

Acercamiento al régimen de fuego de la Sierra de Guadalupe (2013-2021), Valle de México

An approach to the fire regime of the Sierra de Guadalupe (2013-2021), Valley of Mexico

 **Mendoza-Ruiz, Erick Eduardo**^{1*}

 **Rodríguez-Trejo, Dante Arturo**^{2†}

 **Granado-Sánchez, Diódoro**²

 **Corona-Ambriz, Alejandro**²

 **Pérez-Hernández, María Jesús**²

¹Centro GEO, Ciudad de México, México

²Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México

Recibido: 14 Feb. 2025 | **Aceptado:** 20 Jun. 2025 | **Publicado:** 20 Jul. 2025

Autor de correspondencia*: mcerickmendoza23@gmail.com

Como citar este artículo: Mendoza-Ruiz, E. E., Rodríguez-Trejo, D. A., Granado-Sánchez, D., Corona-Ambriz, A. & Pérez-Hernández, M. J. (2025). Acercamiento al régimen de fuego de la Sierra de Guadalupe (2013-2021), Valle de México. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 4(2), e917. <https://doi.org/10.51252/reacae.v4i2.e917>

RESUMEN

El fuego es la principal perturbación que configura el paisaje de la Sierra de Guadalupe y es provocado por el hombre. Conocer el régimen de fuego es fundamental para el manejo ecológico, el objetivo de este artículo es describir el área quemada, tipo de incendio, forma de incendio y frecuencia de la Sierra de Guadalupe, usando imágenes aéreas, el visualizador SPPIF (2022) e índices espectrales. El área que se incendió cada año en promedio fue de 435 ha. Se recomienda liberar de combustible las zonas que no han sido perturbadas, incluyendo el bosque de encino, el ecosistema más prístino de la Sierra de Guadalupe.

Palabras clave: ecología del paisaje; incendios forestales; manejo de fuego; régimen de fuego; SIG; teoría de perturbaciones

ABSTRACT

Fire is the main disturbance that shapes the landscape of the Sierra de Guadalupe and is caused by humans. Understanding the fire regime is essential for ecological management. The goal of this article is to describe the burned area, type of fire, fire behavior, and frequency in the Sierra de Guadalupe, using aerial images, the SPPIF (2022) viewer, and spectral indices. The area burned each year on average was 435 ha. It is recommended to remove fuel from areas that have not been disturbed, including the oak forest, the most pristine ecosystem of the Sierra de Guadalupe.

Keywords: fire regime; fire management; GIS; landscape ecology; perturbation theory; wildfire

1. INTRODUCCIÓN

La Sierra de Guadalupe es un sistema de microcuencas que está totalmente ocupada en sus zonas bajas por tejido urbano consolidado con alta densidad de población. Los incendios en la SG siempre son provocados (SPPIF, 2022) y suelen extinguirse por intervención de las brigadas forestales y voluntarias. También existen quemadas controladas iniciadas y sofocadas por personal autorizado. De esta manera se establece que el fuego en la SG es de origen antropogénico. Este fuego está íntimamente relacionado con la configuración y dinámica del paisaje (McLauchlan et al., 2020) y cada uno de sus aspectos es relevante en su medio, la intensidad del fuego determinará la sobrevivencia de las plantas, la frecuencia de estos determinará la composición botánica del sitio, la cantidad de volumen de combustible determinará la intensidad del fuego, y así cada aspecto del fuego tiene importancia en su paisaje. El conjunto de estas características (tantas sean posibles y útiles), desde las que se puede definir el comportamiento del fuego en el tiempo y el espacio se llama régimen de fuego (McLauchlan et al., 2020).

En este artículo buscamos ofrecer información que permita avanzar en la caracterización del régimen de fuego en la SG, acercándonos específicamente a cuatro características: área quemada por año, frecuencia de los incendios, tipo de incendio y forma de los incendios. Se propone un acercamiento al régimen de fuego de la SG que se considera antropogénico porque el fuego termina y comienza por motivaciones humanas (sea institucional o por vandalismo o ritualismo). Es un trabajo pertinente porque el régimen de fuego en la Ciudad de México ha sido poco estudiado, y no existen análisis específicos para la Sierra de Guadalupe, el último reducto verde al norte de la ciudad. Su caracterización requiere evaluar frecuencia, intensidad y factores climáticos y antrópicos, fundamentales para comprender sus impactos ecológicos y la gestión del territorio.

Debido a las limitaciones de resolución espacial de los sensores que usamos, el incendio más pequeño que se detectó tuvo un área cercana a 1500 m². Aquellos fuegos forestales (controlados e incendios) que fueron mapeados comprobaron el papel del fuego sobre los diferentes ecosistemas (Rodríguez-Trejo, 2014) de la zona de estudio: el fuego es el disturbio que configura el paisaje con más rapidez en la Sierra de Guadalupe. Se extiende principalmente sobre pastizales y matorrales mismos que están adaptados a los fuegos frecuentes, y conservan sus raíces para retoñar a las primeras lluvias. En menor frecuencia se extiende sobre coberturas forestales actuando como un agente de aclareo para los individuos suprimidos, promoviendo los retoños en las raíces y troncos de los eucaliptos, lo que cierra el sotobosque del sitio, aunque en este periodo en específico, no se registró la desaparición de un bosque por causas del fuego, en fechas posteriores sí se presentaron casos, también existe una proporción del paisaje que no se incendió en el periodo estudiado, algunos de ellos son matorrales muy viejos que no han experimentado fuego, probablemente en décadas, pero que indefectiblemente se incendiarán en algún momento, sirva este documento para tenerlas en vista.

El dramatismo del fuego forestal en las ciudades genera preocupaciones entre los habitantes, lo que promueve su exclusión absoluta. Empero, el efecto de la supresión absoluta del fuego, puede destruir algunos de los ecosistemas más importantes del mundo (Shive et al., 2022); de igual forma, su uso inconsciente puede provocar la destrucción de hábitats. Aun así, los fuegos forestales no dejarán de suceder en la Sierra de Guadalupe, el régimen de fuego antropogénico puede ser aleatorio y vandálico o prescrito y consciente. El objetivo de este documento es describir algunas características del régimen de fuego antropogénico en la Sierra de Guadalupe a partir de los incendios del periodo 2013-2021, por lo que este trabajo podría aportar elementos de discusión para el manejo del fuego en la Sierra de Guadalupe.

