrollo para las futuras generaciones, alineándose de este modo con los objetivos de la Declaración de la Década para la Restauración de los Ecosistemas (2021-2030) promovida por las Naciones Unidas.

Problemática del suelo de conservación

Según Naciones Unidas, la desertificación y deforestación (derivadas del cambio climático y de las actividades humanas) conllevan grandes retos para el desarrollo sostenible y han impactado en las vidas y medios de subsistencia de gran parte de los habitantes del planeta. En este sentido, los bosques tienen un rol estratégico para el mantenimiento de la vida y tienen una importancia vital para la lucha contra el cambio climático. Sin embargo, la situación de los bosques en la Tierra en 2020 muestra que unos 420 millones de hectáreas de árboles han desaparecido a consecuencia de la agricultura y de diversos usos de la tierra (Naciones Unidas, s.f.).

Esta realidad no es ajena a espacios como el suelo de conservación de la Ciudad de México, ya que es un espacio amenazado por diversos factores, tales como la tala ilegal, asentamientos irregulares e incendios forestales. En este trabajo únicamente nos centramos en el análisis de los incendios forestales en el suelo de conservación, debido a la ausencia de datos (abiertos) sobre los otros factores que acosan al suelo de conservación (tala ilegal y asentamientos irregulares). Así, en este trabajo haremos énfasis en cómo este tipo de eventos han sido foco de acoso en la zona de estudio.

Un incendio forestal se caracteriza por la expansión libre y no programada del fuego sobre la vegetación presente en selvas, bosques, zonas áridas y semiáridas (CENAPRED, 2019). El combustible, en este contexto referido al tipo de vegetación, es el elemento primordial que establece la magnitud de los incendios (SEGOB et al., s.f.). Las afectaciones que traen consigo este tipo de eventos provocan la emisión de carbono y otras partículas, favoreciendo los efectos del calentamiento global. Además, la generación de humo como consecuencia de este tipo de incendios aminora la fotosíntesis de los árboles y plantas y traen consecuencias directas para la salud de las personas y animales. Asimismo, es importante tener presente que este tipo de incendios van a impactar, de forma directa, a las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos. En este sentido, las respuestas del ecosistema forestal van a depender del tipo de incendio y de las condiciones particulares del suelo (Urzúa Valenzuela & Cáceres Bueno, 2011).

Considerando estos aspectos, en este trabajo nos centramos en el análisis de las causas antrópicas de los incendios forestales en el suelo de conservación de la Ciudad de México, con el objetivo de demostrar que estos incendios son producto de un acoso sistemático sobre este espacio, lo que repercute en un fuerte impacto sobre este suelo y sus áreas naturales protegidas.

Pero ¿a qué nos referimos con acoso? Somos conscientes de que definir este término depende, particularmente, de la disciplina de la que partan los trabajos. Sin embargo, desde un enfoque ambiental, consideramos el acoso como el comportamiento repetitivo, sistemático e intencional de causar daño o perjudicar al referido espacio de conservación de la Ciudad de México, conlle-

vando desequilibrios ambientales, ocasionados por el mismo ser humano. Así, con este trabajo pretendemos demostrar que el suelo de conservación presenta una constante amenaza sobre el uso de suelo y vegetación de este espacio. Esta situación está llevando a este espacio a una degradación ambiental (Graham, 1992), que será evidenciada a través del análisis espacio-temporal de los incendios forestales, propiciando la consecuente disminución en la condición o calidad del suelo de conservación.

Materiales y métodos

Fuentes de datos

En este trabajo se realizó un análisis de información utilizando diversas fuentes de datos oficiales que fueron divididos en dos grupos. Por un lado, aquellas fuentes proporcionadas por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNI-GF), Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) e Infraestructura de Datos Espaciales Forestales (IDEFOR). En este grupo de fuentes se presentan datos relacionados con incendios forestales, lugares de propagación, afectaciones y causas relacionadas con los incendios. Por otro lado, se consideran datos del Registro Único de Situaciones de Emergencia (RUSE) que contienen puntos de concentración de incendios en la Ciudad de México, causas y afectaciones al suelo de conservación en el periodo 2015 – 2020. Estos diversos conjuntos de datos se caracterizan por poseer información georreferenciada, encontrándose en formato *shapefile* y *Comma Separated Values* (CSV). La dimensión temporal considerada obedece a la disponibilidad de datos sobre el conjunto de fuentes utilizadas.

Desde una perspectiva general, al realizar el tratamiento de las fuentes de información de las diferentes organizaciones mencionadas con anterioridad, destacamos falta de información sobre diversas características (por ejemplo, en algunos años no existen datos sobre el número de hectáreas y especies sometidas a incendios), errores de precisión (encontramos que diversas coordenadas (puntos) no corresponden a la zona de estudio), u omisiones por desconocimiento (por ejemplo, causas de incendios) o ausencia de captura de información (en numerosos casos no aparecen coordenadas asociadas a los incendios presentes en las fuentes empleadas).

Considerando este punto de partida con respecto a los datos, dado que en este trabajo nos centramos en caracterizar la distribución espacio-temporal de los incendios forestales del suelo de conservación de la Ciudad de México, se procedió a trabajar con aquellos datos que permitieron abordar este análisis. No obstante, con la intención de no perder la visión de conjunto de los datos sobre los incendios en la zona de estudio, se partió de una caracterización inicial y, tras ella, se realizaron diversos análisis, centrados en la componente espacio-temporal de los datos, para determinar el acoso ambiental y el deterioro de este espacio de conservación ocasionado por dichos incendios.

Etapas de la investigación

El análisis de los incendios forestales presentes en el suelo de conservación de la Ciudad de México desarrollado en este trabajo se ha centrado en cuatro actividades orientadas a la caracte-

rización de: i) las causas y temporalidad de los incendios forestales, ii) la dimensión espacial, iii) las afectaciones a la superficie y su cubierta vegetal y iv) la relación entre incendios y conservación de biodiversidad. A continuación, se describen los detalles de cada una de las actividades desarrolladas.

1. En la caracterización y temporalidad de los incendios forestales se distinguen los factores causantes y la transitoriedad de los incendios en la zona de estudio. Esta caracterización se considera como elemento de entrada para la siguiente actividad de este proceso de investigación.

Asimismo, en este proceso de caracterización decidimos relacionar la variable temporal (meses), causas de los incendios y las alcaldías donde se producen los incendios mediante el empleo del diagrama de Sankey. Estos diagramas se utilizan para visualizar flujos de energía, materiales u otros recursos en una variedad de aplicaciones. Schmidt (2008) revisó la historia y los usos de este tipo de diagramas. En el mundo de la visualización de datos, los diagramas de Sankey se utilizan para visualizar datos multidimensionales arbitrarios de una manera bastante diferente (Lupton & Allwood, 2017). En este diagrama el ancho de las líneas o flechas muestra sus magnitudes, pudiendo combinarse o dividirse en sus diferentes trayectorias. Además, el tamaño de las líneas o flechas refleja la cantidad de flujo y el color puede ser utilizado para mostrar diferentes categorías o evidenciar transiciones entre procesos (The Data Visualisation Catalogue, s.f.).

