

Tendencias climáticas y evidencia territorial del aumento del riesgo de incendios forestales en Guatemala (2001 - 2024)

Climate trends and territorial evidence of increasing wildfire risk in Guatemala (2001 - 2024)

Ochoa-Orozco W. A.¹, González-Chavajay B. G.², Araque-Pérez J. J.^{3*}, Cruz J. A.³

 Ochoa-Orozco W. A.
[wochoa@postgrado.ingenieria.usac.edu.gt](mailto:wchoa@postgrado.ingenieria.usac.edu.gt)

 González-Chavajay B. G.
bgeovany@profesor.usac.edu.gt

 Araque-Pérez J. J.
202490164@fausac.gt

 Cruz J. A.
jcruzmartinez428@gmail.com

*Autor de correspondencia: 202490165@fausac.gt

¹ Postgrado de la Facultad de Agronomía e Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

² Centro de Estudios Urbanos y Regionales, Universidad de San Carlos de Guatemala.

³ Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, Nicaragua

Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático

ISSN-e: 2410-7980

Periodicidad: Semestral

vol.11, núm.22, 2025

ribcc@ev.unanleon.edu.ni

Recepción: 18 de Febrero 2026

Aprobado: 04 de Junio 2026

Publicado: 08 de Julio 2026

URL: https://revistas.unanleon.edu.ni/index.php/REB_ICAMCLI/article/view/1242

DOI: <https://doi.org/10.5377/ribcc.v11iNúm.22.22981>

Copyright © 2025 Rev. iberoam. bioecon. cambio clim. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León (UNAN-León), Area de Conocimiento de Ciencias Agrarias y Veterinarias / Dirección Especifica de Agroecología y Agronegocios / Centro de Investigación en Ciencias Agrarias y Veterinarias. Dirección Académica. Departamento de Investigación. Unidad de publicaciones y eventos científicos.



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución No Comercial Compartir Igual 4.0

Resumen

Antecedentes: Guatemala presenta una alta recurrencia de incendios forestales, intensificada por el aumento de la temperatura, la variabilidad de la precipitación y la presión antrópica. El objetivo de este trabajo fue evaluar tendencias climáticas y evidencia territorial de incendios forestales en Guatemala. **Metodología:** Se realizó un estudio cuantitativo y longitudinal integrando datos climáticos (1970–2024) de precipitación CHIRPS, temperatura (INSIVUMEH y ERA5) y registros oficiales de incendios forestales (CONRED–INAB). Se aplicaron análisis de tendencias, anomalías climáticas, correlaciones de Pearson y análisis espacial en SIG. Se incorporó el índice ENOS para evaluar su influencia interanual sobre la ocurrencia de incendios.

Resultados: Los resultados muestran incremento térmico (>0.9 °C desde 1970) y tendencias de variabilidad en la precipitación, con déficits recurrentes durante años con el fenómeno de El Niño. Para los años de 2001 y 2024, se reportan mayores incendios los que coinciden con anomalías negativas de precipitación y temperaturas superiores al promedio. Se observó una correlación positiva entre temperatura e incendios ($r \approx 0.6$ – 0.7) y negativa con la precipitación ($r \approx -0.5$), evidenciando un fuerte control climático sobre la recurrencia del fuego. Los incendios forestales en Guatemala responden a una interacción entre cambio climático, degradación del territorio y presión humana.

Conclusión: Los resultados verifican y confirman que la variación climática actúa como amplificador del riesgo, por lo que se requiere una gestión integral del fuego basada en monitoreo climático, planificación territorial y estrategias de adaptación post-incendio para reducir la vulnerabilidad ambiental, social y vulnerabilidad de acuíferos.

Palabras claves: Gestión del fuego, teledetección, variabilidad climática, cambio climático.

Abstract

Background: Guatemala experiences a high recurrence of forest fires, intensified by rising temperatures, precipitation variability, and anthropogenic pressure. The objective of this study was to evaluate climate trends and territorial evidence of forest fires in Guatemala. **Methodology:** A quantitative, longitudinal study was conducted, integrating climate data (1970–2024) from CHIRPS precipitation, temperature (INSIVUMEH and ERA5), and official forest fire records (CONRED–INAB). Trend analysis, climate anomaly analysis, Pearson correlations, and spatial analysis using GIS were applied. The ENSO index was incorporated to assess its interannual influence on fire occurrence. **Results:** The results show a temperature increase (>0.9 °C since 1970) and trends of precipitation variability, with recurring deficits during El Niño years. The years 2001 and 2024 show a higher incidence of fires, coinciding with negative precipitation anomalies and above-average temperatures. A positive correlation was observed between temperature and fires ($r \approx 0.6$ – 0.7), and a negative correlation with precipitation ($r \approx -0.5$), demonstrating strong climatic control over fire recurrence. Forest fires in Guatemala result from an interaction between climate change, land degradation, and human activity. **Conclusion:** The results verify and confirm that climate variation acts as a risk amplifier, thus requiring comprehensive fire management based on climate monitoring, land-use planning, and post-fire adaptation strategies to reduce environmental, social, and aquifer vulnerability.

Keywords: Fire management, remote sensing, climate variability, climate change.

Introducción

El Fuego es parte de los procesos ecológicos naturales que se da en los diferentes ecosistemas, pero en las últimas tres décadas ha cambiado su frecuencia intensidad y sobre todo las áreas afectadas, que son el resultado del cambio del uso del suelo y los efectos de variabilidad climática antropogénica. Los estudios a nivel mundial han demostrado que los cambios en la temperatura media, la reducción de la humedad en la vegetación seca y la capacidad del aire para extraer humedad de la superficie son condicionantes para incendios de gran magnitud incluyendo en aquellas áreas donde históricamente no eran habituales (Jolly et al., 2015; Abatzoglou & Williams, 2016). Los incendios se han documentado y estudiado en América, Europa y Australia, países los cuales reportan que las temporadas de incendios pueden ser casi todo el año y cada vez que existen los incendios son mas violentos, destruyendo mayor área y siendo más difíciles de controlar (Bowman et al., 2009; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], (2021).