En un plan ideal de manejo de fuego, se podrían incluir estrategias relacionadas al área quemada, diseñando la sucesión ecológica por ejemplo de pastizal a copal, cacahuete, pino piñonero (árboles tolerantes al fuego)

usando el fuego de los vándalos, en vez de desperdiciar recursos en suprimirlo en el momento, o diseñando parámetros de vivero para producir plantas con características que soporten la frecuencia del fuego específicas para cada sitio. También la frecuencia puede ser aprovechada para plantear estrategias como la intervención socioambiental en la población para concientizar en las colonias que presenten más incendios. El monitoreo del tipo de incendio puede ayudar a planificar planes de poda de ramas inferiores, interrumpiendo la continuidad vertical del combustible en sitios que no han sido quemados en varios años, previniendo los incendios de copa, o bien, se promueven estas quemadas de copa con un sustento técnico también basado en mapas de la misma temática que aquí se presentan, con información más actual. La descripción de forma de incendio es muy breve, la intención es exponer que los incendios de la SG son frecuentemente delimitados por construcciones y barreras físicas naturales que conviene registrar para modelar el fuego que se presentará en el futuro. En todas estas características y en todas las que no se incluyeron que respectan al régimen de fuego existe un hueco de conocimiento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Sierra de Guadalupe es el conjunto de 27 microcuencas exorreicas con una extensión de 16 813 ha en las que está incluida una masa urbana que alberga a millones de personas. Su cota más baja corresponde a 2225 msnm y el punto más alto alcanza 3000 msnm, el tejido urbano consolidado ocupa todas las zonas bajas de las cuencas hasta los 2600 msnm en sus puntos más altos. Su matriz (es decir, son matorrales y pastizales, y los mosaicos son bosquetes de diferentes composiciones y estructuras. Los pastizales y matorrales que son sometidos al fuego frecuentemente son dominados por los pastos menores a un metro de altura y con árboles aislados como eucalipto (*Eucaliptus globulus* y *Eucaliptos camaldulensis*) y pirul (*Schinus molle*) principalmente, pero también con gran variedad de otros árboles entre los que destacan el copal (*Bursera cuneata*), cazahuate (*Ipomoea murucoides*) entre otros.

También se encuentran bosquetes, los más extendidos son de eucalipto y pirul, pero pueden encontrarse mezclados o con árboles aislados, en diferentes densidades. Son escasas las plantaciones de pino, casuarina y cedro blanco, así como una masa forestal de encino importante en la cima la Sierra, que constituye la zona más prístina. La Sierra de Guadalupe es un paisaje fuertemente perturbado, pero es el único espacio verde a tres kilómetros a la redonda, sobre la que recaen la prestación de los escasos servicios ambientales que pueden gozar millones de personas, también es un cinturón de marginación.

Para que sea clara la comparación entre el comportamiento del fuego en diferentes sitios de la Sierra, se dividió en 12 zona, correspondientes a grupos de microcuencas, o elevaciones, pero sin su parte urbana, que además coinciden un poco con las demarcaciones municipales.

Criterios de selección de incendios

Debido a la resolución espacial y temporal de los sensores que usamos, se mapearon solo los incendios que tuvieron una extensión mayor a 1500 m² y cuya área quemada fue captada en tomas satelitales cada año, también así, para la fecha en que terminó la fase de análisis de este artículo, solo existían datos para el periodo designado. En la Sierra de Guadalupe son numerosos los conatos de incendio, es probable que se cuenten por cientos, pero no existe registro de todos, por lo que solo mapeamos aquellos que fueron distinguibles en las imágenes y datos. Así mismo, los incendios subterráneos y superficiales bajo dosel, no pueden distinguirse desde las imágenes satelitales, y no fueron mapeados.

Metodología para la detección y delimitación de incendios

Para delimitar las áreas afectadas, se usaron tres herramientas: Google Earth, el índice NBR (Chuvieco et al., 2008) y el SPPIF (2022). Para delimitar las áreas quemadas primero se obtuvo el índice espacial NBR con datos Landsat y Sentinel de la toda la Sierra de Guadalupe con QGIS (2023), luego se comparó con los datos puntuales del SPPIF (2022), y por último se dibujaron los incendios manualmente, apoyándose del índice espectral, de los datos puntuales y del reconocimiento de texturas y colores, las tablas de frecuencia y extensión que aquí se presentan se elaboraron en Excel (Microsoft, 2019), mientras que en análisis de la frecuencia fue procesado en Rstudio (R Core Team, 2020). Para el índice NBR se obtuvieron imágenes de dos satélites: Landsat 8 con 30 metros de resolución espacial para el periodo 2013 a 2016 y Sentinel 2A con 10 metros de resolución espacial de 2017 al 2021. El Índice NBR (Normalized Burn Ratio) (Ecuación 1) relaciona los valores de reflectancia de los pixeles para detectar áreas quemadas (Chuvieco et al., 2008).

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

Donde:

NIR = Infrarrojo cercano

SWIR = Infrarrojo de onda corta

Primero se identificaron todas las zonas cuyos pixeles eran de un NBR mayor a 0.06. Estas zonas se confunden con matorrales y sombras muy oscuras, por esta razón fue necesario corroborar con las imágenes disponibles en Google Earth. Varios incendios inadvertidos en Google Earth fueron fácilmente encontrados por el Índice NBR, a su vez, muchas zonas quemadas detectadas por el NBR en realidad no lo eran.

Luego, los polígonos de área quemada fueron trazados a mano alzada. Los incendios dejan una marca que es visible después de varios años, por ejemplo, el pasto que crece después de un siniestro tiene un color muy distinto a aquel que le colinda y no fue quemado, o bien las cenizas perduran en el suelo dándole un color más oscuro, también, algunos árboles mueren e indican los límites del fuego, de tal manera que se usaron distintos criterios para trazar lo que se observa en las imágenes del pasado en un archivo vectorial. Por último, se corroboró la información con la base de datos del SPPIF (SPPIF, 2022), algunos incendios que se encontraron no están registrados en el SPPIF, y también el SPPIF indicó otros que se habían omitido.

