



Artículo

**Reconstruyendo la historia del fuego: 40 años de incendios forestales en Santa Cruz
mediante clasificación histórica de imágenes Landsat (1985-2024)**

Reconstructing the fire regime: 40 years of forest fire dynamics in Santa Cruz
based on historical Landsat image classification (1985-2024)

Fabio Cotrina* & Armando Rodríguez-Montellano

Fundación Amigos de la Naturaleza, Dirección: km 7 y ½ Doble vía La Guardia Santa Cruz, Bolivia

*Autor de correspondencia: fcotrina@fan-bo.org

Resumen

Este estudio analiza la dinámica espacio-temporal de los incendios forestales en el departamento de Santa Cruz, Bolivia, durante el periodo 1985-2024, utilizando imágenes satelitales Landsat y clasificación supervisada con Random Forest. Se cuantificó la superficie quemada en bosques, áreas no boscosas y agrícolas, se localizaron zonas de alta recurrencia y se detectaron cicatrices históricas de fuego no registradas oficialmente, proporcionando una base para la comprensión de la dinámica del fuego en la región. Los resultados muestran una intensificación sostenida de los incendios, con un promedio anual de 1.55 millones de hectáreas y eventos extremos en 1999, 2004, 2010, 2019 y un récord histórico en 2024, con más de 9 millones de hectáreas quemadas. Inicialmente concentrados en áreas no boscosas, los incendios han aumentado progresivamente en cobertura forestal, alcanzando un 80% de superficie afectada en 2024. Las ecorregiones de mayor impacto histórico fueron bosque seco chiquitano (4.45 millones ha en 2024), la Amazonia (2.51 millones ha en 2024) y las sabanas inundables (2.23 millones ha en 2024), mientras que el cerrado alcanzó 1.43 millones ha en 1993, evidenciando alta recurrencia de hasta 30 eventos en algunas zonas. Estos resultados evidencian la persistencia y expansión del fuego durante cuatro décadas y destacan la importancia de un monitoreo histórico prolongado para identificar áreas vulnerables y orientar la planificación territorial, la gestión de incendios forestales y la conservación de ecosistemas en Santa Cruz.

Palabras clave : Dinámica espacio-temporal. Google Earth Engine, Recurrencia del fuego.

Abstract

This study examines the spatiotemporal dynamics of wildfires in the Santa Cruz department, Bolivia, from 1985 to 2024, using Landsat satellite imagery and supervised classification with Random Forest. Burned areas in forests, non-forest lands and agricultural areas were quantified, high-recurrence zones were identified, and historically unrecorded fire scars were detected, providing a comprehensive understanding of regional fire dynamics. Results indicate a sustained intensification of wildfires, with an annual average of 1.55 million hectares and extreme events in 1999, 2004, 2010, 2019, and a historical peak in 2024, when over 9 million hectares burned. While initially concentrated in non-forest areas, wildfires have progressively expanded into forested regions, affecting 80% of forest cover by 2024. The most historically impacted ecoregions were the Chiquitanian dry forest (4.45 million ha in 2024), the Amazon (2.51 million ha in 2024), and the flooded savannas (2.23 million ha in 2024), whereas the Cerrado reached 1.43 million ha in 1993, with some areas experiencing up to 30 fire events. These findings demonstrate the persistence and expansion of wildfires over four decades and highlight the importance of long-term historical monitoring to identify vulnerable areas and support territorial planning, wildfire management, and ecosystem conservation in Santa Cruz.

Key words: Fire recurrence, Google Earth Engine, Spatio-temporal dynamics.

Recibido: 16.09.25, **Aceptado:** 09.01.26

Introducción

Los incendios forestales son un proceso ecológico de larga data que afecta múltiples escalas espaciales y temporales. Aunque la evidencia histórica no muestra un aumento global uniforme en diferentes áreas quemadas, de igual

modo el cambio climático ha intensificado las condiciones meteorológicas favorables para incendios, generando incrementos regionales en su frecuencia y severidad, así como un mayor riesgo de eventos extremos (Doerr &

Santín. 2016, Jones *et al.* 2022). En este sentido, los incendios representan una amenaza creciente en la vida humana y el ambiente, impulsada por la interacción entre factores climáticos, actividades humanas y cambios en el uso del suelo (Pandey *et al.* 2023).

En Bolivia, los incendios forestales son un problema recurrente y de gran magnitud, particularmente en los departamentos del oriente como Santa Cruz y Beni. Entre 2001 y 2021, se registraron miles de eventos de incendios que afectaron más de 24 millones de hectáreas, siendo Santa Cruz uno de los principales puntos críticos, según análisis de teledetección (Maillard 2023). En la temporada seca de 2024, datos oficiales del Ministerio de Medio Ambiente y Agua indicaron que la superficie quemada por incendios forestales alcanzó aproximadamente 6.9 millones de hectáreas, incluyendo 4.6 millones de bosque y 2.3 millones de pastizales (ANF 2024). Datos regionales del Instituto Cruceño de Estadísticas señalaron que, en Santa Cruz, la superficie afectada por incendios en 2024 fue de alrededor de 8.7 millones de hectáreas, una de las mayores afectaciones observadas en la última década (Belmonte 2025).

Las condiciones climáticas extremas, como déficit de precipitación, baja humedad relativa y altas temperaturas durante la estación seca incrementan la probabilidad, intensidad y propagación de los incendios forestales, afectando negativamente la calidad del aire y la salud humana. La mayoría de los incendios en regiones tropicales se originan por acciones humanas, en particular por quemas asociadas a actividades agroganaderas, las cuales se ven potenciadas por condiciones climáticas adversas (Bowman *et al.* 2009, Abatzoglou & Williams 2016). En el departamento de Santa Cruz, los incendios forestales han degradado extensas áreas de bosque, afectando la estructura del ecosistema, la funcionalidad ecológica y la biodiversidad, especialmente en bosques secos y formaciones del bosque chiquitano. Estudios realizados en la región y en ecosistemas tropicales similares han documentado pérdidas de cobertura forestal, alteraciones en la composición de especies y reducción de la resiliencia ecológica asociadas a incendios recurrentes (Chazdon *et al.* 2016).