2. Para dimensionar los espacios con afectaciones a causa de incendios forestales y, con ello, lograr identificar la distribución espacial del acoso al suelo de conservación se utilizaron técnicas tradicionales (*kernel*) y algoritmos de *machine learning* (DBSCAN y *K-means*):

- a) El método *kernel* (Shawe & Cristianini, 2004) calcula una magnitud por unidad de área a partir de entidades de punto o polilínea mediante una función *kernel* (Kanevski, Pozdnukhov y Timonin, 2008). En este caso, permite mostrar el grado de concentración de los incendios dentro del suelo de conservación. Además, se utilizan las diversas causas que propician estos incendios para reflejar su comportamiento espacial.
- b) DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) (Ester et al., 1996) es un algoritmo de agrupamiento basado en la densidad. Fue diseñado para agrupar datos de formas arbitrarias en presencia de ruido en bases de datos espaciales y no espaciales de alta dimensión. La idea clave de DBSCAN es que, para cada objeto de un agrupamiento (clúster), la vecindad de un radio dado (*Eps*) debe albergar al menos un número mínimo de objetos (*MinPts*), lo que significa que la cardinalidad de la vecindad debe exceder algún umbral. La vecindad ϵ de un punto arbitrario " p " se define como,

$$NEps = \{q \in D / dist(p, q) < Eps\}$$

Aquí, D es la base de datos de objetos. Si las vecindades ϵ de un punto P contienen al menos un número mínimo de puntos, entonces este punto se llama punto central. El punto central se define como:

$$NEps(P) > MinPts$$

c) *K-means* (MacQueen, 1967) está entre los 10 algoritmos más utilizados en análisis de datos (Wu et al., 2008). Este algoritmo consta de dos fases separadas. La primera fase selecciona k centros aleatoriamente, donde el valor k se determina de forma previa. La otra fase consiste en llevar cada objeto de datos al centro más cercano [5]. En el momento en el que todos los objetos de datos son contenidos en algún grupo, se completa el primer paso y se realiza una agrupación inicial. Tras ello, se recalcula el promedio de los agrupamientos formados y se produce un proceso iterativo repetidamente hasta que la función de criterio se convierte en el mínimo.

Suponiendo que el objetivo es x , x_i refleja el promedio del grupo C_i , la función de criterio se define de la siguiente manera:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - x_i\|^2$$

E es la suma del error cuadrático de todos los objetos en la base de datos. La función de distancia de criterio es la distancia euclidiana, que se utiliza para determinar la distancia más cercana entre cada objeto de datos y el centro del grupo. La distancia euclidiana entre un vector $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ y otro vector $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, la distancia euclidiana $d(x, y)$ se puede obtener de la siguiente manera:

$$d(x, y) = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \right]^{1/2}$$

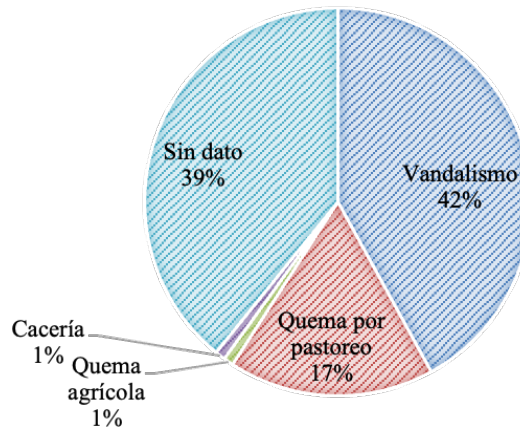
3. Las afectaciones que los incendios causan sobre el suelo de conservación y su cubierta vegetal son analizadas para dimensionar la superficie y especies afectadas.

Resultados y discusión

Caracterización y temporalidad de los incendios forestales

El tratamiento del conjunto de datos considerado en este trabajo permitió caracterizar la tipología de causas de los incendios forestales del suelo de conservación de la Ciudad de México durante el periodo de tiempo 2015 - 2020. En este periodo, los datos oficiales registraron un total de 9876 incendios concentrados en las nueve alcaldías que conforman el suelo de conservación. Dichos incendios son producidos por las siguientes causas: quema para pastoreo, quema agrícola, cacería, vandalismo o se desconoce la causante del origen del incendio. Como se muestra en la Figura N°2, entre los incendios que acosan al suelo de conservación destacan, principalmente, aquellos originados por vandalismo, causas desconocidas y quema por pastoreo.

Figura N°2.
Causas de los incendios forestales (2015 – 2020)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

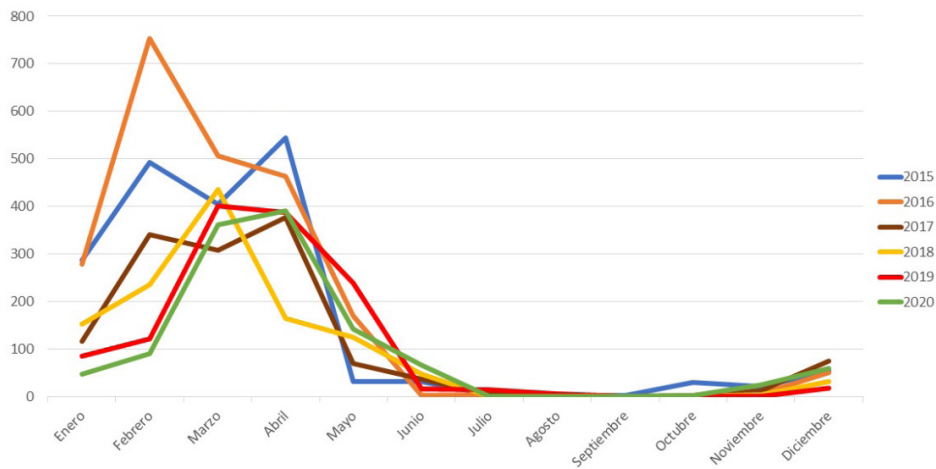
En los incendios producidos en el suelo de conservación se identifica una importante concentración temporal. Así, en la Figura N°3 se aprecia que los incendios se concentran entre los meses de febrero - abril, donde aparece el mayor número de incendios en los diversos años de este estudio, con un total de 6778 incendios originados en los meses mencionados. Esta concentración temporal no obedece a cuestiones de temperatura, ya que según el *National Centers for Environmental Information* de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), durante los meses mencionados se dan las temperaturas mínimas promedio más bajas, mientras que las temperaturas máximas promedio están próximas a las del resto del año. En cambio, en estos meses se presenta la época de estiaje que, según la situación geográfica de las diversas regiones de México, abarcan desde enero hasta agosto, aunque en la mayor parte del país los meses más críticos van de marzo a mayo (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana et al., 2021), coincidiendo con los datos reflejados por el suelo de conservación de la Ciudad de México. No obstante, hay que considerar posibles factores adicionales que inciden en la ocurrencia y propagación de incendios en el medio forestal, tales como, vegetación, tipo de suelo, orografía, etc. Sin embargo, incluso considerando estos factores adicionales, pensamos que los incendios que se encuentran sin una causa asociada podrían estar vinculados, al menos una gran parte, a acciones o actividades humanas, conforme a lo sostenido en (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana et al., 2021). Entre las acciones o actividades destacan las quemas de terrenos para la siembra y el pastoreo de ganado, donde, con frecuencia, el fuego pasa a las áreas forestales próximas (CONAFOR, 2018), a las que se unen los actos de vandalismo e imprudencia.