Los componentes del régimen de fuego que se describen son: análisis espacial del área quemada (horizontal, vertical y serie de tiempo), tipo, forma, y frecuencia de incendios.

Análisis espacial y temporal de incendios

El análisis espacial consistió en extraer el área de cada polígono (QGIS, 2023), los polígonos se almacenan en una capa por cada año, el área se calcula desde la calculadora de campos y se transforman todas las capas a formato .csv para sistematizar la información en tablas dinámicas (Microsoft, 2019), los datos se presentan en relación con la vegetación primero, después por zonas de estudio, y al final se descompone en una serie de tiempo. Se trazaron zonas de estudio a partir de 12 microcuencas delimitadas por la frontera urbana. La similitud de las zonas con las microcuencas se muestra en las Figuras 1 y 2.

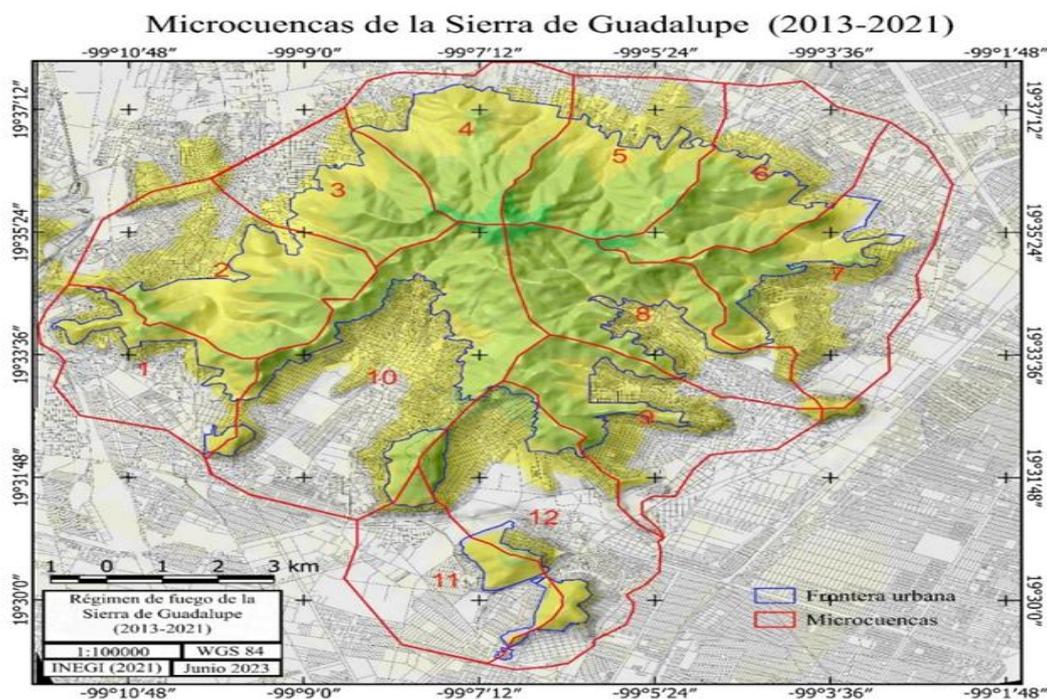


Figura 1. Microcuencas de la Sierra de Guadalupe

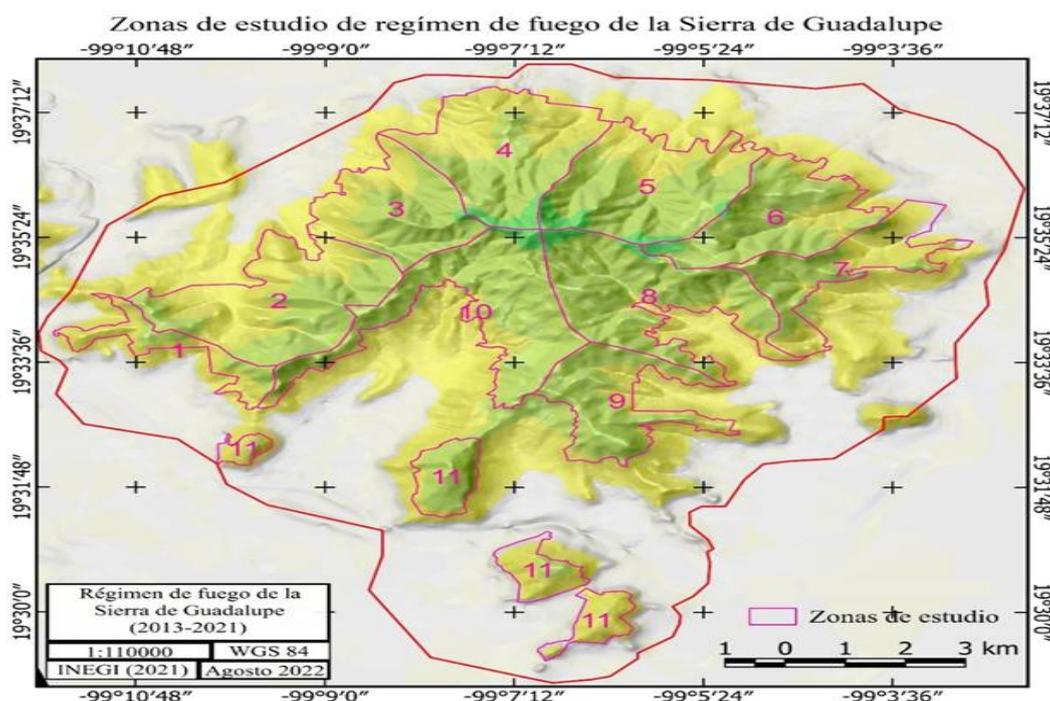


Figura 2. Zonas de estudio de régimen de fuego

La extensión de la microcuena 12 que se encuentra en el macizo principal de la Sierra de Guadalupe fue incluida en la zona de estudio correspondiente a la microcuena 9. Las elevaciones del Tenayo, Chiquihuite, Zacatenco, Guerrero y Gachupines, es decir, todos los cerros aislados, se agruparon en una zona de estudio. No se contempló el Cerro del Tepeyac, pues no se permite de ninguna manera el fuego, pues está presente la basílica de Guadalupe.