El uso de sensores remotos ha demostrado ser una herramienta esencial para monitorear incendios forestales, identificar áreas quemadas y analizar patrones espacio-temporales de la dinámica del fuego. Las series temporales de imágenes satelitales Landsat (Landsat 5, 7 y 8) permiten construir la evolución de los incendios forestales durante décadas, facilitando la cuantificación de áreas afectadas, detección de tendencias y evaluación de recurrencia de eventos (Roy *et al.* 2014). Considerando la creciente incidencia de incendios forestales en el

departamento de Santa Cruz es necesario comprender su comportamiento histórico. En este contexto, se plantea los siguientes objetivos: i. reconstruir la evolución espacio-temporal de los incendios forestales en Santa Cruz, durante el periodo 1985-2024 mediante el procesamiento y clasificación histórica de imágenes satelitales Landsat (5, 7 y 8); ii. analizar la variación interanual de la superficie quemada en tres tipos de cobertura del suelo (bosque, no bosque y agricultura), así como tendencias y recurrencias de incendios por ecorregión; y iii. evaluar la dinámica en las cicatrices históricas de quema.

Área de estudio

El ámbito geográfico de investigación comprende al departamento de Santa Cruz, Bolivia, una región caracterizada por una alta diversidad ecológica y una elevada susceptibilidad a incendios forestales, asociada a la interacción entre factores climáticos y presiones antrópicas vinculadas al cambio de uso del suelo (Andersen *et al.* 2025). Con una superficie aproximada de 370.621 km², equivalente al 33% del territorio nacional, Santa Cruz constituye un caso de estudio representativo para evaluar la dinámica del fuego en sus paisajes. Durante 2024, el área quemada se concentró predominantemente en ecosistemas boscosos, representando aproximadamente el 80% del total afectado por incendios, mientras que las áreas no boscosas naturales fueron cerca del 17% y las superficies agrícolas alrededor del 4%. Este patrón evidencia la fuerte incidencia del fuego en la cobertura forestal del departamento. Además, Santa Cruz comprende nueve ecorregiones (Ibisch *et al.* 2004), entre las que destacan el bosque seco chiquitano (28%), el Gran Chaco (22%), el bosque amazónico (20%), el Cerrado (13%) y las sabanas inundables (11%), y las menores al 3% incluye Chaco serrano, bosque tucumano-boliviano, bosques secos interandinos y Yungas (Fig. 1).

Métodos

Se aplicó un enfoque de clasificación supervisada basado en algoritmos de aprendizaje automático para identificar áreas quemadas a partir de imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8. Esta metodología ha sido utilizada en la detección de áreas afectadas por incendios forestales, debido a su capacidad discriminativa y cambios espectrales asociados a la vegetación quemada (Chuvieco *et al.* 2019).

Las imágenes Landsat fueron sometidas a calibración radiométrica y corrección atmosférica garantizando la consistencia temporal y espectral entre sensores y periodos de estudio (Roy *et al.* 2014). El preprocesamiento, clasificación y análisis espacial se realizaron en la plataforma (Google GEE, s.f), una herramienta de computación geoespacial que gestiona de forma eficiente grandes volúmenes de datos satelitales y facilita el análisis multitemporal a escala regional (Gorelick *et al.* 2017).

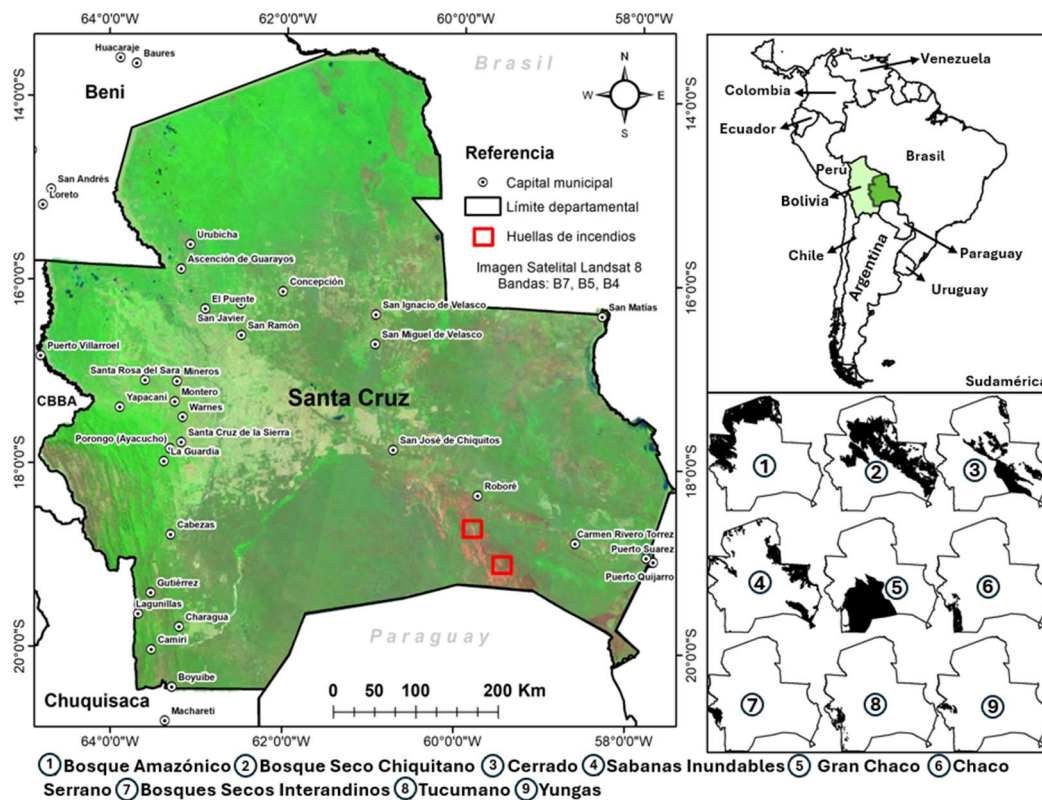


Figura 1. Ubicación del departamento de Santa Cruz.

Destinado a considerar la heterogeneidad ecológica y ambiental del área de estudio, el departamento de Santa Cruz fue subdividido en cuatro zonas (Norte, sur, este y oeste). La regionalización facilitó el ajuste de manera precisa de los parámetros en la clasificación, mejorando la discriminación de áreas quemadas en distintos tipos de cobertura. Se generaron mosaicos anuales correspondientes al segundo semestre de cada año, desde 1985 hasta 2024, con el propósito de reducir la cobertura nubosa y capturar las señales espectrales asociadas a cicatrices de incendios forestales. A partir de estos mosaicos, se aplicó el índice Normalized Burn Ratio (NBR), ampliamente utilizado en la detección de áreas quemadas debido a su sensibilidad a los cambios en la vegetación y en el contenido de humedad posterior al fuego (Key & Benson 2003). El uso del NBR en análisis multitemporales mediante imágenes Landsat ha sido validado en diversos estudios recientes (Chuvieco *et al.* 2019).