A partir del mes de mayo, los incendios se reducen drásticamente durante el resto del año, aunque en 2019 y 2020 esta disminución se extiende hasta los meses de junio o julio, respectivamente. Este hecho se produce como consecuencia del final del periodo de estiaje y, por tanto, del inicio de la temporada de lluvias. Otro comportamiento para destacar en la dimensión temporal de los incendios es la presencia de un leve crecimiento todos los años en el mes de diciembre, probablemente debido al fin de la época de lluvias (octubre) y al inicio de la época seca, lo que propicia las quemas mencionadas con anterioridad, que se unen a los actos vandálicos.

Asimismo, otro elemento relevante que aparece en la Figura N°3 es el comportamiento atípico del año 2016, donde los mencionados meses de estiaje muestran un incremento considerable de los incendios forestales, produciéndose el mayor número de incendios hasta la fecha en ese intervalo temporal (2287). Esta situación parece estar relacionada con el hecho de que, desde una perspectiva global, hubo un fuerte fenómeno de El Niño que afectó considerablemente a Latinoamérica, repercutiendo directamente sobre México a través de un agravamiento de la sequía (Martínez et al., 2017) y del incremento de la temperatura de 1.5°C por encima del promedio entre 1981 y 2010 y 0.4°C por encima de los años 2014 y 2015.

Figura N°3.

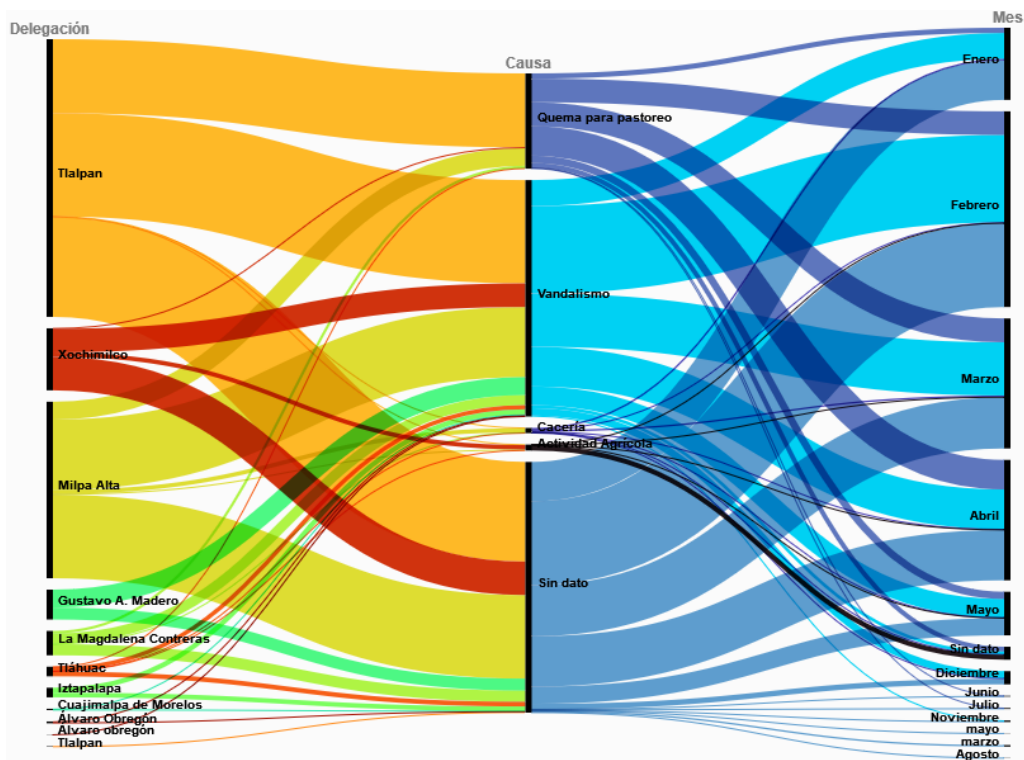
Serie de tiempo de los incendios forestales en el suelo de conservación



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Esta visualización (ver Figura N°4) nos permite identificar que los incendios forestales se concentran, mayoritariamente, en las alcaldías de Milpa Alta (32%) y Tlalpan (29%). Estas dos alcaldías albergan un total de 8100 incendios [Milpa Alta (3299) y Tlalpan (4801)] y conjuntamente presentan dos terceras partes del suelo de conservación de la Ciudad de México. Conforme a la perspectiva general mostrada en la Figura N°2, se repiten las principales causas de los incendios en las alcaldías mencionadas, obedeciendo su procedencia al vandalismo, causas desconocidas y la quema para pastoreo. Adicionalmente, la Figura N°4 pone de manifiesto que los incendios en las alcaldías mencionadas y por las causas aludidas se producen mayoritariamente entre los meses de febrero – abril. En el extremo opuesto aparecen las alcaldías de Tlalpan, Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos, donde los incendios producidos se originan por causas desconocidas y con diversidad temporal (marzo, mayo – agosto y noviembre).

Figura N°4.
Diagrama de Sankey para los incendios forestales por alcaldía



Fuente. Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Dimensión espacial

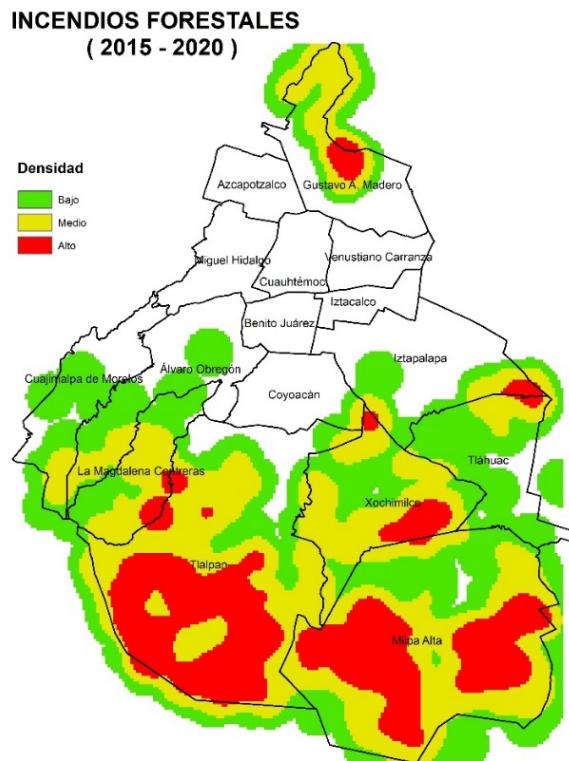
Desde la perspectiva espacial, la distribución de los incendios durante el periodo analizado permite identificar una importante concentración en determinados espacios del suelo de conservación (ver Figura N°5). Así, la aplicación del método *kernel* nos permite identificar que la concentración de los incendios forestales se presenta en dos alcaldías que concentran casi dos terceras partes del suelo de conservación, como son los casos de Milpa Alta (32%) y Tlalpan (29%). En estas alcaldías encontramos el mayor número de incendios (Milpa Alta con 3299 y Tlalpan con 4801 incendios).