Por último, se analizó gráficamente el área quemada, descomponiéndola como una serie de tiempo (Racine, 2019) con la librería decompose de Rstudio (R core team, 2020), que devuelve tres funciones: tendencia,

estacionalidad y aleatoriedad. El criterio de estacionalidad fue igual a dos porque cada año tiene dos temporadas, la temporada de incendios y la temporada de lluvia. En la temporada de incendios se acumula toda el área quemada, y en la temporada de lluvia, el área quemada se iguala a 0.

Clasificación y descripción de incendios

Los incendios superficiales son los que se desarrollan encima del suelo sin llegar a las copas, cuando el fuego las alcanza, se convierten en incendios aéreos, también existen los que se propagan bajo el suelo y reciben el nombre de subterráneos. Los incendios aéreos son evidentes desde las imágenes aéreas, y los superficiales también cuando estos se desarrollan en sitios donde no hay cobertura forestal. De tal manera que los incendios superficiales que se presentaron bajo el dosel y los incendios subterráneos no fueron mapeados.

Para describir la frecuencia de fuego, se identificaron los polígonos donde los incendios se traslaparon. Cada una de estas zonas tuvo una frecuencia menor a nueve años (tiempo de observación), y las zonas donde el fuego no llegó a propagarse, por efecto de los combatientes forestales, o no se presentó, tuvieron una frecuencia mayor a nueve años. Así mismo se presenta los percentiles de recurrencia de área quemada estimados con la función `sapply` de Rstudio (R team core, 2020) así como la desviación estándar y media.

La mayoría de los incendios recurrentes en la misma zona no tuvieron un periodo de retorno uniforme. Algunas zonas se incendiaron cada año durante un lustro, y después permanecieron sin fuegos en varios años, este fenómeno no se representa en los resultados (frecuencia de los incendios en la Sierra de Guadalupe), ya que ese presenta un mapa simplificado que representa los intervalos como si fueran uniformes. La geometría fractal del paisaje es también válida para los incendios, de esta manera en los resultados para frecuencia de fuego se encuentra el arreglo fractal para la escala 1:100 000.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer resultado corresponde al área quemada. En la Figura 3 se observa el trazo de los incendios forestales que se presentaron en la Sierra de Guadalupe en el periodo 2013 a 2021.

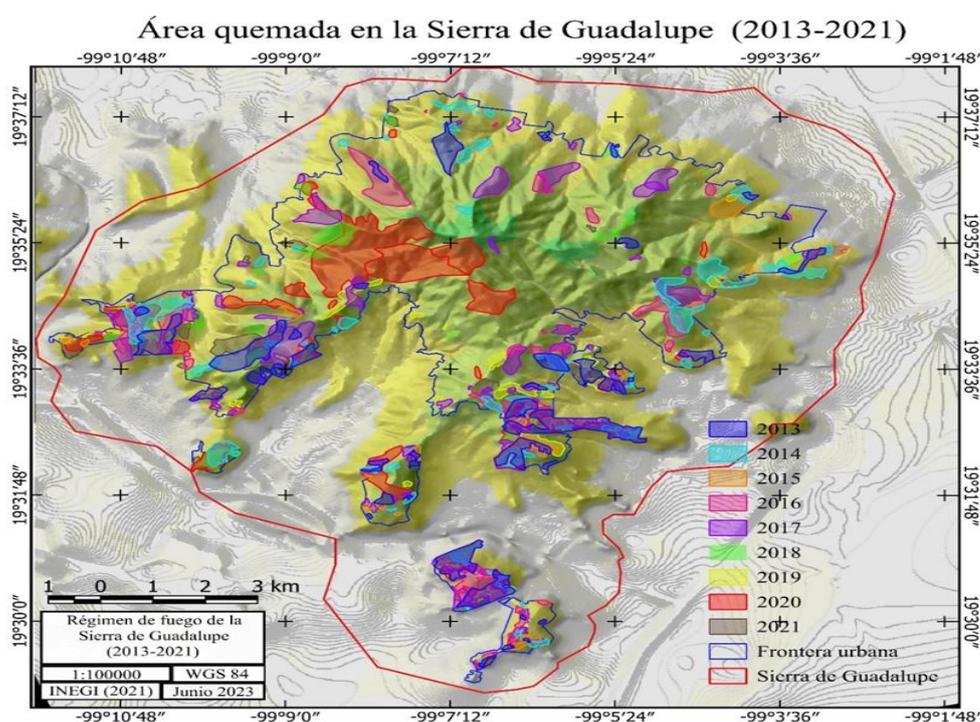


Figura 3. Incendios en la Sierra de Guadalupe a escala 1:100000 (2013-2021)

En la Tabla 1 se observa la superficie quemada durante el periodo del 2013 al 2021. En nueve años, el fuego quemó 3 918.42 hectáreas aproximadamente. El 2020 fue el año con más superficie quemada, representando el 5% del área protegida de la Sierra (850.79 ha), y el año con menor superficie fue el 2019, con tan solo el 1.5% (253 ha).