En últimos diez años se han desarrollado nuevas tecnologías para verificar los avances y estragos de los incendios forestales, se están utilizando sensores remotos y bases de datos satelitales de cobertura del suelo a nivel mundial, sensores como MODIS Y VIIRS permiten evaluar la ocurrencia, extensión y frecuencia de los incendios con información por medio de imágenes satelitales a través de los años desde su lanzamiento (Schroeder et al., 2014; Giglio et al., 2016). Desde la observación con los sensores se ha demostrados que los fuegos que nacen durante olas de calor o sequia son cada vez más fuertes y se extienden de forma más rápida (Andela et al., 2017; VanDer-Werf et al., 2017). Paralelamente, bases climatológicas como CHIRPS y ERA5 pueden detectar anomalías existentes en la temperatura y precipitación, permitiendo analizar cómo puede incidir en el comportamiento de los incendios (Funk et al., 2015; Hersbach et al., 2020).

Para Centroamérica, la variabilidad climática se ha caracterizado por mayor frecuencia de sequias, anomalías en las temperaturas extremas y alteraciones en la estacionalidad de las lluvias, influenciada y asociada del ENOS (Fenómeno El Niño – Oscilación Sur). Estas condiciones se han extendido por toda la región incrementando la vulnerabilidad de los recursos forestales y agrícolas, especialmente para Guatemala porque existe mayor presión demográfica, expansión agropecuaria no regulada y debilidades en las instituciones para la gestión del territorio (Alfaro et al., 2020; Hidalgo et al., 2021).

En Guatemala se ha documentado que los incendios son mayores en la época seca, esto coincide con los déficits hídricos, mayores temperaturas y humedad en el suelo (Ochoa-Orozco et al., 2022). El problema reside en que la mayoría de los estudios que están disponibles se limitan a realizar análisis descriptivos, sin integrar tendencias climáticas de corto y largo plazo, por lo cual no evalúan la recurrencia estadística con la ocurrencia de los incendios.

La literatura actual, muestra que los incendios no se deben analizar como eventos aislados, sino como una combinación entre procesos socioambientales, influidos por factores climáticos, económicos y de gobernanza. Por ejemplo, en la Reserva Biosfera Maya los incendios han aumentado por pérdida de cobertura forestal y el cambio del uso de la tierra, sumándole que la debilidad institucional (Radachowsky et al., 2012; Bocci y Fortmann, 2023). Además no se debe omitir que el los incendios contribuyen a la modificación de los gases de efectos invernadero, alimentando el calentamiento global (Crutzen y Andreae, 1990; Ward et al., 2018).

Bajo este contexto, se pretende analizar las tendencias climáticas y ocurrencia de incendios forestales en Guatemala, integrando series climáticas desde 1970 al 2024, por medio de imágenes satelitales de incendios, áreas afectadas y análisis estadísticos. Adoptando un enfoque analítico correlacional, apoyado de análisis espaciales, para evaluar la variación climática, anomalías térmicas y ocurrencias de incendios, para discutir las implicaciones en la gestión del fuego y adaptación al cambio climático.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, longitudinal y analítico correlacional, para identificar las tendencias climáticas y su relación con la recurrencia de incendios forestales en Guatemala durante el período 2001–2024. Se adoptó un diseño observacional retrospectivo, por medio de información climática, espacial y registros oficiales de incendios forestales. Fundamentado con la integración de teledetección, climatología aplicada y análisis estadístico, integrando ocurrencia de incendios y su relación con procesos de variabilidad climática interanual asociados al fenómeno ENSO.

Área de estudio

Guatemala se ubica en Centroamérica, se caracteriza por clima tropical con dos estaciones la seca y lluviosa, alta cobertura forestal y diversidad de ecosistemas, elevada presión antrópica asociada a agricultura, expansión urbana y cambio de uso de la tierra, con la mayor parte de incendios forestales durante la estación seca (Ochoa et al., 2022). El país en un escenario sensible a la interacción entre clima, fuego y actividades humanas, siendo adecuado para evaluar los impactos del cambio climático sobre la dinámica de los incendios forestales.

Datos de incendios forestales

Se utilizaron registros oficiales consolidados provenientes de [Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres \[CONRED\]](https://datos.conred.gob.gt/dataset/). (s. f.). Portal de datos abiertos. Gobierno de Guatemala. (<https://datos.conred.gob.gt/dataset/>) datos de pre y supresión de incendios (FIRMS); [Consejo Nacional de Áreas Protegidas \[CONAP\]](https://conap.gob.gt/observatorio/sistema-de-monitoreo/). (s. f.). (<https://conap.gob.gt/observatorio/sistema-de-monitoreo/>), [Instituto Nacional de Bosques \[INAB\]](https://sig.inab.gob.gt/). (s. f.). <https://sig.inab.gob.gt/> : los datos incluyeron: Número anual de incendios, área afectada (hectáreas), localización geográfica, tipo de cobertura vegetal entre los años de 2001–2024. Estos registros fueron validados y complementados mediante información satelital proveniente de: National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (s. f.). Landsat 5, 7, 8 y 9. Sentinel-2.

Datos climáticos

Precipitación: La estimación de la precipitación se realizó con base en CHIRPS v2.0 (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) (Funk et al., 2015). Los datos usados tienen las siguientes características: Resolución espacial: 0.05° (~5 km), resolución temporal: diaria y mensual, periodo: 1981–2024, evaluando a nivel nacional: precipitación media anual, anomalías interanuales, tendencias temporales (Tabla 1).

Temperatura: Se utilizaron datos provenientes de: Estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH], s. f.; Reanálisis ERA5 (ECMWF); (Hersbach et al., 2020). Variables analizadas: Temperatura máxima, mínima, media (Tabla 1).

Índices climáticos (ENSO)

Se incorporó el Oceanic Niño Index (ONI), publicado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), para clasificar los años en El Niño, La Niña y condiciones neutrales (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], s. f.). Lo cual permitió evaluar la influencia de la variabilidad climática interanual sobre la frecuencia, intensidad y extensión de los incendios forestales para los eventos de sequía prolongada (Tabla 1).