En el caso de Milpa Alta, la distribución espacial nos permitió identificar concentraciones localizadas en las partes Sureste y Suroeste de la alcaldía, adentrándose en áreas naturales protegidas como lo son los espacios de Tepozteco y San Miguel Topilejo. Por otro lado, en Tlalpan, los incendios se encuentran ubicados en su mayor parte dentro del área natural protegida San Miguel Topilejo, así como en el corredor biológico Chichinautzin, San Nicolás Totolapan, cumbres del Ajusco y el parque ecológico de la Ciudad de México. Asimismo, la distribución espacial permitió identificar que los incendios han mantenido una presencia reiterada en la misma localización, de forma anual, o incluso, con ubicaciones muy cercanas entre incendios. Por tanto, los puntos de concentración de los incendios forestales permanecen similares durante el periodo de tiempo analizado. Esto se evidencia al analizar la distribución espacial del conjunto de datos y, de forma particular, al considerar los años con mayor número de incendios.

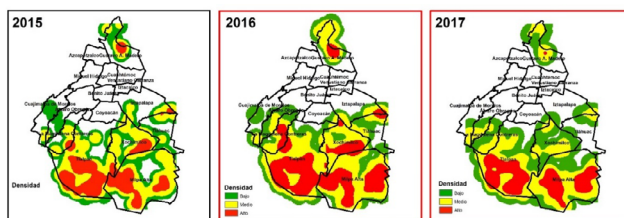
En la Figura N°5 también se muestra la concentración de los incendios en los años 2015, 2016 y 2017, que destacan por el número de incendios. En estos años, la concentración espacial de los eventos sigue resultando destacada en las alcaldías de Tlalpan y Milpa Alta, centrándose en las áreas naturales protegidas de San Miguel Topilejo, corredor biológico Chichinautzin, Tepozteco, Cumbres del Ajusco y San Nicolás Totolapan. Junto a las concentraciones espaciales presentes en estos años, se comprobó que en el 2017 se produce una reducción de la densidad de los incendios (pasando de alta a media) en puntos como Magdalena Contreras, Xochimilco, Tláhuac y Gustavo A. Madero. No obstante, esta variación de la densidad de los incendios no se traduce en una contracción del acoso al suelo de conservación, ya que los incendios persisten en la zona de estudio en el periodo de tiempo estudiado.

Figura N°5.

Densidad de incendios forestales en el suelo de conservación de la Ciudad de México y años con mayor concentración de incendios



Concentración de incendios forestales 2015 - 2020 ocasionados por diversas causas.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

El vandalismo ha sido uno de los principales detonantes de incendios forestales dentro del suelo de conservación de la Ciudad de México. El número de incendios registrados por esta causa alcanzó los 4146 durante el periodo 2015 - 2020. Con respecto a la distribución espacial de los incendios originados por esta causa (ver Figura N°6a), se identifica una concentración superior en las alcaldías de Tlalpan y Milpa Alta. Aunque resulta difícil afirmar con rotundidad debido a la falta de datos que permitan una comprobación, pensamos que los incendios relacionados con el vandalismo están asociados a tres razones principalmente. Por un lado, están los propios actos vandálicos o imprudencias cometidas dentro de este espacio y, por otro lado, la presencia de asentamientos irregulares cercanos a focos de concentración de incendios. La combinación de ambas circunstancias permite hipotetizar que la población que se aloja en estos asentamientos es la posible causante de los incendios producidos en la zona de los asentamientos irregulares presentes en las alcaldías de Tláhuac, Gustavo A. Madero, Xochimilco, La Magdalena Contreras, Milpa Alta, Cuajimalpa de Morelos y Tlalpan, a los que se unen aquellos asentamientos cercanos o dentro de áreas naturales protegidas. Esta influencia de los asentamientos humanos sobre los espacios forestales y su susceptibilidad al incremento de los incendios en estos espacios fue evidenciada en (FAO, 2000). Finalmente, la tercera razón estaría asociada con la búsqueda de un cambio de uso de suelo, consecuencia de la expansión urbana y de los movimientos especulativos relacionados con las ciudades. Asimismo, es importante destacar que, en las alcaldías de Xochimilco, Tláhuac, Magdalena Contreras y Gustavo A. Madero se producen importantes focos de concentración, aunque con menor número de incendios que en Tlalpan y Milpa Alta.

Curiosamente, los incendios sin una causa asignada dentro de los datos considerados (ver Figura N°6b) presentan una distribución espacial similar a aquellos que fueron originados por actos vandálicos. Esta situación permite reafirmar nuestro supuesto en relación con los datos sin causa identificada, ya que pensamos que gran parte de este tipo de incendios están asociados con el vandalismo.

Por otro lado, los incendios derivados de la quema por pastoreo (ver Figura N°6c) alcanzaron los 1698 incendios forestales. Aunque, de forma generalizada, estos incendios tienen una concentración baja a lo largo del suelo de conservación de la Ciudad de México, destaca el foco que se produce en el área natural protegida de San Miguel Topilejo, en la alcaldía Tlalpan. Como se ha mencionado anteriormente, Tlalpan y Milpa Alta son dos de las alcaldías con mayor superficie de suelo de conservación de la Ciudad de México, por lo que pensamos que la concentración de incendios forestales intencionados tiene como objetivo perjudicar el suelo fértil de la zona.

Entre las causas identificadas con un menor número de incendios en el suelo de conservación se encuentran la actividad agrícola y la cacería. Los primeros (ver Figura N°6d) se asocian con prácticas tradicionales de la agricultura relacionadas con la quema de los residuos de cultivos de años anteriores. Sin embargo, en ocasiones, esta práctica desencadena incendios difíciles de controlar que acaban ocasionando importantes daños en el suelo de conservación y, por consiguiente, el deterioro y degradación de este espacio. La distribución espacial de estos incendios nos permite identificar su concentración en las alcaldías de Xochimilco y Milpa Alta, donde se mantiene esta actividad primaria por tradición familiar, autoconsumo o para satisfacer de alimentos frescos a la Ciudad de México. Así, se identifica que en Xochimilco aparecen lugares que ejercen este tipo de actividad primaria, como son los casos de San Gregorio y San Luis Tlaxialtemalco.