Tabla 1.*Extensión de la superficie quemada (hectáreas) por año y por tipo de vegetación*

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Suma
Bosque de encino	7.12	3.24	1.09	7.27	8.22	1.34	0.00	29.51	0.40	58.19
Bosque heterogéneo	9.01	7.07	0.26	4.46	12.31	7.25	2.99	69.14	5.41	117.90
Bosque natural/ plantación de pirul	67.12	5.10	5.40	35.66	30.10	2.39	5.62	17.36	29.03	197.78
Plantación de eucalipto	67.84	18.51	2.94	11.77	89.22	19.40	31.30	76.62	23.46	341.06
Plantación de cedro blanco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.16	0.00	4.16
Plantación de pino	0.02	0.00	0.00	1.16	0.58	0.00	0.00	0.12	0.00	1.88
Matorral, pastizal	134.67	2.85	28.91	128.55	2.00	44.03	102.59	458.57	53.13	955.30
Pastizal, matorral	62.29	0.00	88.71	69.50	61.84	0.67	5.17	14.18	40.37	342.73
Matorral	14.14	108.88	3.10	29.35	42.45	73.34	13.61	31.52	8.31	324.70
Pastizal	215.17	224.52	95.75	114.26	291.20	250.39	91.74	149.61	142.08	1574.72
Suma	577.38	370.17	226.16	401.98	537.92	398.81	253.02	850.79	302.19	3918.42

La comunidad menos afectada fueron las masas forestales de casuarina, que no habían sido incendiados pues representan muy poca extensión en la Sierra de Guadalupe, mismo caso que el pino y cedro blanco que apenas acumularon unas cuantas hectáreas. De los cientos de hectáreas de coníferas que se establecieron en la Sierra de Guadalupe (Sierra Pineda et al., 1987), ahora solo existen unas cuantas masas forestales, pero muchos árboles aislados, o en pequeños grupos, dispersos en todos los ecosistemas de la Sierra. Por lo que es natural que estas poblaciones, ya diezmadas, no representen una gran extensión en la estadística. Los matorrales y pastizales, que componen la mayor extensión de la Sierra de Guadalupe, han sido sometidos a fuegos en al menos 3 197 ha, algunos se presentaron en el mismo lugar año con año, o bianualmente.

Son los ecosistemas sin vegetación arbórea los que experimentan más cambios en menor tiempo por la acción del fuego, también son los más extensos de la Sierra de Guadalupe y componen la matriz del paisaje. En la Tabla 2 se muestran los máximos, promedios y mínimos de área quemada para cada categoría (los años en los que se presentó el mínimo y máximo está entre paréntesis).

Tabla 2.*Estadísticos por vegetación*

	Mínimo	Media	Máximo
Bosque de encino	0 (2019)	6.46	29.51(2020)
Bosque heterogéneo	0.26(2015)	13.10	69.14(2020)
Bosque natural/plantación de pirul	2.39(2018)	21.98	67.12(2013)
Plantación de eucalipto	2.94(2015)	37.90	89.22(2017)
Plantación de cedro Blanco	0	0.46	4.16(2020)

Plantación de pino	0	0.21	1.16(2016)
Matorral, pastizal	2(2017)	106.14	458.57(2020)
Pastizal, matorral	0(2014)	38.08	88.71(2015)
Matorral	3.1(2015)	36.08	108.88(2014)
Pastizal	91.74(2019)	174.97	291.20(2017)
Suma	102.43	435.38	1207.67

De la tabla 2 se desprenden tres escenarios hipotéticos, el que se vería menos perturbado, el escenario promedio y el escenario extremo. En el caso en que los ecosistemas se vieran disturbados en la menor medida que han registrado en un mismo año, el área quemada (102.43 ha) sería apenas 0.6% de la Sierra de Guadalupe. En un año cualquiera, el área quemada esperada será cerca de 435.38 hectáreas (2.6% del total de la Sierra). Si en la Sierra de Guadalupe se diera la mayor perturbación registrada en un mismo año, se vería afectada en un 7.85% (1 319.9 ha). Contrastando la matriz del paisaje (matorrales y pastizales) con sus mosaicos (masas forestales), podemos observar que la matriz va a incendiarse en cuando menos 96.84 hectáreas. En la superficie arbolada se puede esperar al 5.59 hectáreas por año. En promedio, la matriz cambiará en al menos 355.27 hectáreas por causas de fuego, las masas forestales solo lo harán en 80.11 hectáreas como mínimo. En el escenario extremo, las masas forestales serán incendiadas en un orden de 260.31 hectáreas, mientras que, en la matriz del paisaje, los fuegos impactarán sobre 947.36 hectáreas.

Para utilidad de los manejadores de esas zonas, en la Tabla 3 se presentan las estadísticas de incendios dividida por cada zona de estudio (Figura 2), entre paréntesis se indican los años en que se dio cada evento mínimo y máximo.

Tabla 3.

Estadísticas por extensión

Zona de estudio	Jurisdicción	Mínimo	Media	Máximo
1	Tlalnepantla	8.67(2015)	26.9	45.62(2020)
2	Tultitlán y Tlalnepantla	22.2(2015)	73.9	130.88(2020)
3	Tultitlán	0(2015, 2019)	49.28	189.93(2020)
4	Coacalco y Tultitlán	0(2019)	16.69	38.13(2013)
5	Coacalco y Ecatepec	0(2015, 2020)	15.54	58.89(2017)
6	Ecatepec y Coacalco	0(2021)	11.75	32.3 (2015)
7	Ecatepec	7.55(2016)	36.09	91.74(2014)
8	Ecatepec y Tlalnepantla	1.76(2021)	19.01	44.51(2016)
9	Tlalnepantla y Ecatepec	52.31(2015)	84.18	190.35(2013)
10	Gustavo A. Madero	1.87(2021)	39.16	210.64(2020)
11	Gustavo A. Madero y Tlalnepantla	42.67(2019)	80.42	139.11(2020)

La sumatoria de los vectores del Cuadro anterior es congruente con la del Cuadro 2, por lo que se pueden usar como indicadores año con año. Las zonas de estudio que han presentado mayor área quemada son 10, 9, 3, 11 y 2. Las que no han desarrollado incendios lo suficientemente importantes para registrar algunas hectáreas en los nueve años de estudio han sido la 3, 4, 5, 6, 8 y 10. En promedio, en cada zona de estudio los incendios se presentaron en cuanto menos 11.75 hectáreas y hasta 84.18 hectáreas. Las zonas de estudio 3, 5, 7, 9 y 11 tienen una diferencia de años entre la mínima perturbación y la máxima perturbación de menos de tres años. En la zona de estudio 3 y 11 primero se presentó un gran consumo de combustibles y luego años de poca perturbación. En las zonas 5, 7 y 9 primero se presentó poca área quemada y luego el año de perturbación máxima.

Una vez descompuesta la serie de tiempo correspondiente al área quemada (R Core Team, 2020) no se detecta variación aleatoria. Es decir, el área quemada al año solo puede ocurrir en temporada seca, sin

variación alguna. Entonces es la tendencia el único componente que realmente brinda información. En la Figura 4 se observa la descomposición de la serie de tiempo.

