

# 4.7

Identificar la extensión de las zonas quemadas es esencial para planificar las medidas necesarias de restauración, tras los incendios.  
Foto: Harifidy Rakoto Ratsimba

## Utilización de imágenes satelitales para monitorear las zonas quemadas en Madagascar

*Gaston Hedwigino Tahintsoa, Dimby Raherinjatovoarison, Haritiana Zacharie Rakotoarinivo, Rajira Nambinintsoa Ratsimandresy y Harifidy Rakoto Ratsimba*

***“El monitoreo de los incendios mediante la cartografía de las zonas quemadas desempeña un papel crucial en el diseño de programas adecuados de manejo del fuego.”***

### Introducción

La conservación del patrimonio natural único de Madagascar es una de las principales preocupaciones de las autoridades públicas, y también atrae la atención de las organizaciones internacionales. Una amenaza para la flora y la fauna del país es la recurrencia de los incendios forestales. Es cierto que muchos de los paisajes forestales del país han sido moldeados durante mucho tiempo por el fuego, pero el aumento de la frecuencia de los incendios y de la superficie total quemada está teniendo repercusiones cada vez más negativas en los ecosistemas. Los incendios forestales también afectan a los medios de subsistencia al quemar los bosques e incluso las tierras de cultivo de las que dependen las personas. Sin embargo, el manejo eficaz del fuego sigue siendo un reto importante para los administradores de los recursos naturales del país. Un requisito previo es comprender primero la magnitud del problema, para poder planificar estrategias tanto de adaptación como de respuesta. Para ello se necesitan datos cuantitativos precisos sobre cuándo y dónde arden los incendios.





Desde el año 2000, la vigilancia por satélite de los incendios en tiempo casi real se ha popularizado y utilizado ampliamente en Madagascar, sobre todo en las zonas protegidas y sus alrededores. Se ha utilizado principalmente para activar alertas como parte de los sistemas de advertencia temprana para aumentar la movilización oportuna de las respuestas para el combate de incendios. Sin embargo, se han hecho evidentes algunas limitaciones, especialmente en el análisis de los impactos relacionados con la frecuencia y la extensión de los incendios en las mismas superficies quemadas.

Este artículo presenta los resultados de un estudio realizado en 2021 sobre una superficie de 1.575 ha en el Parque Nacional de Ankarafantsika y sus alrededores, en el noroeste de Madagascar, utilizando imágenes de satélite, imágenes de drones y datos verificados sobre el terreno para evaluar la precisión y utilidad de la cartografía a la hora de cuantificar las zonas quemadas. Durante ese año se quemaron en el parque 13.073 ha (alrededor del 10% de su superficie total), predominantemente en septiembre y octubre. El parque no sólo alberga una biodiversidad excepcional, sino que también desempeña un papel en la economía de la región de Boeny como regulador hídrico de las llanuras de Marovoay, una de las principales zonas arroceras del país. Por ello, su protección y conservación son esenciales.

## Quantificación de las áreas quemadas

Las zonas quemadas se caracterizan por la presencia de depósitos de carbón y cenizas, la eliminación de cubierta vegetal y el cambio en la estructura de la vegetación (Boschetti et al. 2006). Esto provoca un cambio en el comportamiento espectral de las superficies en el tiempo y el espacio que puede ser rastreado fácilmente mediante teledetección.

Las imágenes de baja y media resolución espacial se utilizan para desarrollar herramientas de monitoreo de las superficies quemadas. Muchas de estas imágenes son tomadas por el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR), el Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental (GOES) y el Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS). El MODIS es el sensor más utilizado porque tiene la mayor resolución espacial (500 m) y puede detectar incendios activos, lo que permite tomar decisiones rápidamente. Sin embargo, incluso con su alta resolución es difícil para los usuarios determinar la extensión de los incendios pequeños, que son muy frecuentes en los ambientes tropicales. El lanzamiento de Landsat 8 OLI en 2013 (de 30 m de resolución) y Sentinel-2 MSI en 2015 (de 10 m y 20 m de resolución), permitió el uso de sensores con mejor resolución espacial (Mpakairi et al. 2020).

## Evaluación con tres sensores

Para este estudio se llevaron a cabo análisis utilizando MODIS, con la última colección MCD64A1, Landsat

8 y Sentinel-2. Las imágenes del sur del Parque Nacional de Ankarafantsika fueron obtenidas entre el 15 y el 17 de octubre de 2021, tras haberse observado eventos de incendios específicos sobre el terreno. Las imágenes MODIS de octubre de 2021 se descargaron de la plataforma EarthExplorer y las de Landsat 8 y Sentinel-2 se procesaron y clasificaron directamente en la plataforma Google Earth Engine Cloud.