Tabla 1. Variables climáticas y de incendios forestales utilizadas en el análisis, periodo 1970–2024

Variable	Unidad	Periodo	Fuente	Frecuencia
Precipitación	mm	1970–2024	INSIVUMEH / CHIRPS	Anual
Temperatura Max, Media y Min.	°C	1970–2024	INSIVUMEH / ERA5	Anual
Incendios	Nº eventos	2001–2024	CONRED	Anual
Área quemada	ha	2001–2024	CONAP/INAB	Anual
ENSO (ONI)	Índice	1970–2024	NOAA	Mensual

Procesamiento y análisis de datos

Se elaboraron mapas temáticos con el software QGIS (V.3.40 Bratislava), para la representación espacial de las variables analizadas. Las tendencias temporales se evaluaron por regresión lineal y calculando anomalías de precipitación a partir de CHIRPS (Funk et al., 2015). La relación entre clima e incendios se analizó mediante correlaciones de Pearson, considerando precipitación, temperatura media y ENSO (ONI) en relación con la frecuencia y el área quemada de incendios. Se calcularon anomalías estandarizadas (Z-score) y se compararon años húmedos y secos según la clasificación ENSO. El control de calidad incluyó la eliminación de valores atípicos, normalización, cálculo de anomalías y agregación anual, con el fin de garantizar consistencia y comparabilidad entre fuentes (Wilks, 2011).

Análisis de regresión climática–incendios

El primer modelo se utilizó para analizar la relación entre las condiciones climáticas y el número anual de incendios forestales (Ecuación 1):

$$\text{Incendios}_t = \beta_0 + \beta_1(T_t) + \beta_2(P_t) + \beta_3(\text{ENSO}_t) + \epsilon_t \dots\dots\dots(1)$$

Donde: Incendios representa el número de incendios registrados en el año; Tt corresponde a la temperatura media anual; Pt la precipitación anual; ENSOt al índice oceánico Niño; β0 es el intercepto del modelo; β1 β2 y β3 son los coeficientes asociados a cada variable explicativa; y εt corresponde al término de error aleatorio.

Adicionalmente, se construyó un segundo modelo para evaluar la relación entre las variables climáticas y la superficie afectada por incendios (Ecuación 2):

$$\text{Area}_t = \beta_0 + \beta_1(T_t) + \beta_2(P_t) + \beta_3(\text{ENSO}_t) + \epsilon_t \dots\dots\dots(2)$$

La intención es evaluar el grado de asociación entre el clima y la ocurrencia de incendios.

Resultados

Tendencias temporales de incendios forestales (2001–2024)

Se observa que en los registros oficiales de incendios forestales para el período 2001–2020 han incrementado tanto la recurrencia e intensidad para Guatemala (Figura 1), existiendo variabilidad interanual asociada a condiciones climáticas extremas, sumado mayor concentración de eventos extremos en años asociados a fases cálidas del ENSO (El Niño). Gradualmente aumento el área afectada, sustancialmente a partir de 2015, con picos en 2019–2020 y 2023–2024 (Figura 2).

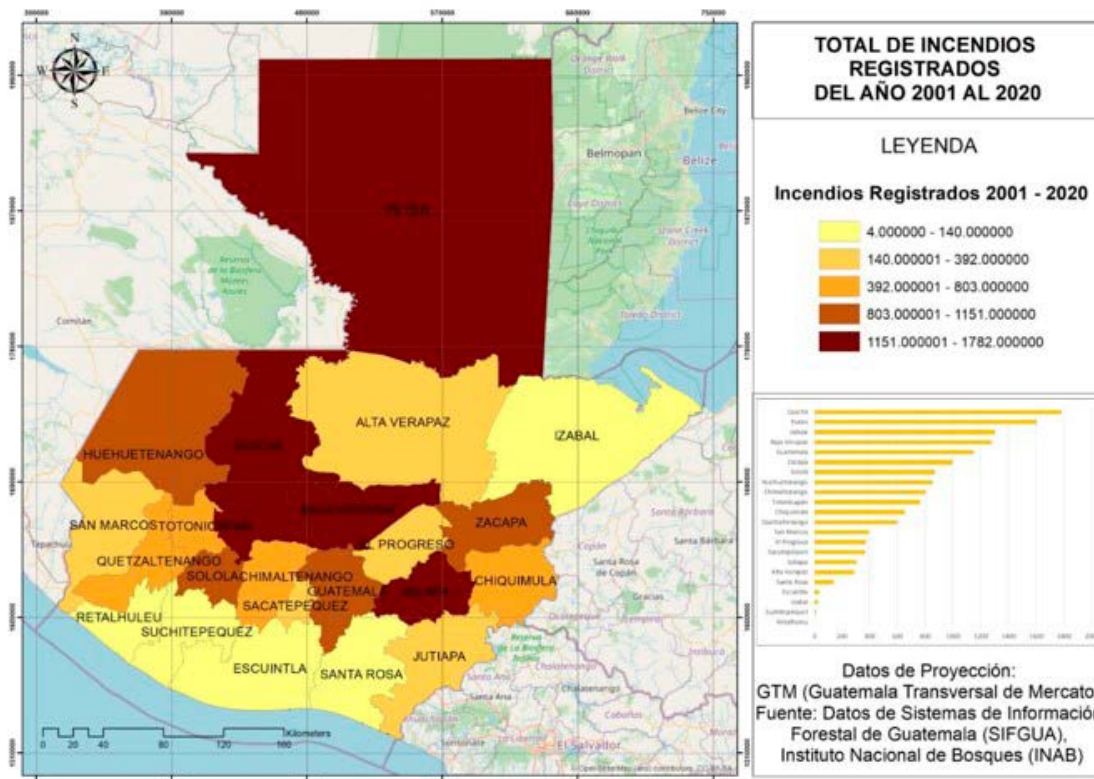


Figura 1. Tendencia general de incendios registrados en Guatemala desde 2001-2020