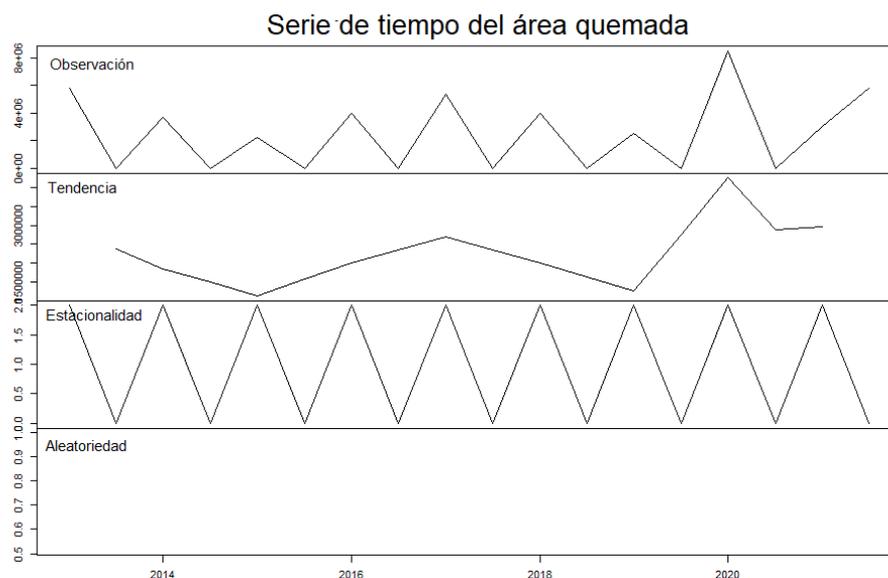


Figura 4. Series de tiempo del área quemada

La tendencia no es lineal, pero es cíclica, lo que reafirma la dinámica de acumulación y liberación de energía y combustibles cada dos años. La tendencia después del 2019 se elevó al doble de lo que se había presentado desde 2013.

El segundo resultado corresponde al tipo de incendio. Los incendios aéreos suelen ser los de mayor intensidad por el combustible que se consume en ellos (Muñoz, 2001). Para definir el régimen de fuego antropogénico en la Sierra de Guadalupe analizaremos los tipos de incendio que en ellos se desarrolló. Se advierte que los incendios subterráneos son escasos o nulos. Evidentemente, la matriz del paisaje no experimentó incendios aéreos, los matorrales más desarrollados y altos no fueron afectados en este periodo de tiempo. Por esta razón, en la Tabla 4 solamente se analiza el porcentaje de incidencia de incendios aéreos con respecto al año.

Los incendios aéreos representan el 5.48% en promedio del total de incendios en la Sierra. Siendo el eucalipto el ecosistema más impactado por el fuego aéreo (41.66 ha en 2017) y los menos afectados fueron las plantaciones de casuarina, pino y cedro blanco. El área de la suma de todos los incendios aéreos es igual a 298.21 ha, es decir, 7.6% de todos los incendios que se registraron para este estudio en la Sierra de Guadalupe.

Tabla 4.

Porcentaje de incendios aéreos con respecto a su año y ecosistema

Ecosistema/Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Bosque de encino	0.37	0.22	0.00	1.81	0.79	0.00	0.00	3.45	0.00
Bosque heterogéneo	0.00	0.73	0.00	0.22	1.92	0.00	0.00	4.84	0.00
Bosque natural/ plantaciones de pirul	2.39	0.00	0.00	0.00	3.17	0.00	0.00	0.37	5.09
Plantación de cedro blanco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00

Plantación de eucalipto	5.96	0.15	0.00	1.60	7.75	1.09	0.00	7.17	0.00
Plantación de pino	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.01	0.00
Suma del porcentaje de incendios aéreos	8.73	1.10	0.00	3.62	13.73	1.09	0.00	15.94	5.09
Área total de incendios (por año)	577.40	370.16	226.17	401.97	537.91	398.81	253.02	850.79	302.19

El tercer resultado es la descripción de las formas del incendio. En la misma definición del régimen de fuego cabe el concepto de forma. En la Sierra de Guadalupe el promedio de área de polígonos quemados alcanza las 5.7 ha, siendo el más importante de estos un incendio que se presentó en 2020 de más de 168 hectáreas, afectando principalmente al matorral y pastizal. La mayoría de estos polígonos tienden a tener un ancho cercano a su largo. En mucho menor cantidad aparecen los fuegos que dejan una figura alargada, también son escasos aquellos que son cuadrados. Los incendios en la Sierra son limitados por artefactos como bardas, terrazas, caminos, cultivos o tecorrales, lo que confiere aristas rectas a varios polígonos incendiados. También son limitados por guardarrayas y brechas cortafuego, igual que el combate directo de los brigadistas y voluntarios. Las barrancas, peñascos y afloramientos rocosos son comunes en la Sierra y detienen el avance del fuego en varias ocasiones. Otro factor que delinea la forma del polígono quemado es la acumulación de combustible: las zonas que ya fueron incendiadas en años anteriores sirven como barrera de nuevos fuegos, pues no cuentan con el combustible suficiente para propagar el fuego.

El cuarto resultado es el análisis de la frecuencia de los incendios. A partir de los nueve años estudiados se propone la siguiente frecuencia de fuegos en la Sierra de Guadalupe (Figura 5).