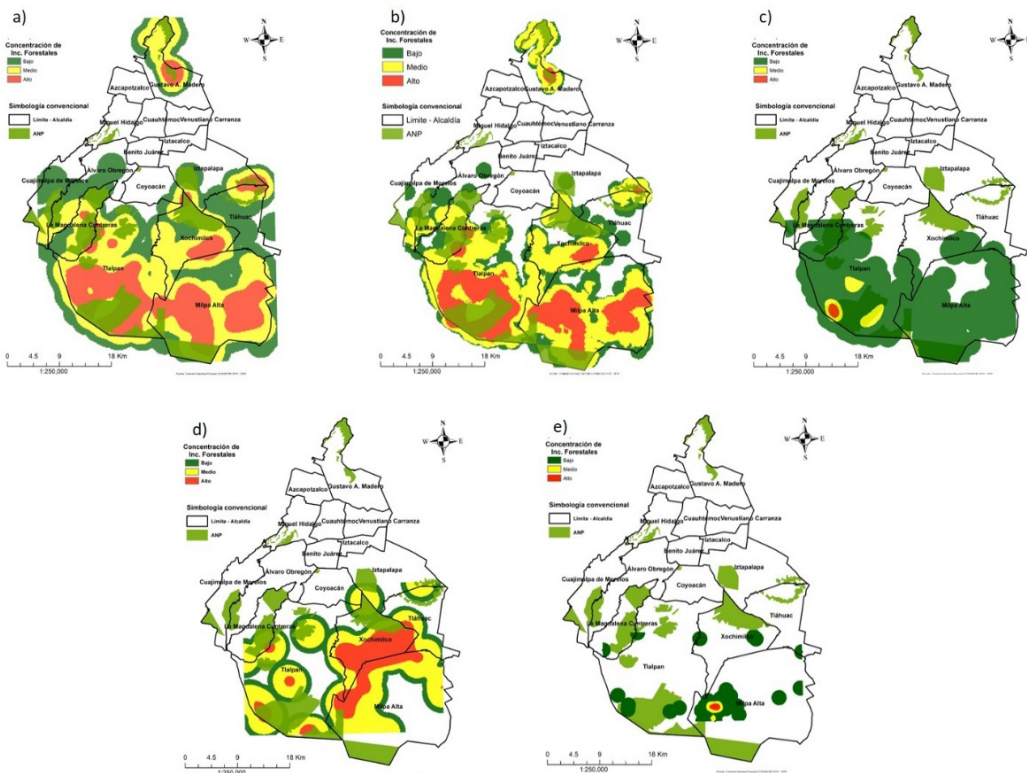
Por su parte, en Milpa Alta se mantienen aquellos pueblos que su herencia histórica está asociada a la agricultura, como son San Lorenzo o Santa Ana Tlacotenco, por mencionar algunos.

Finalmente, los incendios forestales ocasionados por la cacería (ver Figura N°6e) se encuentran presentes en Milpa Alta, concretamente, en la cercanía del área natural protegida San Miguel Topilejo, así como en el corredor biológico Chichinautzin. La consideración de áreas protegidas de los espacios mencionados nos permite afirmar que la cacería en estas zonas es producto de una actividad ilegal que, a su vez, ocasiona impactos negativos adicionales al suelo de conservación puesto que en muchos casos se propician incendios para que los animales salgan de los lugares en los que habitan y poder cazarlos.

Figura N°6.

Distribución de incendios conforme a sus causas

a) Vandalismo, b) Sin causa asignada, c) Quema por pastoreo, d) Actividad agrícola y e) Cacería



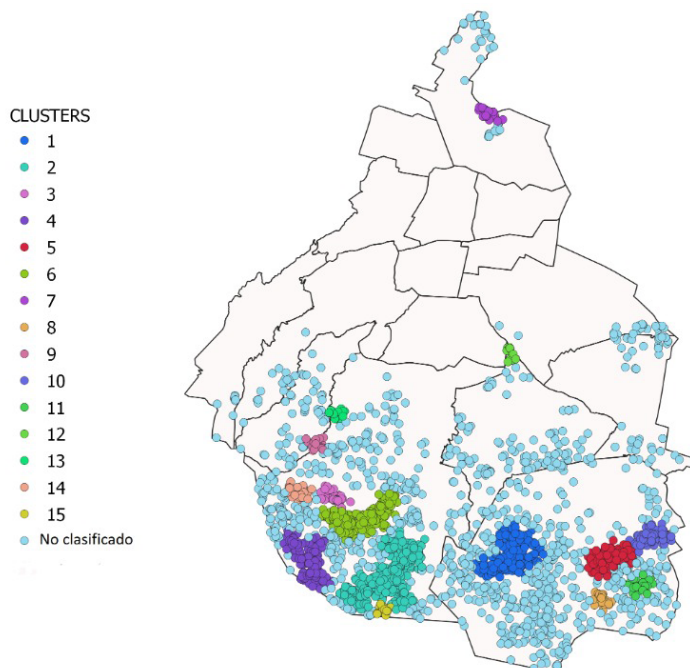
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Por otro lado, los incendios forestales pueden producirse por causas naturales (Avila-Flores et al., 2010). Sin embargo, con respecto a los datos considerados en este trabajo, se descarta esta opción, puesto que gran parte de los incendios suscitados se concentran en puntos cercanos o, incluso, en un mismo punto dentro del suelo de conservación. Para confirmar esta afirmación, aplicamos el algoritmo DBSCAN, que nos permite encontrar agregación espacial de los incendios. Para ello, se consideraron diferentes valores, pero producto de la comparación entre los diferentes resultados obtenidos se decidió una distancia entre los puntos del clúster de 1000

metros y un tamaño mínimo del clúster de 20. La Figura N°7 muestra el resultado obtenido con la conformación de 15 clústeres y uno adicional que recoge aquellos incendios (*noise points*) que el algoritmo no clasifica en ninguno de los grupos establecidos y, por tanto, son considerados como menos interesantes para el análisis. Los 15 clústeres identificados revelan puntos calientes (*hot spots*). Estos puntos nos llevan a deducir que los impactos que afecten a dicho suelo producirán, a corto plazo, una marca preponderante en estos agrupamientos, lo que pondrá en riesgo sus características como suelo de conservación. Por tanto, se están produciendo comportamientos que permiten vislumbrar una búsqueda de cambio de uso de suelo. En consecuencia, la distribución espacio-temporal que muestran los incendios pone de manifiesto un acoso sistemático y reiterado al suelo de conservación de la Ciudad de México.

Figura N°7.