Con base en las imágenes derivadas, se generaron dos conjuntos de muestras poligonales correspondientes a áreas quemadas y no quemadas, los cuales fueron utilizados para extraer las firmas espectrales de las bandas rojo, infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo de onda corta 1 (SWIR1), infrarrojo de onda corta 2 (SWIR2) y del índice

NBR (Fig. 2), posteriormente sirvieron como insumo en la clasificación supervisada (Oliveira 2024).

Se utilizó el algoritmo Random Forest (Breiman 2001) con 500 árboles de decisión para la clasificación de áreas quemadas, aprovechando su robustez frente a variables correlacionadas y su buen desempeño en análisis multiespectrales (Fig. 2). Con la intención de reducir el ruido espectral, característico de las clasificaciones píxel a píxel, se aplicó un filtro espacial de mayoría (majority filter) utilizando una ventana de 3×3 píxeles, lo cual permitió eliminar píxeles aislados que no representaban eventos reales de quema y mejorar la coherencia espacial de las clases resultantes. Orientado a evaluar el impacto del fuego en la cobertura del suelo, los mapas de áreas quemadas se cruzaron anualmente con el producto de uso y cobertura de la tierra de (MapBiomás 2025), se clasificó en tres categorías: bosque, no bosque y agricultura (Fig. 2). Esta intersección vincula cada píxel quemado con su cobertura original, facilitando el cálculo de estadísticas detalladas por el tipo de vegetación afectada a lo largo del periodo de estudio. Finalmente, se utilizaron los límites de ecorregiones propuestos por Ibisch *et al.* (2004), para analizar la distribución espacial del área afectada por el fuego.

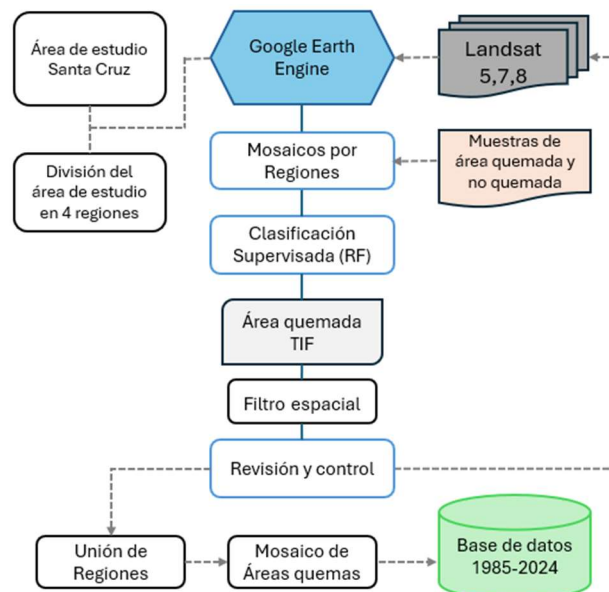


Figura 2. Flujograma de trabajo de los procesos de detección y clasificación de áreas quemadas en el departamento de Santa Cruz (1985–2024).

Resultados

Análisis temporal de superficies afectadas

Entre 1985 y 2024, el análisis temporal de los incendios forestales en Santa Cruz muestra una tendencia creciente sostenida en la superficie afectada, si bien la magnitud del cambio no es constante a lo largo de los años. La (Fig. 3) presenta el promedio anual histórico del área afectada, donde se observan picos correspondientes a años con eventos extremos de mayor magnitud. Cinco años destacan por su magnitud excepcional: 1999, 2004, 2010, 2019 y 2024. Durante los 40 años analizados, el promedio de superficie afectada por incendios fue de 1.556.373 hectáreas. Entre estos años, 2024 se distingue con más de 9 millones de hectáreas quemadas, el mayor valor registrado en la serie temporal.

El análisis de la superficie afectada por el fuego, tanto a lo largo de las décadas como por la recurrencia de eventos, reveló patrones significativos en su evolución. Al examinar los promedios por décadas, se observó entre 1985 y 1999, la superficie anual afectada fue de aproximadamente 1.1 millones de hectáreas. A pesar de que estos datos iniciales suelen ser menos estudiados, son cruciales para entender el inicio de la expansión del fuego. Posteriormente, entre 2000 y 2009, el promedio anual se incrementó a 1,6 millones de hectáreas, indicando un aumento en la actividad. Sin embargo, en la década siguiente 2010-2019, hubo una ligera disminución a 1.2 millones de hectáreas, sugiriendo un periodo de relativa estabilidad. A partir de 2020, se produjo un cambio drástico, con un promedio anual de 3.2 millones de hectáreas, superando el doble en comparación con décadas anteriores (Fig. 3). La tendencia subraya la importancia de analizar series históricas extensas que identifican transiciones estructurales en la dinámica del

fuego.

Entre los periodos de 1985 a 1992, el mayor porcentaje promedio de afectación se registró en las Sabanas Inundables, con un 14%. Durante el periodo 1993-2000, este ecosistema continuó siendo el más afectado, alcanzando un 19%, seguido por el Cerrado con un 12%. En el periodo 2001-2008, las Sabanas Inundables nuevamente presentaron la mayor afectación 13%, seguidas del Cerrado 6%. Para el periodo 2017-2024, se observó un aumento considerable en la afectación del bosque amazónico, con un 8%, mientras que en los periodos anteriores no supera el 1% ó 2%. Asimismo, se registró un 9% de afectación en el bosque seco chiquitano y en el Cerrado, un 23 % en las sabanas inundables, y un 2% en el bosque tucumano-boliviano (Fig. 4).

Las ecorregiones del Cerrado y las sabanas inundables presentaron recurrencia de incendios desde los primeros años del período analizado. En particular, la ecorregión del Cerrado mostró presencia de actividad de fuego en los registros más antiguos de la serie temporal, previo a los eventos registrados en 2019. En ambas ecorregiones se observó un aumento en la extensión de las áreas quemadas en los años recientes, con eventos de gran magnitud registrados en 2004, 2010 y 2024, los cuales se identificaron como años atípicos al superar significativamente el promedio del periodo.

La figura 5 muestra la distribución anual de la superficie quemada, diferenciada en tres clases de cobertura: bosque, no bosque y agricultura. Durante los primeros años analizados, los incendios se concentraron mayoritariamente en áreas no boscosas, con una proporción menor en zonas agrícolas y una afectación limitada en áreas forestales. En

los años 1987, 1995 y 1999, la proporción de superficie quemada en zonas boscosas se situó en 48%, 49% y 46%, respectivamente. No obstante, a partir de 2004 se identificó un aumento gradual de la tendencia. En ese año, el 57% de la superficie afectada correspondió a bosques, cifra que aumentó a 59% en 2010, 61% en 2019 y alcanzó el 80% en 2024, marcando un punto crítico en la evolución histórica del fenómeno. Este cambio evidenció una

creciente presión del fuego sobre áreas forestales, posiblemente asociada a transformaciones en el uso del suelo, acumulación de biomasa o condiciones climáticas extremas. El comportamiento reciente contrasta marcadamente con el de décadas anteriores y refuerza la necesidad de contar con series temporales prolongadas que permitan detectar estos cambios estructurales con mayor precisión.