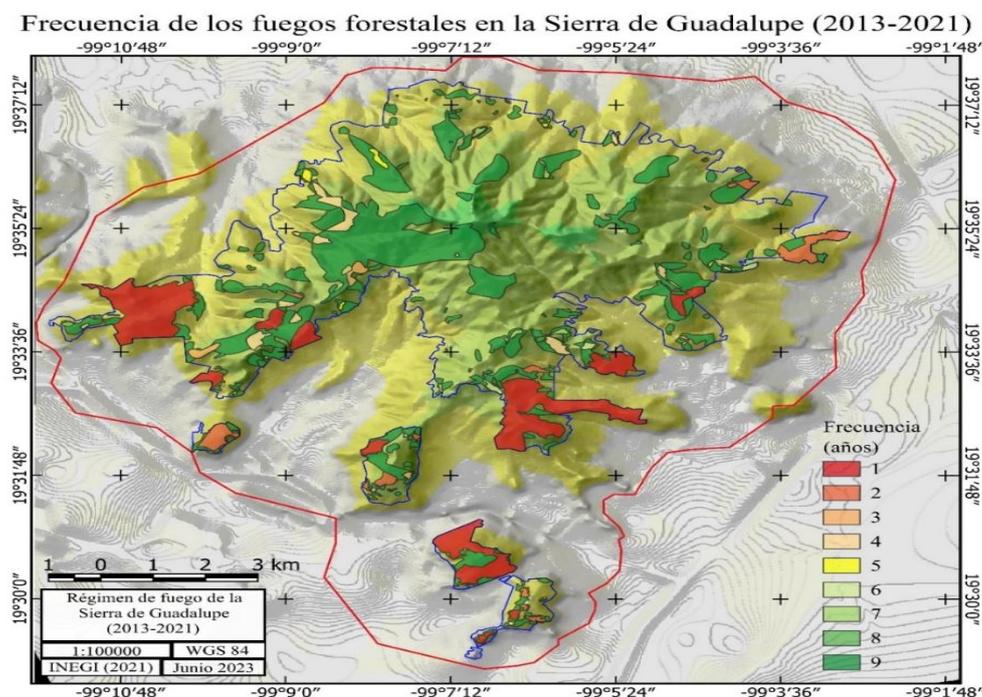


Figura 5. Frecuencia de los incendios forestales en la Sierra de Guadalupe

Cada color indica una frecuencia redondeada. Cada polígono indica que en esa zona se han presentado incendios en la frecuencia que su color indica, aun cuando no la han cubierto toda. Aquellas zonas que no están coloreadas no fueron incendiadas en el periodo de estudio, por lo que tienen un periodo de retorno

mayor a nueve años, es decir que las zonas verdes se incendiaron al menos una vez en el periodo de estudio y las rojas, cada año aproximadamente. La suma del área quemada sin contar traslapes representa el 34% del área no urbanizada de la Sierra de Guadalupe (6 945 ha). Son 11 zonas donde la frecuencia fue de un año en el periodo de estudio. En la Tabla 5 se agrupa el área por frecuencia redondeada.

Tabla 5.
Área por categoría de frecuencia

Frecuencia	Área (ha)	Porcentaje
1	646.89	27
2	112.65	5
3	26.86	1
4	87.22	4
5	18.40	1
6	17.64	1
7	14.85	1
8	2.65	0
9	1461.27	61
Suma	2388.43	101

En la tabla 2 se muestran los máximos, promedios y mínimos de área quemada para cada categoría, son cifras que pueden usarse en el manejo de los recursos naturales (Bettinger et al., 2009), la media es de 435 ha, la desviación estándar de 195.17 ha. El percentil de recurrencia indica la probabilidad de que el área quemada en cualquier año sea superior a la cifra correspondiente, así hay 95% de probabilidad que se supere las 226.17 ha, 50% que supere los 398.81 hectáreas y solo un 10% de que supere las 850.79 ha. Seguido de un periodo de poca incidencia de fuego, sucede un año de grandes áreas quemadas. El combustible que se acumula en periodos de exclusión de fuego, tarde o temprano será incendiado. Esta conclusión es válida para toda la Sierra: existen zonas donde el fuego no ha consumido combustible durante el periodo de 2013 a 2021, es de esperar que grandes incendios se presenten en los próximos años, por la energía que está acumulada en esas cañadas. Dentro de las zonas que han acumulado combustible, se encuentra el bosque de encino que corona a la Sierra de Guadalupe. Existen capacidades técnicas en la misma Sierra para iniciar un plan de manejo de fuego que permita convivir con él, que, si no se hace, se pagará con ecosistemas (Myers, 2006).

El fenómeno que se da en las zonas de estudio 3, 5, 7, 9 y 11 sugiere una dinámica de acumulación de energía y materiales, que, tras un evento violento, libera energía súbitamente y reduce la biomasa en el ecosistema. Después, en la misma zona, inicia nuevamente la acumulación progresiva de materiales (Holling, 1986). En la zona de estudio 3 y 11 se presentó otra dinámica: el combustible se consumió y por eso fueron menos las perturbaciones. Las zonas 5, 7 y 9 sugieren la primera dinámica: el combustible se acumuló después de una ausencia de perturbaciones y se liberó su energía en un evento violento.

En el Cuadro 4 también se observa un fenómeno de acumulación y liberación de combustible/energía que se confirmó en el análisis de serie de tiempo. Los eventos más importantes de fuego aéreo se dieron uno o dos años después de que no se presentaran los mismos. El periodo de retorno en el que se presenta un área quemada mayor al 8% fue de dos a tres años. Los años que presentaron mayor porcentaje de incendios aéreos fueron los mismos que presentaron mayor área quemada en total (2013, 2017 y 2020). Las series de tiempo nos indican un aumento importante en la tendencia. Todas las comunidades vegetales de la Sierra de Guadalupe toleran el fuego (en cierta intensidad), salvo el cedro blanco. La interacción entre perturbaciones (DeLong et al., 2012) es la principal causa de la muerte de árboles en la Sierra de Guadalupe. El incendio se presenta antes o después de algún ataque de insectos, sequía, vandalismo, epífitas o

parásitas, lo que promueve la muerte de árboles, disminuyendo la densidad en el rodal. Cuando los rodales son muy densos, la mortandad es mayor.

La falta de manejo de los recursos naturales en la Sierra de Guadalupe ha promovido la desaparición de masas de pinos y cedro blanco. Es necesario manejar el fuego, la densidad de los matorrales y bosques, entre muchos otros aspectos, para evitar la desaparición de bosquetes y matorrales viejos. El mapa que aquí se expone (Figura 5) puede ser usado en zonas más pequeñas (una o pocas hectáreas) para planificar quemas prescritas, predecir el comportamiento del fuego o definir el régimen de fuego para unidades mínimas de manejo. Debe incluirse esta información en el ideotipo (Rodríguez-Trejo, 2006) de las plantas que se establecerán.