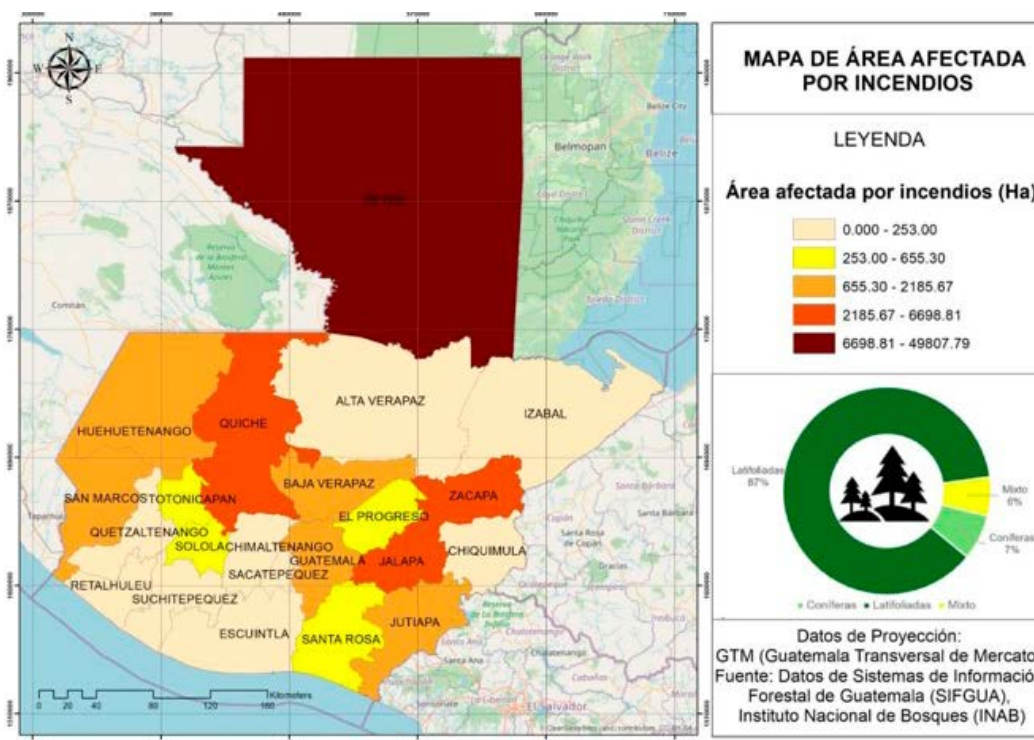


Figura 2. Distribución espacial del área afectada por incendios forestales en Guatemala (2001-2024).

Comportamiento espacial y recurrencia de incendios

La mayoría de incendios se centran en la Franja Transversal del Norte, Alta y Baja Verapaz, la zona oriental, la cuenca media y baja del río Cahabón y la franja del Pacífico lo cual está relacionada en su mayor parte a cambios en el uso del suelo, expansión de la frontera agrícola y degradación continua de la cobertura forestal (Figura 3). La presencia de focos de calor en áreas de bosque secundario y zonas intervenidas indica que el fuego funciona como una herramienta de gestión del territorio, en lugar de ser un fenómeno aislado. Aunque la frecuencia anual presenta fluctuaciones, el análisis de tendencia lineal indica un incremento estadísticamente positivo, sugiriendo un cambio estructural en el régimen de incendios del país y no únicamente variabilidad natural.

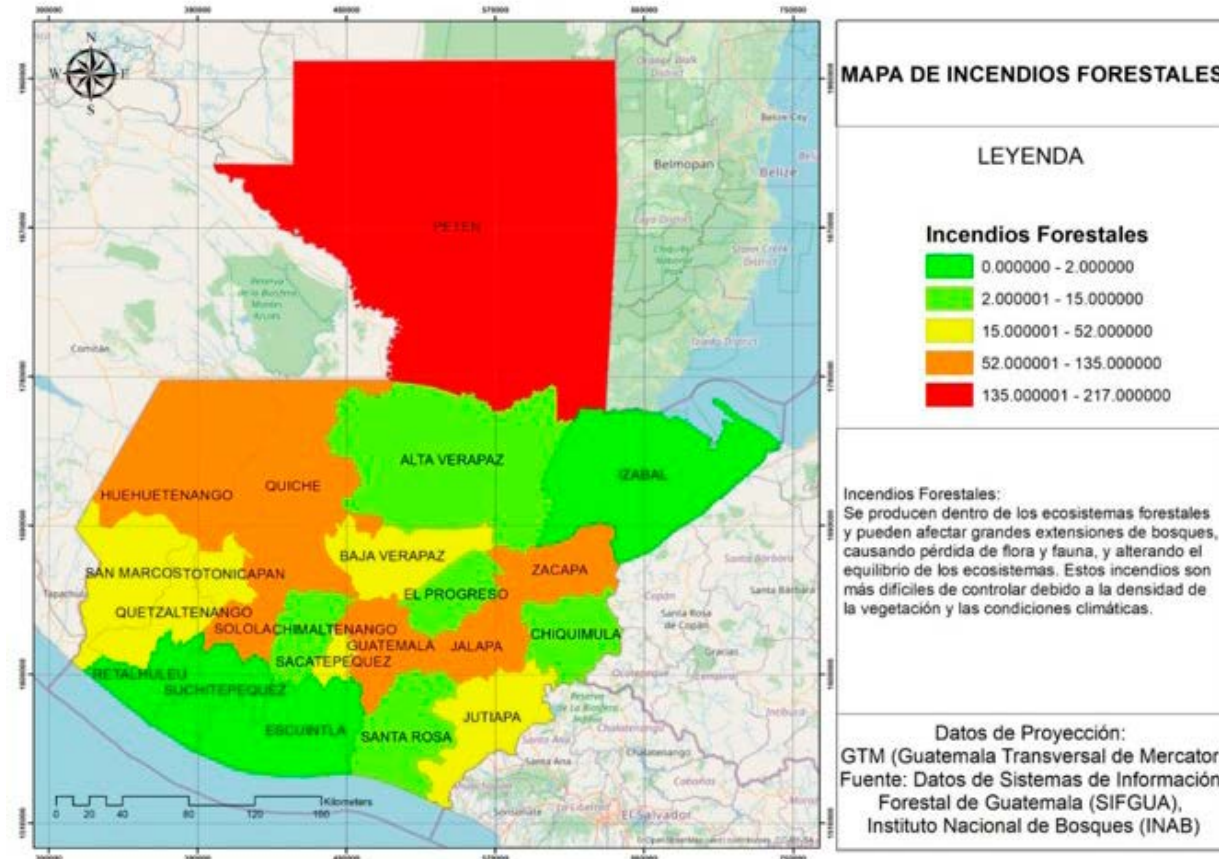


Figura 3. Distribución espacial de la ocurrencia de incendios forestales en Guatemala (2001–2024)