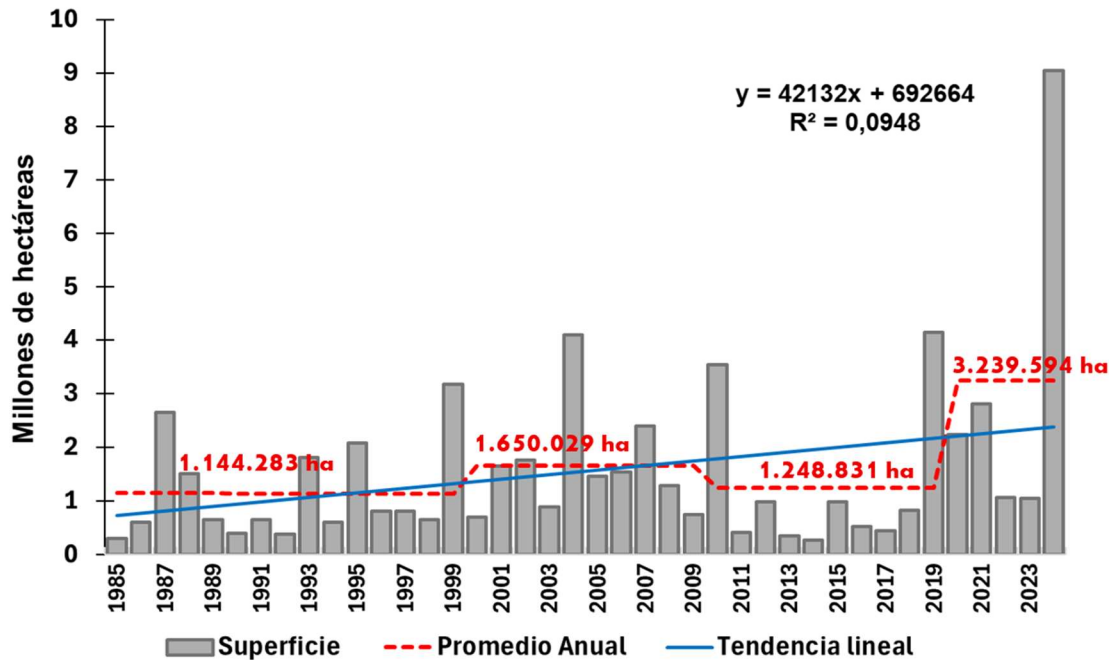


Figura 3. Histórico de áreas quemadas en el departamento de Santa Cruz (promedio anual).

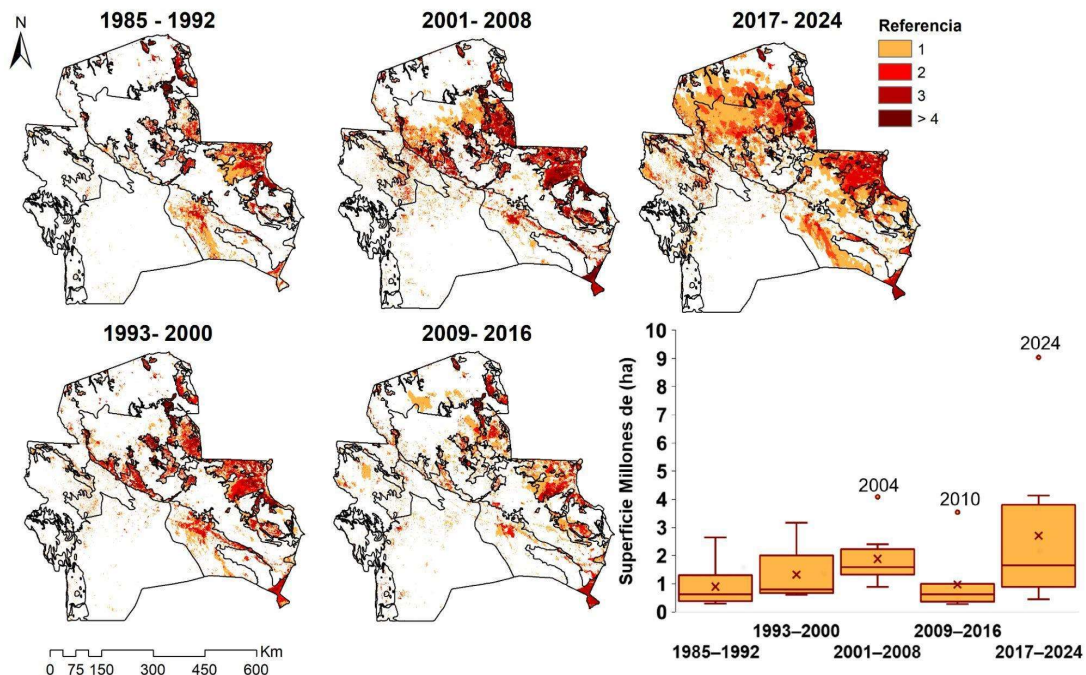


Figura 4. Promedio de la superficie quemada periodos de 8 años, en el departamento de Santa Cruz.