CONCLUSIONES

El fuego es un elemento que se suprime en la Sierra de Guadalupe, este documento ha descrito algunos aspectos del régimen de fuego que deben atenderse para el manejo del fuego, una técnica que poco a poco se incorpora en México y que, en la Sierra de Guadalupe, debe empezar cuanto antes. En este documento se establece el primer acercamiento al régimen de fuego, pero de ninguna manera lo termina de describir ni intenta explicarlo, es un ejercicio que invita a los lectores a profundizar en la ecología del fuego de la Sierra de Guadalupe. El alcance exploratorio de este trabajo propone la existencia de un régimen de fuego antropogénico en la Sierra de Guadalupe, pero que tiene características similares en muchos bosques urbanos y marginales de las grandes ciudades.

La utilidad inmediata de este documento es cuestionable. La Sierra de Guadalupe siempre ha sido administrada por al menos dos entidades, las que corresponden a la jurisdicción del Estado de México, y las que de Ciudad de México (dos Estados de la República distintos) cuando el paisaje se mantiene en unidad, y sus planes de manejo (del área natural protegida) no incluyen el fuego, más allá de la prevención, combate y quemas controladas. Este documento aportaría a un plan de manejo de fuego que considere, además de lo que ya se practica, las quemas prescritas y manejo de combustibles, mismo plan que tendría que plantearse a nivel de paisaje y no a nivel de límites jurídicos, puesto que el paisaje es un sistema con unidad permanente, aun cuando desaparezca la zona forestal, la zona urbana sigue constituyendo paisaje, delimitado según sus microcuencas. Un plan de manejo de fuego de estas características es algo que objetivamente no sucederá en la SG por las condiciones políticas del momento (y del pasado). Además, este acercamiento solo es válido para una pequeña fracción de tiempo, que ya no es vigente, es valioso porque es el primero, siendo más útil como un testimonio disponible para los próximos investigadores que sigan definiendo el régimen de fuego en la SG, con la esperanza de que algún día se consideren estas ideas en el manejo de esta.

AGRADECIMIENTOS

Especial dedicatoria al gran maestro de manejo de fuego Dante Arturo Rodríguez Trejo, acaecido antes de la publicación de este trabajo. Tus alumnos honramos y seguimos con tus enseñanzas.

FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron ningún patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores del presente trabajo declaran no presentar ningún tipo de conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología y escrito original: Mendoza-Ruiz, E. E. Metodología, adquisición de fondos, supervisión y escrito original: Rodríguez-Trejo, D. A. Validación: Granados-Sánchez, D. Análisis formal y supervisión: Corona-Ambriz, A. Validación, revisión y edición: Pérez-Hernández, M. J.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2009). *Forest management and planning*. AP.
- Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Del Valle, H., Anaya, J., Di Bella, C., Cruz, I., Manzo, L., López, G., López, L., Mari, N., González-Alonso, F., Morelli, F., Setzer, A., Csiszar, I., Kanpandegi, J. A., & Libonati, R. (2008). Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. *Ecological Applications*, 18(1), 64–79. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php>
- Delong, C., Burton, P., & Geertsema, M. (2012). Natural disturbance processes. En A. H. El-Shaarawi & W. W. Piegorsch (Eds.), *Encyclopedia of environmetrics* (pp. 1-6). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470057339.vnn147>
- Holling, C. (1986). The resilience of terrestrial ecosystems. En W. C. Clark & R. E. Munn (Eds.), *Sustainable development of the biosphere* (pp. 292-317). Cambridge University Press.
- McLauchlan, K. K., Higuera, P. E., Miesel, J., Rogers, B. M., Schweitzer, J., Shuman, J. K., Tepley, A. J., Varner, J. M., Veblen, T. T., Adalsteinsson, S. A., Balch, J. K., Baker, P., Batllori, E., Bigio, E., Brando, P., Cattau, M., Chipman, L. M., Coen, J., Crandall, R., & Watts, A. C. (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*, 108(5), 2047-2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>
- Microsoft. (2019). Excel 2019 [Software]. Windows. <https://www.microsoft.com/es-mx/microsoft-365>
- Muñoz R., C. A. (2001). Elaboración de un modelo espacial de peligro de incendios forestales [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020145506.PDF>
- Myers, R. L. (2006). Convivir con el fuego: Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el Manejo Integral del Fuego. The Nature Conservancy. https://conservationgateway.org/Documents/el_manejo_integral_del_fuego.pdf
- QGIS Development Team. (2023). QGIS (Versión 3.30.3) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/es/site/>
- R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Racine, J. S. (2019). Reproducible econometrics using R. *Oxford University Press*. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190900663.001.0001>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2006). Notas sobre el diseño de plantaciones de restauración. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(2), 111–123. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62912204>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de vegetación: Su ecología, manejo e historia (Vol. 1). CP, UACH, SEMARNAT, CONAFOR, CONANP. https://www.researchgate.net/publication/320867647_Incendios_de_Vegetacion_Su_Ecologia_Manejo_e_Historia_Vol_1_Resumenes

- Shive, K. L., Wuenschel, A., Hardlund, L. J., Morris, S., Meyer, M. D., & Hood, S. M. (2022). Ancient trees and modern wildfires: Declining resilience to wildfire in the highly fire-adapted giant sequoia. *Forest Ecology and Management*, 511, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120110>
- Sierra-Pineda, A., Vázquez-Soto, J., Góngora-Tapia, E., & Rodríguez-Trejo, D. A. (1987). Evaluación de plantaciones forestales. COCODER.
- SPPIF. (2022). Histórico de incendios forestales. CONAFOR. <http://forestales.ujed.mx/incendios2/>
- Tepley, A. J., Thomann, E., Veblen, T. T., Holz, A., Paritsis, J., Kitzberger, T., & Anderson-Teixeira, K. J. (2018). Influences of fire-vegetation feedbacks and post-fire recovery rates on forest landscape vulnerability to altered fire regimes. *Journal of Ecology*, 106(5), 1925-1940. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12950>