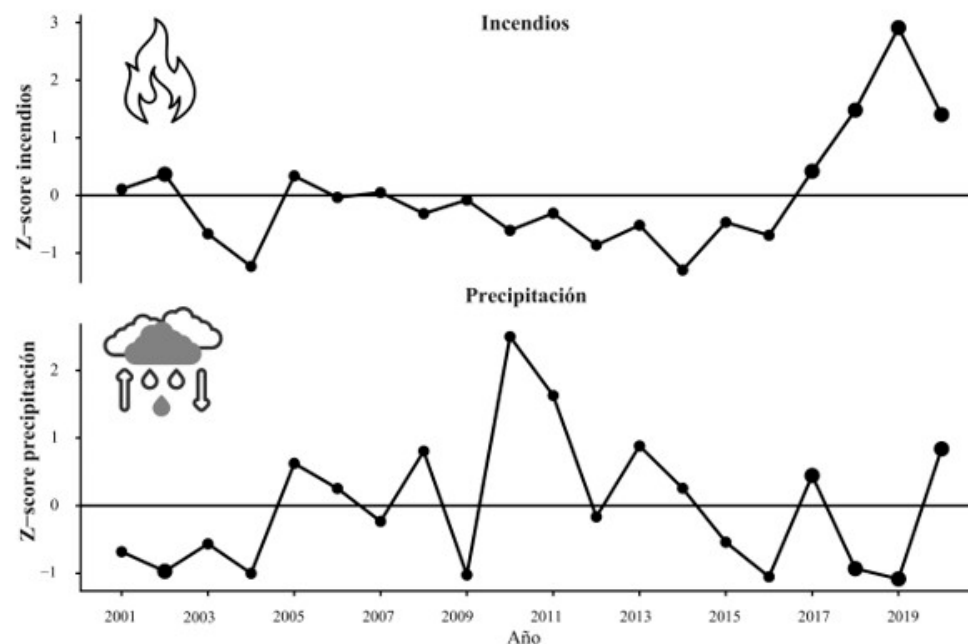


Figura 4. Z-score de precipitación e incendios forestales en Guatemala interanual.

Temperatura y estrés térmico

La temperatura media anual durante el período de estudio ha incrementado incluyendo mayores situaciones térmicas extremas y crecimiento gradual de la evapotranspiración potencial la cual se complementa con los años de mayor cantidad de incendios forestales (Figura 5), los que coinciden con temperaturas medias más altas que el promedio histórico y con un aumento en la manifestación de sucesos con temperaturas mayores a 30 °C, inclusive en zonas conocidas usualmente por ser más húmedas. Estas condiciones térmicas ayudan a la reducción del nivel de humedad del material vegetal, lo cual aumenta su inflamabilidad y permite la expansión del fuego.

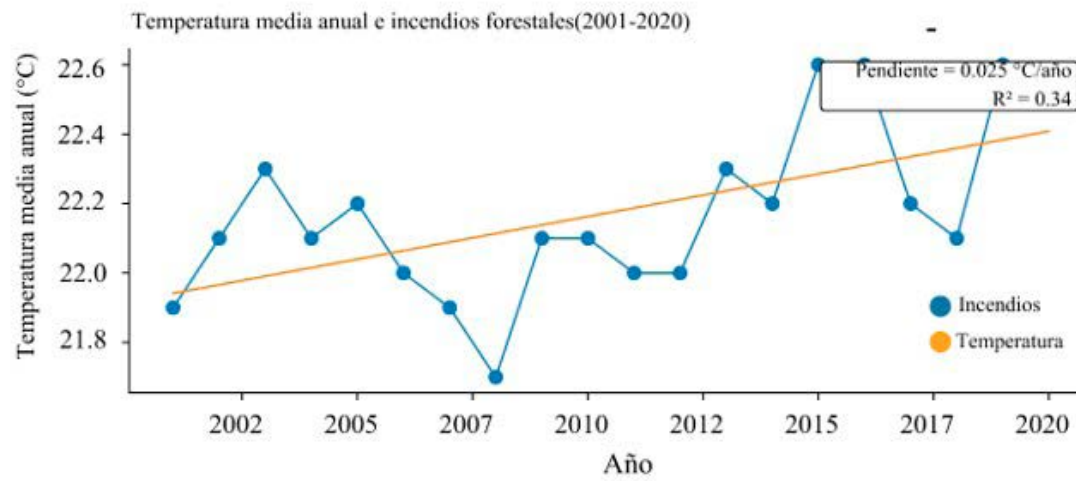


Figura 5. Tendencias entre la temperatura media anual e incendios forestales en Guatemala.

Relación entre ENSO e incendios forestales

La integración del Oceanic Niño Index (ONI) mostro que las fases El Niño coinciden con incrementos en el número de incendios y en el área quemada, asociados a déficits hídricos acumulados y mayor estrés térmico (Figura 6). A diferencia del fenómeno La Niña se observa una reducción de puntos de calor de incendios, aunque no se puede descartar que el riesgo persiste. Esto significaría que el ENSO actúa como modulador climático que intensifica la susceptibilidad del territorio al fuego.

Integración clima fuego territorio

Por otro lado, los incendios responden a la combinación de sequía, altas temperaturas (Figura 6), cambios en el uso del suelo y acumulación de biomasa seca. La expansión agropecuaria, la fragmentación del paisaje y el uso recurrente del fuego incrementan la probabilidad de eventos de mayor extensión. La limitada capacidad de prevención y control agrava este escenario, generando un sistema donde variaciones climáticas relativamente pequeñas pueden traducirse en aumentos significativos de la actividad ígnea.