Agrupamientos de incendios utilizando DBSCAN



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Afectaciones a la superficie y la cubierta vegetal

Los incendios forestales producen degradación del suelo y pérdidas de vegetación, pudiendo ocasionar impactos irreversibles sobre este espacio de conservación de la Ciudad de México. El estudio realizado nos permitió identificar que entre 2015-2020 estos incendios afectaron un total de 14032 hectáreas del suelo de conservación. Como se aprecia en el Cuadro N°1, la superficie afectada por incendios se ha incrementado considerablemente, incluso hasta llegar al 6,4% de la superficie del suelo de conservación en 2019. Por otro lado, creemos que el porcentaje de superficie afectada por incendios forestales se vio drásticamente reducido durante el 2020 debido a las restricciones durante la pandemia por COVID-19, no por un aumento del control del suelo de

conservación. Esta afirmación se alinea con estudios de evaluación del impacto de la pandemia sobre los incendios forestales en diversas zonas de estudio (Paudel, 2021; Poulter et al., 2021; Sannigrahi et al., 2022). Adicionalmente, los datos mostrados en el Cuadro N°2 permiten validar nuestra hipótesis sobre el acoso al suelo de conservación, ya que como se aprecia en dicho Cuadro, la superficie no afectada por incendios forestales va reduciéndose, lo que considerando la diversidad y gravedad de los incendios producidos conlleva a un deterioro continuado del suelo de conservación producto del acoso sistematizado a este espacio y que se evidencia, aún más, con la concentración de incendios en lugares específicos de la zona de estudio.

Cuadro N°3.

Afectación por hectárea por incendios forestales 2015 - 2020

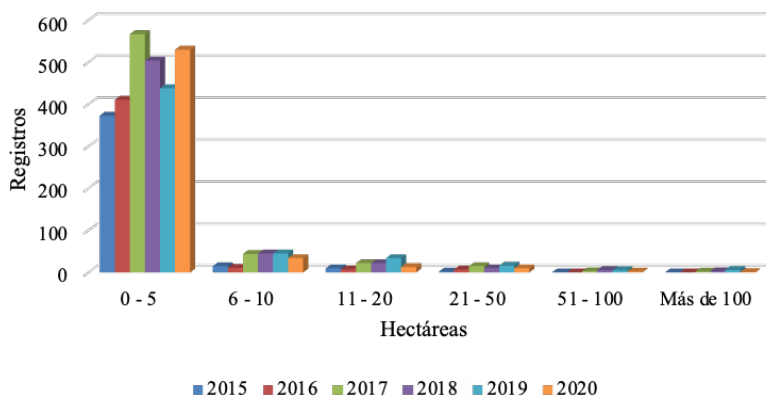
Año	Superficie afectada (Ha.)	% de suelo de conservación afectado	Superficie no afectada (Ha.)
2015	609	1"	86.685
2016	812	1"	86.482
2017	2449	2.8"	84.845
2018	2731	3"	84.563
2019	5674	6.4"	81.620
2020	1757	2"	85.537
Total	14032	16"	73.262

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Con respecto al tamaño de los incendios (ver Figura N°8), los datos muestran una importante concentración en incendios que afectaron a una superficie entre 0-5 hectáreas, con un total de 2823 registros en el periodo analizado. Además, los años con mayor número de incendios de esta dimensión, se concentran en los años 2017 (567) y 2020 (530). Por otro lado, los incendios por encima de 6 hectáreas se reducen drásticamente, aunque aparecen números importantes de incendios entre 2017-2019 en superficies de entre 6-10 y 11-20 hectáreas.

Figura N°8.

Hectáreas afectadas por incendios forestales



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Cabe resaltar que, aunque existe información sobre las afectaciones por hectárea, también nos encontramos ausencia de información sobre el tamaño de hectáreas incendiadas dentro de los conjuntos de datos considerados. El Cuadro N°5 nos permite evidenciar el número de incendios que carecen de esta información. A pesar de esta ausencia de información y de la consiguiente limitación que supone para el análisis, estos datos nos permiten afirmar que el acoso al suelo de conservación por los incendios forestales es incluso mayor del que registran los datos oficiales.

Cuadro N°5.

Incendios sin información sobre su tamaño

Hectáreas	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Sin dato	1504	1851	1365	606	744	593	6663

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Otro de los factores clave en este análisis es la caracterización de la cobertura vegetal afectada por los incendios forestales producidos en el suelo de conservación. La Ciudad de México consta de una vasta vegetación que cubre los espacios del suelo de conservación, donde predominan el encino, bosque de cultivo, oyamel, pastizal, matorral o pino. Ésta cubierta vegetal abarca en pequeña y gran medida las 16 alcaldías de la zona de estudio. El Cuadro N°6 nos permite identificar que la principal cobertura vegetal afectada es el bosque de pinos, que abarca en su mayor parte las alcaldías Tlalpan y Milpa Alta. En un segundo nivel aparecen el pastizal natural, bosque de pino-encino, matorral somontano, bosque de oyamel y bosque de encino. Además, identificamos que la cobertura vegetal para agricultura de temporal ha sido afectada en Xochimilco, mientras que en Magdalena Contreras los incendios han afectado a las zonas de bosque de oyamel y pino. Asimismo, es importante destacar, como sucedía en casos anteriores que existe un volumen considerable de ausencia de datos sobre cobertura vegetal afectada por los incendios dentro de este espacio, alcanzando las 5097 hectáreas de cobertura vegetal afectada sin especificar.

Cuadro N°6.

Cobertura vegetal afectada por incendios

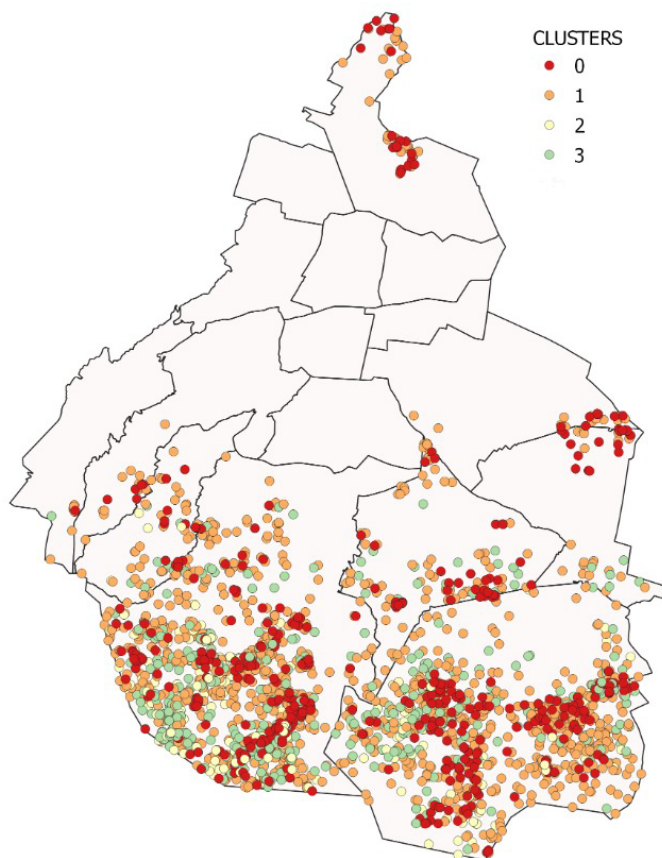
Vegetación	2015	2016	2017	2018	2019	2020	TOTAL
Bosque cultivado	19	22	0	0	0	0	41
Bosque de encino	3	17	86	15	40	29	190
Bosque de encino-pino	2	2	0	0	0	0	4
Bosque de oyamel	15	68	38	17	39	20	197
Bosque de pino	394	643	924	461	506	373	3301
Bosque de pino-encino	62	118	28	20	42	33	303
Bosque inducido	2	0	42	9	22	13	88
Matorral crasicaule	4	14	0	0	0	0	18
Palmar inducido	8	4	0	0	0	0	12
Pastizal natural	90	4	143	54	29	51	371
Pastizal halófilo	0	2	0	0	0	0	2
Matorral submontano	0	0	82	30	45	66	223
Vegetación halófila (Hidrófila)	0	0	0	7	17	5	29
Sin dato	1305	1393	675	583	548	593	5097
TOTAL	1904	2287	2018	1196	1288	1183	9876