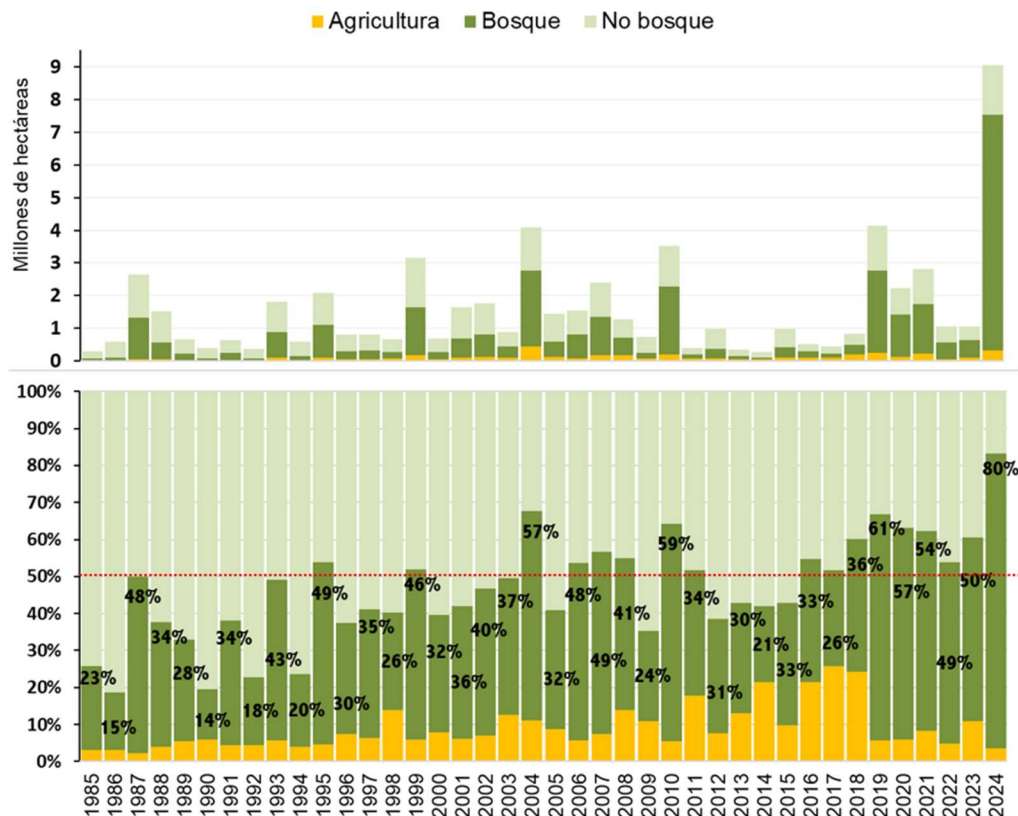


Figura 5. Superficie anual quemada por tipo de cobertura en el departamento de Santa Cruz (1985-2024).

A nivel de ecorregiones, el comportamiento del fuego ha sido heterogéneo, con notables diferencias en frecuencia e intensidad. La mayor superficie afectada se registró en el bosque seco chiquitano, con 4 millones de hectáreas quemadas a lo largo del periodo, evidenciando una recurrencia casi continua. En el bosque amazónico, se observó una tendencia creciente desde 2004, con picos significativos en 2010 y, especialmente, a partir de 2016, acumulando 2.5 millones de hectáreas. Otras ecorregiones presentaron patrones particulares: las sabanas inundables mostraron alta recurrencia con fuerte variabilidad interanual; en el Cerrado, el fuego fue persistente, aunque sin concentraciones extremas; y en el Gran Chaco, se registraron eventos puntuales de gran magnitud, con un máximo de 120.000 hectáreas afectadas. En contraste, los Yungas (3.000 ha), el Chaco serrano (50.000 ha), el bosque Tucumano-boliviano (40.000 ha) y los bosques secos interandinos (7.000 ha) mostraron una incidencia baja y localizada. Estos patrones indicaron una mayor concentración de incendios en las ecorregiones del oriente y sur del país, principalmente en ecosistemas secos y de transición, vulnerables a la propagación del fuego bajo condiciones climáticas extremas (Fig. 6).

En términos de recurrencia, las sabanas inundables presentaron la mayor frecuencia, con zonas que han registrado hasta 30 eventos, indicando una presión

constante del fuego. El Cerrado registró valores elevados, con un máximo de 21 eventos, seguido del bosque seco chiquitano, con 10 eventos, evidenciando una actividad persistente, pero de menor intensidad. Pese a la amplia superficie afectada, el bosque amazónico registró una frecuencia baja, con un máximo de 5 eventos, indicando incendios de menor periodicidad, pero extensos. Las ecorregiones del Gran Chaco y el Chaco serrano alcanzan hasta 5 eventos, a diferencia de, los Yungas, el bosque tucumano-boliviano y los bosques secos interandinos se encontraron recurrencias bajas, entre 1 y 3 eventos, reflejando una afectación esporádica. Estos resultados permitieron distinguir claramente entre ecosistemas con incendios recurrentes y aquellos donde estos ocurren de forma ocasional, información clave para diseñar estrategias de manejo adaptadas a la dinámica específica de cada región (Fig. 7).

La distribución espacial de los incendios forestales en Santa Cruz se analiza mediante dos mapas (Fig. 8): a) la frecuencia acumulada entre 1985 y 2024, y b) la comparación entre los periodos 1985-2000 y 2001-2024. En el primer mapa, se observó que el 37% de la superficie afectada registró un solo evento, el 29% entre 2 y 3, y el 14% entre 4 y 6. Las áreas con mayor recurrencia representaron una fracción menor: un 3% acumuló entre 7 y 16 incendios, otro 14% entre 17 y 23 incendios, y un 2% superó los 24 eventos en los 40

años analizados. El segundo mapa revela un desplazamiento geográfico en la distribución de los incendios. Entre 1985 y 2000, el 42% de las áreas quemadas se concentró en el sector oriental, por otro lado, entre 2001 y 2024, el 58% se localizó en el norte, especialmente en zonas de transición y sectores del bosque amazónico. Este cambio espacial sugiere una reconfiguración estructural de los patrones del fuego. Estos hallazgos refuerzan la relevancia de un monitoreo espacial continuo para adaptar las estrategias de prevención y respuesta frente a la evolución del riesgo de incendios.

El análisis multitemporal de imágenes satelitales identifica cicatrices persistentes de áreas quemadas visibles desde los

primeros registros disponibles (Fig. 1). En el primer caso de estudio (a), se observa una cicatriz en la imagen de 1985 que permanece visible en imágenes posteriores de 1987 y 1991, coincidiendo con nuevos eventos de quema registrados en la misma área. En un segundo caso (b), se visualizaron cicatrices asociadas a un evento activo en 1997, cuya huella permanece visible en imágenes de 2000. Posteriormente, en 2019, un incendio de gran magnitud afectó nuevamente la misma zona, evidenciando la recurrencia espacial de las áreas impactadas por el fuego a lo largo del período analizado (Fig. 9).