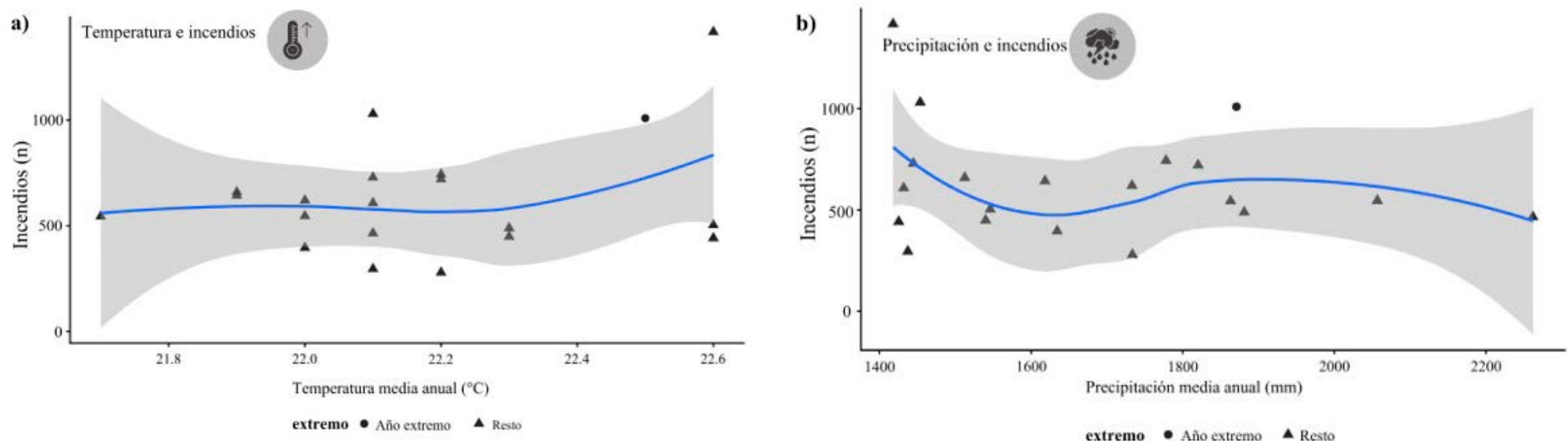


Figura 6. Tendencias climáticas observadas, a) temperaturas e incendios, b) precipitación e incendios 2001 - 2024.

Resultados variación climática y dinámica de incendios (1970–2024)

El análisis de series climáticas (1970–2024) demuestra que la variabilidad climática ha incidido en Guatemala en factores como la precipitación anual que muestra una tendencia negativa (-8.6 mm año^{-1} , $p < 0.05$), mientras que la temperatura media, máxima y mínima han ido en aumento de $+0.23$, $+0.31$ y $+0.19 \text{ °C}$ por década. Lo que confirmaría que existe tanto calentamiento acompañado de la reducción pluviométrica, condicionantes que incrementan la posibilidad de incendios.

Entre 2001 y 2024 se registraron más de 145,000 incendios forestales, con un promedio anual de 6,000 - 7,000 eventos. El año 2020 concentró la mayor ocurrencia y superficie afectada ($>220,000 \text{ ha}$), las que coinciden con sequía y anomalías térmicas positivas. Los departamentos de Petén, Alta Verapaz, Izabal y Quiché tienen vulnerabilidad estructural por episodios de calor aislados. Existen correlaciones significativas entre clima e incendios. La temperatura media presenta correlación positiva con el número de incendios ($r = 0.68$) y el área quemada ($r = 0.71$), mientras que la precipitación muestra relación inversa ($r = -0.62$ y -0.66 , respectivamente; $p < 0.01$) (Tabla 2). El índice ONI (ENSO) se asocia positivamente con ambas variables, indicando mayor recurrencia durante fases El Niño.

El modelo de regresión múltiple confirma estos resultados: temperatura ($\beta = +0.47$), precipitación ($\beta = -0.38$) y ENSO ($\beta = +0.31$) son predictores significativos, explicando en conjunto el 69 % de la variabilidad anual en la ocurrencia de incendios (R^2 ajustado = 0.69); (Tabla, 2). Si bien el clima no explica la totalidad del fenómeno, constituye un factor estructural determinante. Además, se observan incremento del 18 % en días secos consecutivos desde 1980, extensión de la temporada seca en 20 - 30 días y aumento del 40 % de incendios durante la estación seca desde 2000.

Tabla 2. Modelo de regresión múltiple para ocurrencia anual de incendios forestales (2001–2024)

Variable	Coefficiente β	Error estándar	p-valor
Temperatura media	0.47	0.09	< 0.01
Precipitación	-0.38	0.11	< 0.05
ENSO (ONI)	0.31	0.12	< 0.05
R² ajustado	0.69		

Nota. El modelo explica el 69 % de la variabilidad interanual en la ocurrencia de incendios forestales

La temperatura media anual durante el período de estudio ha incrementado incluyendo mayores situaciones térmicas extremas y crecimiento gradual de la evapotranspiración potencial la cual se complementa con los años de mayor cantidad de incendios forestales (Figura 5), los que coinciden con temperaturas medias más altas que el promedio histórico y con un aumento en la manifestación de sucesos con temperaturas mayores a 30 °C , inclusive en zonas conocidas usualmente por ser más húmedas. Estas condiciones térmicas ayudan a la reducción del nivel de humedad del material vegetal, lo cual aumenta su inflamabilidad y permite la expansión del fuego.

Discusión

El análisis no busca atribuir causalidad directa al cambio climático como detonante de incendios, sino evaluar su papel como factor amplificador de condiciones favorables para su propagación.

Tendencias climáticas y su relación con la recurrencia de incendios forestales

Para el período 1970–2024 existe incremento térmico en Guatemala, coherente con las tendencias regionales reportadas para Mesoamérica y el Caribe (Ochoa-Orozco et al., 2026). Otros estudios han documentado aumentos de temperatura media entre 0.2 y 0.3 °C por década en regiones tropicales, acompañados con mayor frecuencia de eventos cálidos extremos, esto permite que se dé el incremento de la evapotranspiración potencial y reduce la humedad disponible del combustible vegetal (IPCC, 2021; Hershbach et al., 2020). Similares a los resultados encontrados en este estudio, donde las series de temperatura máxima muestran una tendencia positiva marcada a partir del año de 1990.