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Considerando estas afectaciones a la superficie y cubierta vegetal, aplicamos el algoritmo *K-means* para espacializar los incendios a partir de algunas de estas características. En este caso, se consideraron las variables relacionadas con la emisión de CO_2 , superficie quemada y tipo de causa de incendio. Tras la realización de distintas pruebas con diversos K , se optó por utilizar 4 clústeres, originando como resultado el agrupamiento de incendios que comparten características similares mostrado en la Figura N°9. La distribución espacial de los incendios nos permite identificar una presencia dispersa de los elementos que conforman cada clúster. Sin embargo, se pueden observar agrupamientos de incendios pertenecientes a un mismo clúster. En este último caso tenemos, por ejemplo, los grupos formados en Gustavo A. Madero (Norte), Ixtapalapa y Tlahuac (Este), donde únicamente hay presencia de los clústeres de tipo 0 y 1. El Cuadro N°7 muestra las características que conforman los diferentes clústeres establecidos en la aplicación del algoritmo *K-means*. En dicho Cuadro, es importante destacar que los incendios provocados por actividades pecuarias e ilícitas y cazadores se encuentran entre los incendios con mayores emisiones de CO_2 , mientras que los asociados con la quema de basura destacan por extenderse en mayores superficies.

Figura N°9.

Agrupamientos (clústeres) considerando emisión de CO_2 , superficie y tipo de causa



Fuentes: Elaboración propia a partir de datos de IDEFOR, CONAFOR, SNIGF, RUSE y SEDEMA.

Cuadro N°8.
Características de clústeres aplicando *K-means*

Clúster	Emisión CO ₂	Superficie	Causa
0	2 - 1006	2 - 2362	Act. ilícitas (Vandalismo)
1	2 - 2382	0 - 10608	Act. intencionales (quema de pastos)
2	0 >15000	2 - 4420	Act. pecuarias e ilícitas y cazadores
3	0 - 2124	2 - 608	Act. agrícolas y agropecuarias

Fuente: Elaboración propia

La variabilidad de consecuencias que los incendios forestales pueden ocasionar a estos espacios afecta de manera directa a la biodiversidad presente en el suelo de conservación, ya que tras un incendio se produce pérdida de fertilidad del suelo, originando, en muchas ocasiones, suelos completamente estériles, lo que dificulta la recolonización de la vegetación autóctona. Además, hay que tener presente que este tipo de eventos hacen más impermeable al suelo y, como consecuencia, resulta más difícil que el agua sea absorbida, por lo que las bacterias y hongos, organismos indispensables para los procesos vitales del suelo, también resultan afectados, incrementando los niveles de erosión (Inbar et al., 2014; De Girolamo et al., 2022). En consecuencia, la pérdida de suelo fértil es uno de los costos más elevados causado por los incendios forestales (Nogal, 2020). Además, se debe considerar que la presencia de incendios, y sus posteriores consecuencias, afecta y ahuyenta a la fauna de aquellos espacios naturales donde tienen su hábitat natural. Por tanto, este análisis espacio-temporal del acoso de los incendios forestales al suelo de conservación debería ser utilizado para identificar zonas de actuación prioritaria para la restauración de los ecosistemas, contribuyendo a la propuesta de Naciones Unidas, conforme a los espacios que se han identificado con una mayor afectación.

Conclusiones

El desarrollo de este trabajo nos permite afirmar que el conjunto de esfuerzos implementados para proteger a este espacio tan significativo no ha logrado frenar el acoso ambiental producido por el ser humano. Desafortunadamente, el vandalismo generado por diversión, intencionalidad o ignorancia han ocasionado este acoso que impacta diariamente a este espacio. Asimismo, la presión demográfica impacta sobre el suelo de conservación a través de la búsqueda de espacios no aptos para habitar, lo que deriva en una invasión ilegal de los espacios del suelo de conservación. A esta situación, en ocasiones, se le une la compra-venta de terrenos carentes de seguridad, servicios básicos y, especialmente, de documentación que ofrezca legalidad de la propiedad. La presión que ejerce este contexto sobre el suelo de conservación se ve agravada por los incendios forestales.

La identificación del acoso sufrido por el suelo de conservación de la Ciudad de México abordado en este trabajo tuvo algunas limitantes, principalmente, por la carencia y completitud de la información disponible. No obstante, centrarnos en una de las principales problemáticas del suelo de conservación, como es el caso de los incendios forestales, pretendía demostrar la afectación que ha tenido la intervención humana en este espacio durante el periodo 2015 - 2020.

El vandalismo se posiciona como la causa principal que ha ocasionado incendios forestales en la zona de estudio. El análisis desarrollado nos ha permitido identificar concentraciones, especialmente, en alcaldías de mayor superficie y en espacios similares o muy cercanos, pero con diversidad en cuanto a su manifestación temporal. Esta situación ocasiona que el suelo afectado no tenga el tiempo necesario para recuperarse, ya que se necesita un intervalo de entre 1 a 5 años para que un suelo vuelva a ser fértil, periodo que no se ha cumplido en los principales puntos de concentración de los incendios forestales. Desde la dimensión temporal, también merece destacarse que el año 2020 tuvo un porcentaje de afectación sobre este espacio de tan solo el 2%, lo que supone una disminución considerable con respecto al año 2019 (6.4%). Este escenario, claramente, obedece a la pandemia por COVID-19 y a las prohibiciones de acceso a espacios públicos que se produjeron durante la misma.

No obstante, reducir los incendios forestales no debe estar asociado a una causa colateral, lo que se necesita son campañas de educación ambiental y de concienciación sobre los riesgos asociados a la destrucción del suelo de conservación. Para la creación de estas campañas se necesita integrar no solo a las alcaldías que conforman el suelo de conservación, sino a toda la Ciudad de México con el fin de realizar campañas amplias de educación, incluso que abarquen a todo el país. Además, se deben proponer y vigilar la creación y el cumplimiento de protocolos dirigidos a proteger este espacio, produciendo un trabajo conjunto de diferentes actores del gobierno, instituciones y sociedad civil.