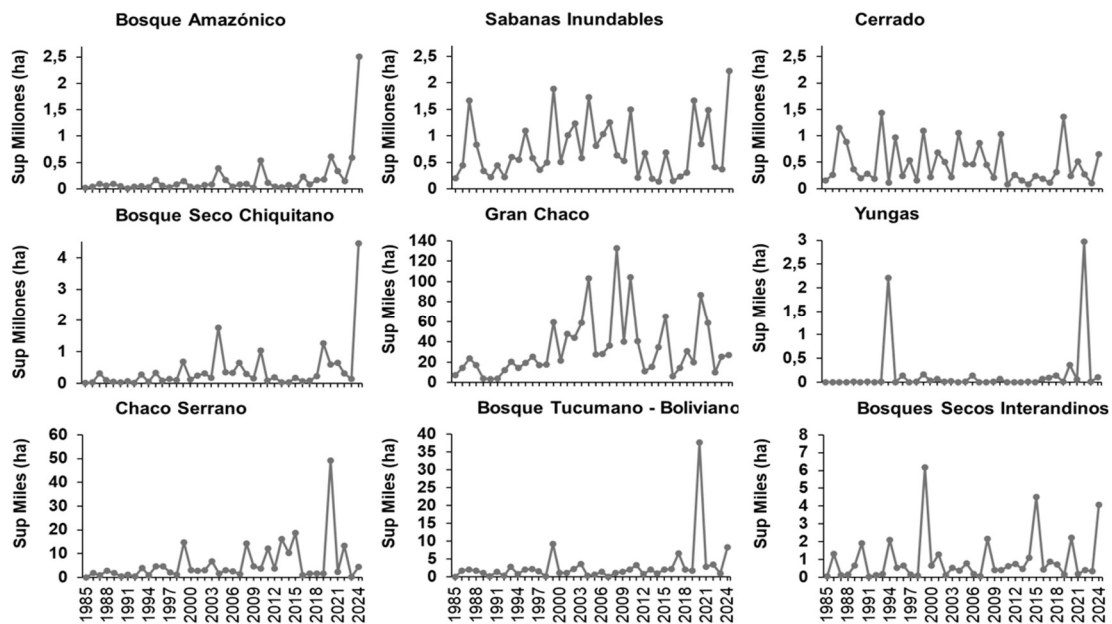


Figura 6. Superficie afectada por los incendios forestales en las ecorregiones del departamento de Santa Cruz.

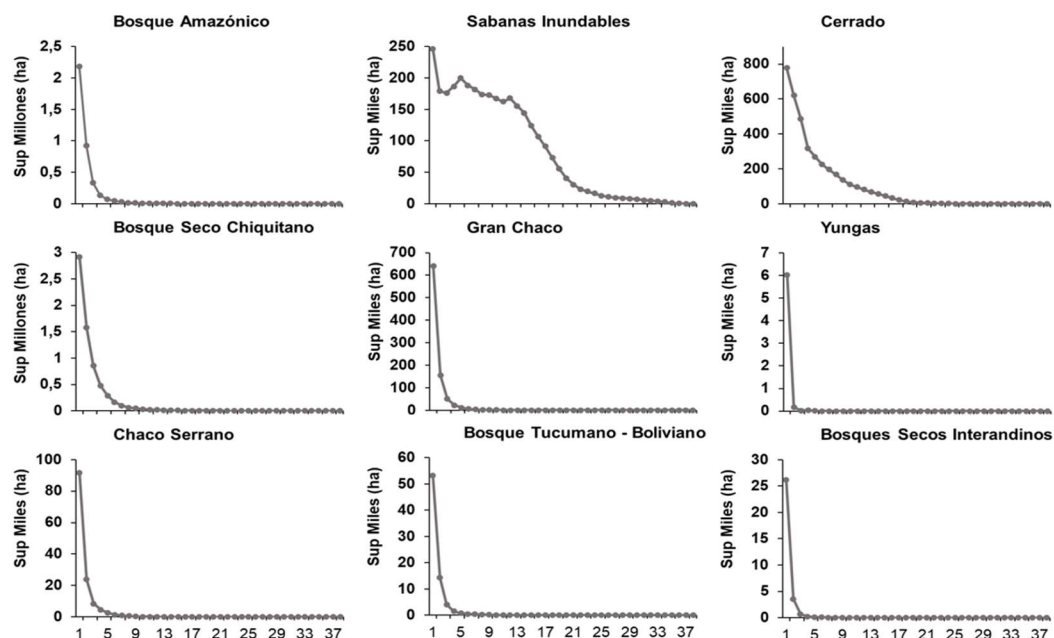


Figura 7. Recurrencia de incendios por ecorregiones en el departamento de Santa Cruz.

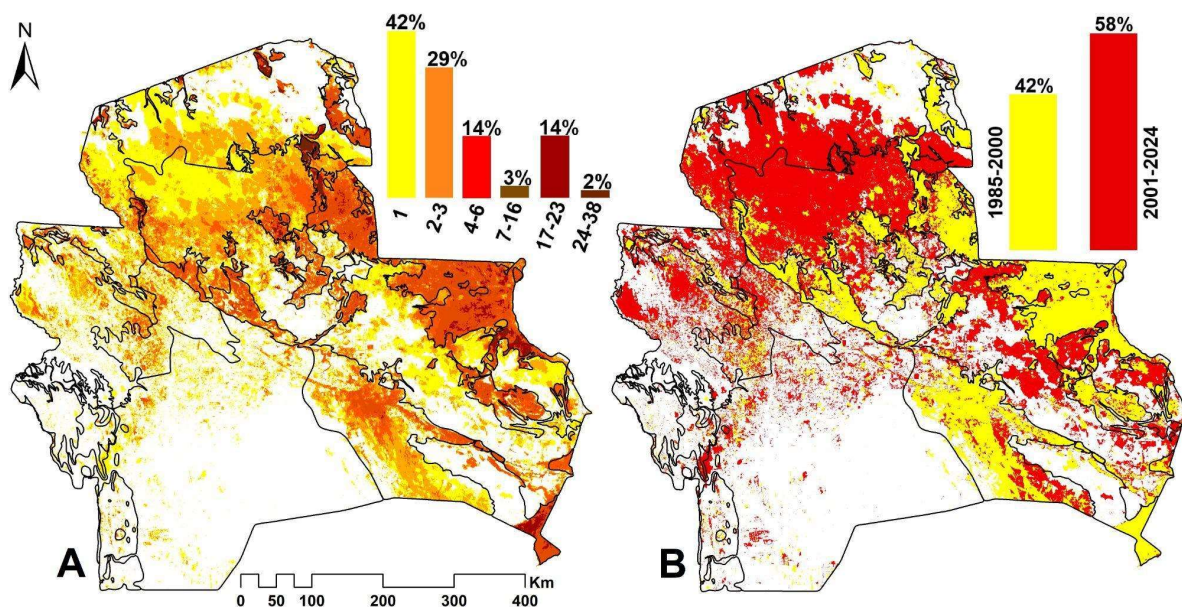


Figura 8. a. Frecuencia de los incendios y b. La dinámica de los incendios forestales por décadas (1985-200 y 2001-2024), en el departamento de Santa Cruz.