Lo datos de precipitación mediante CHIRPS (1981–2024) son muy análogos los cuales muestran variabilidad interanual, con déficit hídrico para la época seca y anomalías negativas asociadas a eventos El Niño. Para Centroamérica ya se ha demostrado que las reducciones acumuladas de precipitación durante períodos críticos aumentan la probabilidad de incendios forestales, al reducir la humedad de la vegetación y facilitar la propagación del fuego (Funk et al., 2015; Jolly et al., 2015). En este sentido, los años con menores acumulados de precipitación coinciden con picos en la ocurrencia de incendios.

Influencia del ENSO y variabilidad climática interanual

La incorporación del Índice Oceánico Niño (ONI) consideran que los años clasificados como El Niño moderado a fuerte dan paso al aumento del número de incendios y en el área afectada, en comparación con años neutros o La Niña. Patrones similares documentados en América Central, donde El Niño se asocia con déficits pluviométricos, aumento de temperatura superficial de la tierra y prolongación de la época seca (NOAA, 2023; IPCC, 2021).

Cabe destacar que la presencia de incendios no se explica exclusivamente por ENSO, porque incluso en años neutros se registran muchos puntos de calor de ocurrencia. Lo cual confirmaría que el fenómeno climático actúa como factor amplificador, pero no como causa única, otros estudios señalan que el cambio climático incrementa la ventana de oportunidad para el fuego, pero que las actividades humanas determinan la ignición (Abatzoglou y Williams, 2016; Liu et al., 2020).

Relación clima incendios: análisis estadístico y significado físico

Existe relación positiva entre temperatura media anual y número de incendios, así como correlaciones negativas entre precipitación acumulada y ocurrencia de incendios. Aunque estos coeficientes no alcanzan valores extremadamente altos, su significancia estadística confirma la existencia de la relación clima y fuego. La mayoría de literatura da pautas en que los incendios responden a procesos no lineales y de muchos factores, siendo el componente climático parte de la variabilidad, pero no explica su totalidad (Jolly et al., 2015; IPCC, 2021).

La importancia de este análisis radica en que no se limita a una correlación simple, sino que integra una perspectiva temporal larga (más de cinco décadas de clima) junto a los datos de sensores satelitales. Esto permite diferenciar entre variabilidad interanual y tendencias de fondo, fortaleciendo la inferencia frente a estudios que solo se basan en ventanas temporales cortas, de este modo sobre estiman anomalías aisladas.

Incendios forestales y presión antrópica: más allá del clima

Un hallazgo interesante es que la recurrencia espacial de incendios se concentra en zonas con alta intervención humana: expansión agrícola, quema de rastrojos, ganadería extensiva y áreas con déficit en la gobernanza forestal. Por lo general este patrón ya se ha documentado para América Latina, donde más del 90 % de los incendios tienen origen antrópico, aun cuando su propagación está condicionada por el clima (Giglio et al., 2016; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2024).

De cierto modo, se puede afirmar que el cambio climático no actúa de forma aislada, pero es un factor multiplicador del riesgo, expresado en la duración e intensidad de las temporadas de incendio. La combinación de altas temperaturas, déficit hídrico y presión sobre el territorio genera un escenario de vulnerabilidad socioambiental, para Guatemala se destacan cuencas como la del río Cahabón, de suma importancia porque los incendios afectan directamente la regulación hídrica, la calidad del suelo y la seguridad alimentaria.

Impactos post-incendio: la dimensión invisibilizada

Uno de los aportes que se muestra es mencionar que los incendios no finalizan con la extinción del fuego. Se ha demostrado que los incendios generan aumentos en erosión del suelo, pérdida de cobertura vegetal, escorrentía superficial y transporte de sedimentos, lo que degrada la calidad del agua lo que pone en riesgo los regímenes hidrológicos de las cuencas (Shakesby y Doerr, 2006; Moody et al., 2013).

En regiones tropicales húmedas, este fenómeno se amplifica por lluvias intensas posteriores a un incendio, favoreciendo deslizamientos, colmatación de ríos y deterioro de fuentes de agua potable. Sugiriendo que las cuencas afectadas por incendios pueden incrementar de hasta 5–10 veces en la carga de sedimentos durante los primeros años post-fuego (Moody et al., 2013). Este fenómeno es frecuentemente ignorado en la gestión pública, pero constituye como uno de los principales argumentos para transitar hacia la gestión de los incendios, más allá de la simple supresión.

Implicaciones para la gestión del fuego en Guatemala

La evidencia mostrada en este documento sugiere la necesidad de integrar monitoreo climático permanente, manejo preventivo de las áreas protegidas o reservas naturales, restauración post-incendio y planificación territorial basada en riesgo. Países como Australia, Canadá y España han confirmado que los programas de manejo integrado del fuego reducen pérdidas económicas y ambientales a mediano plazo (Liu et al., 2020; FAO, 2024). Razón por la actual la estrategia centrada en la respuesta reactiva es insuficiente.

En el caso de Guatemala, avanzar hacia una política de gestión integral del fuego implica reconocer que los incendios forestales son un fenómeno socioambiental complejo, donde confluyen clima, uso del suelo, gobernanza y vulnerabilidad social. La ausencia de acciones post-incendio incrementa la degradación forestal y ambiental además el daño a nivel de flora y fauna la cual cierra un círculo de daños que con el fenómeno de cambio climático antropogénico se intensificará aún más en los próximos años.

Conclusión

Al examinar las series climáticas para 1970-2024 y los registros de incendios (2001-2024), se establece una correlación entre la temperatura ($r \approx 0.6 - 0.7$), la precipitación ($r \approx -0.5$) y la presencia de incendios en Guatemala, también la temperatura ira en aumento ($>0.9^\circ\text{C}$) por año. El modelo de regresión explica el 69% de la variabilidad a lo largo del año, lo que expone que el clima funciona como un potenciador estructural del riesgo.

A pesar de ello tenemos como implicación que la gestión del fuego debe transitar de una respuesta reactiva a un enfoque integral que integre monitoreo climático-ENSO, planificación territorial restrictiva en zonas con mayor probabilidad de incendios, es importante vigilar por programas de restauración post-incendio para mitigar degradación del suelo y contaminación de acuíferos.