Con respecto a los impactos ocasionados por incendios forestales, éstos han dejado huella en el uso de suelo de conservación, así como es sus ecosistemas y cobertura vegetal, afectaciones que con el pasar del tiempo tendrán fuertes repercusiones que no habrá vuelta atrás para erradicarlas. Es por ello que la conservación de este suelo es punto fundamental para tomar acciones y propuestas encaminadas a salvaguardar espacios de suma importancia como lo es el suelo de conservación de la Ciudad de México.

Este trabajo evidencia que el mundo desarrollado potencialmente enfrenta costos enormes debido a la necesidad de restaurar y proteger el medio ambiente para salvaguardar los recursos naturales para las generaciones futuras. En los países en desarrollo, como es el caso de México, deben considerar cómo se puede combinar su desarrollo económico y social con la protección al medio ambiente y la preservación de sus recursos naturales, no como un lujo, sino como una necesidad en busca de fomentar el desarrollo sostenible (Slootweg et al., 2001).

Agradecimientos

Los autores agradecen los comentarios y aportaciones, realizados por revisores anónimos, que sirvieron para enriquecer este trabajo.

Referencias

Avila-Flores, D.; Pompa-Garcia, M.; Antonio-Nemiga, X.; Rodriguez-Trejo, D.A.; Vargas-Perez, E. & Santillan-Perez, J. Driving factors for forest fire occurrence in Durango State of Mexico: A geospatial perspective. *Chinese Geographical Science*. 2010, 20(6), 491-497. <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0437-x>

Ambiental, D. E. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 2016. http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/fuentes_agua.html

CENAPRED. Centro Nacional de Prevención de Desastres. 25 de Abril de 2019. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/incendios-forestales-evitalos>

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) Protección, restauración y conservación de suelos forestales. 5ª Edición. 2018. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>

De Girolamo, A.M.; Cerdan, O.; Grangeon, T.; Ricci, G.F.; Vandromme, R. & Porto, A.L. Modelling effects of forest fire and post-fire management in a catchment prone to erosion: Impacts on sediment yield. *Catena*, 2022, 212, 106080. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106080>

Dirección de Ordenamiento Ecológico, Dirección de Centros Regionales, Dirección de Comunicación e Información. Libro Suelo de Conservación. 2016. México, Ciudad de México. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Libro_Suelo_de_Conservacion.pdf

Ester, M.; Kriegel, H.-P.; Sander, J. & Xu, X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1996, pp. 226–231. Portland, OR.

FAO. Comisión forestal para América Latina y El Caribe. Prevención y control de incendios forestales. Tema 7(a) del Programa Provisional. 2000. <https://www.fao.org/3/x5984s/x5984s.htm>

Federal, G. O. Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal. 18 de Noviembre de 2015. <http://aldf.gob.mx/archivo-7845786f92c3b622b145b6ff08beaf41.pdf>

Graham, O. P. Survey of land degradation in New South Wales, Australia. *Environmental Management*, 1992, 16(2), 205-223. <https://doi.org/10.1007/BF02393826>

Inbar, A.; Lado, M.; Sternberg, M.; Tenau, H. & Ben-Hur, M. Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region. *Geoderma*, 2014, 221, 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.015>

IPBES. El Informe de la Evaluación Mundial sobre la diversidad biológica y los servicios de los ecosistemas. Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES). 2019. ISBN: 978-3-947851-16-4. https://ipbes.net/sites/default/files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_es.pdf

Kanevski, M.; Pozdnukhov, A. & Timonin, V. Machine Learning Algorithms for Geospatial Data. Applications and Software Tools. 4th International Congress on Environmental Modelling and Software. 2008. Barcelona, Catalonia (Spain).

Lupton, R. C. & Allwood, J. M. Hybrid Sankey diagrams: Visual analysis of multidimensional data for understanding resource use. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 124, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.05.002>

MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1967, Oakland, CA, USA, pp. 281–297.

Martínez, R.; Zambrano, E.; Nieto López, J.J.; Hernández, J. & Costa, F. Evolución, vulnerabilidad e impactos económicos y sociales de El Niño 2015-2016 en América Latina. *Investigaciones Geográficas*, 2017, 68, 65–78. <https://doi.org/10.14198/INGEO2017.68.04>

Naciones Unidas. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. 2018. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>.

Naciones Unidas. (s.f.). Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>

Nogal, A. D. La contaminación. 2 de Junio de 2020. <https://lacontaminacion.org/impacto-ambiental-de-los-incendios-forestales/>

Ortíz-Pech, R.; Fajardo Celis, H. E. & García Gil, G. Impacto de las actividades productivas y de la expansión urbana sobre una reserva ecológica; el caso de Cuxtal, Yucatán; México. *Nóesis: Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 2017, 26(52), 1-22. DOI: <http://dx.doi.org/10.20983/noesis.2017.2.1>

Paudel, J. Short-run environmental effects of COVID-19: Evidence from forest fires. *World Development*, 2021, 137, 105120. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105120>

Poulter, B.; Freeborn, P.H.; Jolly, W.M. & Varner, J. M. COVID-19 lockdowns drive decline in active fires in southeastern United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(43), e2105666118.

Sannigrahi, S.; Pilla, F.; Maiti, A.; Bar, S.; Bhatt, S.; Zhang, Q. ... & Cerda, A. Examining the status of forest fire emission in 2020 and its connection to COVID-19 incidents in West Coast regions of the United States. *Environmental Research*, 2022, 210, 112818.

Schmidt, M. The Sankey diagram in energy and material flow management: part II: methodology and current applications. *Journal of industrial ecology*, 2008, 12(2), 173-185. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00015.x>

Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, Coordinadora Nacional de Protección Civil, & Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). *Incendios forestales. Serie Fascículos*. 2021. <https://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/159-FASCCULOINCENDIOSFORESTALES.PDF>

SEGOB, CENAPRED, & SEMARNAT. (S.f.). ¿Qué es un incendio forestal? <https://www.uaem.mx/sites/default/files/que-es-un-incendios-forestalpdfShQAu9q8F6.pdf>

Shawe T. J. & Cristianini, N. Kernel methods for pattern analysis. 2004. *Cambridge University Press*. ISBN: 0521 813972

Slootweg, R.; Vanclay, F. & Van Schooten, M. Function evaluation as a framework for the integration of social and environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2001, 19(1), 19-28. <https://doi.org/10.3152/147154601781767186>

The Data Visualisation Catalogue. (s.f.). Diagrama de Sankey. https://datavizcatalogue.com/ES/metodos/diagrama_de_sankey.html

Urzúa Valenzuela, N. V. & Cáceres Bueno, M. F. Incendios forestales: principales consecuencias económicas y ambientales en Chile. *RIAT: Revista Interamericana de Medioambiente y Turismo*, 2011, 7(1), 18-24. <https://riat.atalca.cl/index.php/test/article/view/108/74>

Wu, X.; Kumar, V.; Quinlan, J. R.; Ghosh, J.; Yang, Q.; Motoda, H. ... & Steinberg, D. Top 10 algorithms in Data mining, *Knowl. Inf. Syst.* 2008. <https://doi.org/10.1007/s10115-007-0114-2>