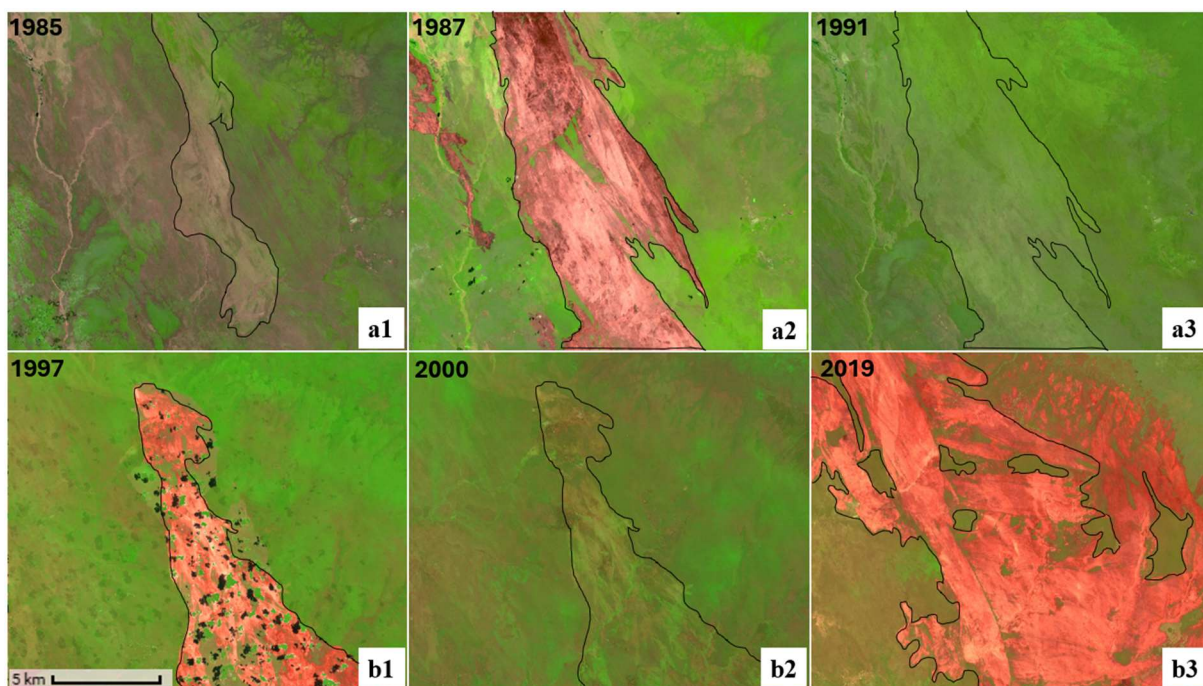


Figura 9. Cicatrices históricas de quema y eventos recurrentes en el departamento de Santa Cruz.

Discusión

La reconstrucción histórica realizada refuerza el valor de la teledetección como herramienta eficaz para comprender no sólo la magnitud y frecuencia de los incendios, sino su evolución temporal. Lejos de ser eventos aislados, muchos incendios recientes responden a dinámicas de largo plazo, vinculadas tanto a ciclos ecológicos como a prácticas antrópicas tradicionales. Reconocer estos antecedentes permiten evitar interpretar como nuevos incendios que en realidad forman parte de los patrones históricos, destinado a informar futuros esfuerzos de prevención, manejo

adaptados a las características ecológicas y culturales del territorio.

El componente histórico resulta importante al momento de entender la resiliencia o vulnerabilidad de los ecosistemas. En algunos casos, el fuego cumple un rol ecológico funcional, promoviendo procesos de regeneración o mantenimiento de especies adaptadas, lo cual debe ser considerado en los modelos de planificación territorial. El análisis espacial basado en imágenes satelitales multiespectrales localiza de forma precisa las áreas

quemadas entre 1985 y 2024. La comparación interanual muestra patrones consistentes de recurrencia y una expansión gradual de las zonas afectadas. La evidencia espacial proporciona una base técnica sólida en la planificación ambiental, la evaluación de impactos y la identificación de áreas prioritarias para la intervención.

Los resultados coinciden con lo reportado por (Giorgis *et al.* 2021), quienes analizaron 1.400 respuestas ecológicas al fuego en ecosistemas sudamericanos, concluyendo que el impacto del fuego varía en función del tipo de vegetación, el régimen climático y el tiempo desde el último evento. La heterogeneidad ecológica del departamento de Santa Cruz, caracterizada por la presencia de sabanas, bosques secos y húmedos, condiciona la respuesta de los ecosistemas frente a incendios. En los bosques secos tropicales del oriente boliviano, la supervivencia y el rebrote de especies arbóreas muestran variaciones significativas entre ecosistemas, traduciendo en patrones diferenciados de resiliencia y degradación ecológica (Mostacedo *et al.* 2022).

Este enfoque se alinea con la revisión de (Díaz *et al.* 2022), quienes constataron una visión matizada del fuego en ecosistemas terrestres. En síntesis, los efectos del fuego varían considerablemente según el tipo de ecosistema, el régimen de incendios y las características locales de la vegetación, mostrando que las respuestas de los ecosistemas pueden ser complejas y heterogéneas. La relación entre cambio climático, desarrollo humano y propagación del fuego ha sido abordada por (Devišcher *et al.* 2016), quienes modelaron escenarios de riesgo en la región chiquitana. Sus resultados evidencian la expansión de la frontera agrícola, la construcción de carreteras y el aumento de temperaturas han incrementado la probabilidad de incendios en áreas previamente menos afectadas.

En conjunto, estos hallazgos caracterizan aspectos clave de los incendios en el departamento de Santa Cruz, incluyendo su extensión, recurrencia y cobertura afectada. La información proporciona un sustento confiable para futuras investigaciones, destinadas a comprender las causas subyacentes del fuego, orientadas a estrategias de gestión adaptativas y contextualizadas en la región.

Conclusiones

El análisis de cuatro décadas de incendios forestales en el departamento de Santa Cruz durante el periodo 1985-2024 revela una intensificación sostenida del fenómeno, con un marcado incremento en la superficie afectada, la recurrencia de eventos y su expansión hacia nuevas regiones ecológicas. La presión creciente sobre coberturas boscosas y ecosistemas vulnerables, como el bosque seco chiquitano, el Cerrado y la Amazonía, evidencia una transformación estructural en la dinámica del fuego, estrechamente vinculada a procesos de cambio de uso de suelo, acumulación de biomasa y factores climáticos extremos.

La integración de series temporales, análisis espacial y clasificación supervisada mediante la plataforma Google Earth Engine es una herramienta valiosa que detecta patrones espacio-temporales, identificando zonas de alta recurrencia y generando información relevante en la planificación territorial, la gestión ambiental y la reducción del riesgo climático. La metodología caracteriza la evolución del fuego a partir de las imágenes satelitales disponibles, conocer eventos históricos que no cuentan con documentación oficial, pese a que dichos eventos no fueron corroborados con fuentes externas.