Aunque se deja claro que este estudio tiene como limitante el periodo de 24 años que no alcanza el umbral de 30 años para detectar cambio climático; los datos oficiales pueden subestimar incendios en áreas remotas; el análisis correlacional no captura relaciones no lineales ni establece causalidad; no se incluyeron variables antropogénicas lo cual pude abrir espacio a nuevas investigaciones pero sobre todo mejorar la planificación, se recalca que muchos sensores para detección de incendio no tienen más de 30 años y las primeras resoluciones satelitales podrían subestimar puntos de calor y áreas/parcelas quemadas.

Las futuras investigaciones deben de extenderse a más 30 años con datos pre-satelitales corrigiendo o verificando bien datos satelitales, sería interesante incorporar variables socioespaciales (densidad poblacional, vías, uso de la tierra); además de clasificar a los incendios por cobertura vegetal (forestales vs. agrícolas); y de ser necesario evaluar impactos post-incendio en cuencas prioritarias para determinar el grado de contaminación de mantos acuíferos.

Declaraciones

Fondos: Este estudio fue financiado.

Conflicto de intereses: No revelaron conflictos de intereses.

Cumplimiento de estándares éticos: No se realizó ningún experimento con animales mayores o personas.

Contribuciones de Autores: Todos los autores participaron en: Conceptualización, metodología, redacción, análisis de datos, redacción de Borrador Original, redacción, revisión y Edición.

Disponibilidad de datos: Los conjuntos de datos están disponibles a través del autor correspondiente previa solicitud razonable

Agradecimientos: Al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala por compartir los datos, y a la empresa de Geoingeniería, Agua y Ambiente 888, por contribuir con el análisis e interpretación de datos.

Referencias bibliográficas

- Abatzoglou, J. T., y Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42), Article 11770–11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
- Alfaro, M., Hidalgo, H. G., y Alfaro, E. J. (2020). Aridity trends in Central America: Insights from temperature and precipitation indices. *Atmosphere*, 11(4), 427. <https://doi.org/10.3390/atmos11040427>
- Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Chen, Y., Van-Der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., DeFries, R. S., Collatz, G. J., Hantson, S., Kloster, S., Bachelet, D., Forrest, M., Lasslop, G., Li, F., Mangeon, S., Melton, J. R., Yue, C., y Randerson, J. T. (2017). A human-driven decline in global burned area. *Science*, 356(6345), 1356–1362. <https://doi.org/10.1126/science.aal4108>
- Bocci, C., y Fortmann, L. (2023). Community and industrial forest concessions: Are they effective at reducing forest loss and does FSC certification play a role? *World Development*, 170, Article 106315. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2023.106315>
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Marston, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C., ... Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth system. *Science*, 324(5926), 481–484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Crutzen, P. J., y Andreae, M. O. (1990). Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 250(4988), 1669–1678. <https://doi.org/10.1126/science.250.4988.1669>
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres. (s. f.). Portal de datos abiertos. Gobierno de Guatemala. <https://datos.conred.gob.gt/dataset/>
- Consejo Nacional de Áreas Protegidas [CONAP]. (s. f.). Incendios forestales. Gobierno de Guatemala. <https://conap.gob.gt/observatorio/sistema-de-monitoreo/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2024). Integrated fire management voluntary guidelines: Principles and strategic actions (2nd ed.). Forestry Working Paper No. 41. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd1090en>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., y Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, Article 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

- Giglio, L., Schroeder, W., y Justice, C. O. (2016). The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Quesada-Montano, B., y Delgado, J. (2021). Climate variability and change in Central America and the Caribbean: What do we know and what do we need? *Frontiers in Water*, 2, Article 632739. <https://doi.org/10.3389/frwa.2020.632739>
- Instituto Nacional de Bosques [INAB]. (s. f.). Sistema de Información Geográfica del INAB (SIG-INAB). Gobierno de Guatemala. <https://sig.inab.gob.gt/>
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH]. (s. f.). Datos de estaciones meteorológicas. Gobierno de Guatemala. <https://www.insivumeh.gob.gt/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jolly, W. M., Cochrane, M. A., Freeborn, P. H., Holden, Z. A., Brown, T. J., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. J. S. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6, Article 7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
- Liu, T., Mickley, L. J., Singh, S., & Marlier, M. E. (2020). Diagnosing spatial biases and uncertainties in global fire emissions inventories: Indonesia as regional case study. *Remote Sensing of Environment*, 237, Article 111557. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111557>
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., y Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews*, 122, 10–37. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.004>
- National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (s. f.). Fire Information for Resource Management System (FIRMS): MODIS and VIIRS active fire data. NASA Earth Science Data Systems. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], (s.f). Oceanic Niño Index (ONI). Climate Prediction Center. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Ochoa-Orozco, W., Rivera, P., y Herrera, E. (2022). Comportamiento meteorológico durante la sequía de medio verano en Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 9(2), 150–165. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v9i2.1284>
- Ochoa-Orozco, W. A., Araque-Pérez, J. J., y Barrios Garrido, G. E. (2026). Riesgo climático-sanitario en Guatemala: tendencias térmicas extremas y su correlación con el dengue, IRAs y ETAs. *Wani*, (84). <https://doi.org/10.5377/wani.v1i84.22333>
- Radachowsky, J., Ramos, V. H., McNab, R., Baur, E. H., y Kazakov, N. (2012). *Forest concessions in the Maya Biosphere Reserve, Guatemala: A decade later. Forest Ecology and Management*, 268, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.043>
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., y Csizsar, I. A. (2014). The new VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 143, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>
- Shakesby, R. A., & Doerr, S. H. (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74(3–4), 269–307. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.006>
- Van-Der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., van Leeuwen, T. T., Chen, Y., Rogers, B. M., Mu, M., van Marle, M. J. E., Morton, D. C., Collatz, G. J., Yokelson, R. J., y Kasibhatla, P. S. (2017). Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth System Science Data*, 9(2), 697–720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- Ward, D. S., Kloster, S., Mahowald, N. M., Rogers, B. M., Randerson, J. T., y Hess, P. G. (2018). Trends and variability of global fire emissions due to historical anthropogenic activities. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(1), 122–142. <https://doi.org/10.1002/2017GB005787>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3rd ed., Vol. 100). Academic Press.