En particular, el análisis temporal revela la dinámica de incendios desde 1985, confirmando una presencia prolongada del fuego en ciertos paisajes del oriente boliviano. Los resultados indican que algunas áreas han sido expuestas a regímenes de fuego recurrentes por décadas, con implicancias ecológicas relevantes en términos de adaptación o degradación del ecosistema. En este escenario, la identificación de huellas históricas mediante imágenes satelitales presenta un avance clave para comprender la dinámica ecológica del fuego, superando las limitaciones de los registros convencionales.

Agradecimientos

Este estudio fue desarrollado en el marco de trabajo de la Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN) y con el apoyo y financiamiento de Suecia y la Unión Europea. Los autores agradecen las contribuciones realizadas por los revisores anónimos de la revista.

Referencias

- Abatzoglou, J.T., & A.P. Williams. 2016. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(42): 11770-11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
- Andersen, L.E., F. Argandoña, C. Olmos, D.L. Calderón Acebey, S. Miranda Cuevas, A. Muñoz Quisberth & S. Choque Sunagua. 2025. Assessing CO2 emissions from deforestation and fires in Bolivia during 2010-2023 Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible Bolivia, La Paz. <https://sdsnbolivia.org/working-paper-n2-2025-assessing-co2-emissions-from-deforestation-and-fires-in-bolivia-during-2010-2023/>
- ANF (Agencias de Noticias Fides). 2024. Gobierno afirma que el fuego consumió 6.9 millones de hectáreas, supera el récord de quemas de 2019. La Paz. <https://www.noticiasfides.com/cuidado-de-la-casa-comun/gobierno-afirma-que-el-fuego-consumio-6-9-millones-de-hectareas-supera-el-record-de-quemas-de-2019>
- Belmonte, M. A. 2025. Reportan casi 1.000 focos de calor en Bolivia, se atendieron 167 incendios forestales.

- Visión 360, La Paz.
<https://www.vision360.bo/noticias/2025/10/23/33906-reportan-casi-1000-focos-de-calor-en-bolivia-se-atendieron-167-incendios-forestales>
- Bowman, D.M. J.S., J.K. Balch, P. Artaxo, W.J. Bond, J.M. Carlson, M.A. Cochrane, C.M. D'Antonio, R.S. DeFries, J.C. Doyle, S.P. Harrison, *et al.* 2009. Fire in the Earth system. *Science* 324(5926): 481-484.
<https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning* 45(1): 5-32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chazdon, R., P. Brancalion, L. Laestadius, A. Bennett, K. Buckingham, C. Kumar, J. Moll-Roczek, I. Guimarães Vieira & S. Wilson. 2016. When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio* 45.
<https://doi.org/10.1007/s13280-016-0772-y>
- Chuvieco, E., F. Mouillot, G.R. van der Werf, J. San Miguel, M. Tanase, N. Koutsias, M. García, M. Yebra, M. Padilla & I. Gitas. 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment* 225: 45-64.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
- Devisscher, T., L.O. Anderson, L.E.O.C. Aragão, L. Galván, & Y. Malhi. 2016. Increased wildfire risk driven by climate and development interactions in the Bolivian Chiquitania, Southern Amazonia. *PloS One* 11(9): e0161323.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161323>
- Díaz, J.V.R., C. Santín, J. Martínez-Vilalta, & S.H. Doerr. 2022. A global synthesis of fire effects on ecosystem services of forests and woodlands. *Frontiers in Ecology and the Environment* 20(3): 170-178.
<https://doi.org/10.1002/fee.2349>
- Doerr, S. H., & C. Santín. 2016. Global trends in wildfire and its impacts: Perceptions versus realities in a changing world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371(1696): 20150345. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0345>
- Giorgis, M.A., S.R. Zeballos, L. Carbone, H. Zimmermann, H. von Wehrden, R. Aguilar, A.E. Ferreras, P.A. Tecco, E. Kowaljow, F. Barri *et al.* 2021. A review of fire effects across South American ecosystems: The role of climate and time since fire. *Fire Ecology* 17(1): 11.
<https://doi.org/10.1186/s42408-021-00100-9>
- Google GEE. s.f. New script—Earth engine code editor.
<https://earthengine.google.com/>
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau & R. Moore. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Ibisch, P., S. Beck, B. Gerkmann & A. Carretero. 2004. Ecorregiones y ecosistemas. Pp. 47-88. En: Ibisch, P.L. & G. Mérida (eds.), *Biodiversidad: La Riqueza de Bolivia, Estado de Conocimiento y Conservación*. Editorial Amigos de la Naturaleza, Santa Cruz de la Sierra.
- Jones, M.W., J.T. Abatzoglou, S. Veraverbeke, N. Andela, G. Lasslop, M. Forkel, A.J.P. Smith, C. Burton, R.A. Betts, G.R. van der Werf *et al.* 2022. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics* 60(3): e2020RG000726.
<https://doi.org/10.1029/2020RG000726>
- Key, C.H. & N.C. Benson 2003. The normalized burn ratio (NBR): a Landsat TM radiometric measure of burn severity (Abstract). US Geological Survey Northern Rocky Mountain Science Center, U.S. Department of the Interior, Washington DC.
https://nrfirescience.org/resource/11185?utm_source=chartgpt.com
- Maillard, O. 2023. Post-fire natural regeneration trends in Bolivia: 2001-2021. *Fire* 6(1): 18.
<https://doi.org/10.3390/fire6010018>
- MapBiomias. 2025. 2024 Colección 3 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Bolivia.
<https://bolivia.mapbiomas.org/colecciones-mapbiomas-bolivia/>
- Mostacedo, B., A. Viruez, Y. Varon, A. Paz-Roca, V. Parada, & V. Veliz. 2022. Tree survival and resprouting after wildfire in tropical dry and subhumid ecosystems of Chiquitania, Bolivia. *Trees, Forests and People* 10: 100327.
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100327>
- Oliveira, A. 2024. Mapping burned areas in the Cerrado using time series from the CBERS and Amazonia satellites. Tesis de maestría, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Pandey, P., G. Huidobro, L.F. Lopes, A. Ganteaume, D. Ascoli, C. Colaco, G. Xanthopoulos, T.M. Giannaros, R. Gazzard, G. Boustras, *et al.* 2023. A global outlook on increasing wildfire risk: current policy situation and future pathways. *Trees, Forests and People* 14: 100431.
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100431>
- Roy, D., M. Wulder, T. Loveland, C. Woodcock, R. Allen, M. Anderson, D. Helder, J.R. Irons, D. Johnson, R. Kennedy, T. Scambos, *et al.* 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment* 145: 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>