Se utilizaron índices espectrales para discriminar mejor las zonas quemadas en las imágenes de satélite; la combinación de dos o más índices mejoró la clasificación (Bastarrika et al. 2011). Se utilizaron dos índices comunes: (i) el Índice Normalizado de Área Quemada (NBR, por sus siglas en inglés) y el Índice de Área Quemada (BAI, por sus siglas en inglés) para imágenes Landsat; y (ii) el NBR y BAIS-2 (la versión mejorada de BAI) para imágenes Sentinel-2 (Filipponi 2018). Al igual que otros índices espectrales normalizados, el valor teórico del índice NBR varía entre 1 y -1: un valor alto indica un buen estado de la vegetación, mientras que un valor bajo indica suelo desnudo o una zona quemada (Key y Benson 2003). El BAI no tiene valores límite, pero en general, los valores más altos indican zonas quemadas (Chuvieco et al. 2002); el índice funciona mejor en zonas boscosas, donde resalta los depósitos de ceniza (Mpakairi et al. 2020). En las imágenes Landsat, las zonas quemadas suelen tener un valor del NBR entre 0 y 0,3, y un valor del BAI superior a 70 (Stroppiana et al. 2002). Para las imágenes Sentinel, las zonas quemadas tienen un valor NBR inferior a 0, y un valor BAIS-2 superior a 0,87.

A continuación, los resultados se validaron en tres etapas:

- En primer lugar, se llevó a cabo una verificación sobre el terreno para evaluar cualquier error relacionado con la identificación y estimación de las zonas quemadas. Para ello, se registraron datos directamente sobre el terreno, correspondientes a 89 puntos GPS (Figura 1), una proporción comparable a la empleada en estudios realizados en zonas biogeográficas similares (por ejemplo, Axel 2018).
- En segundo lugar, se calcularon tres parámetros de error para comparar el rendimiento de los sensores MODIS, Landsat 8 y Sentinel-2: error de omisión (es decir, subestimaciones), error de comisión (es decir, sobreestimaciones) y precisión general.
- En tercer lugar, se compararon los resultados de los tres sensores con imágenes en color real obtenidas mediante un sobrevuelo de un dron cuadricóptero Mavic 2 pro a 100 m de altitud, con

una resolución espacial de 5 cm, para evaluar los posibles errores en los bordes de las zonas quemadas debidos a la diferencia de resolución espacial de los sensores (Figura 2).

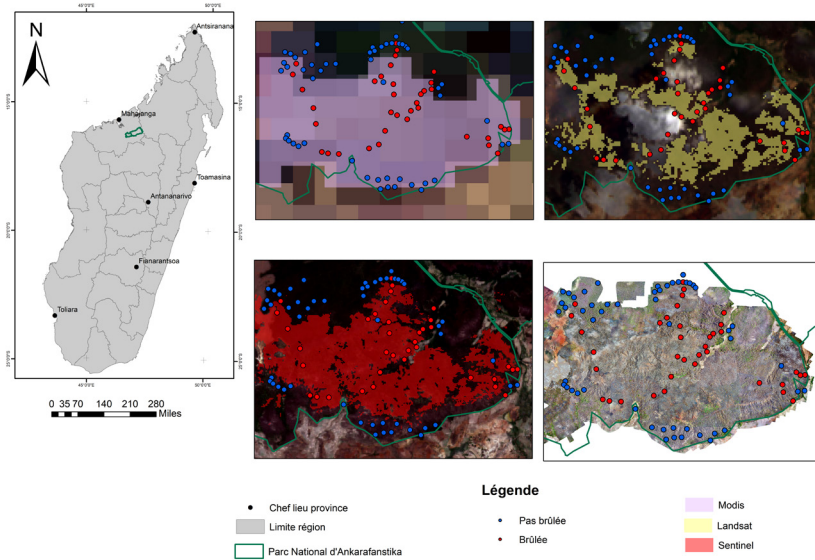
En un área de 1.575 ha en el Parque Nacional de Ankarafantsika, los tres satélites proporcionaron estimaciones muy diferentes de la superficie del bosque quemado, con 1.181 ha cuantificadas por MODIS; 330 ha por Landsat 8; y 656 ha por Sentinel-2. Se requirió entonces realizar una comparación del error de comisión, el error de omisión y la precisión global para estimar con exactitud el área quemada total.

El sensor MODIS presentó un elevado error de comisión (57%) en comparación con Sentinel-2 (10%) y Landsat 8 (4%), lo que significa que más de la mitad de las zonas quemadas que detectó MODIS no estaban realmente afectadas por el fuego y, por tanto, eran sobreestimaciones considerables. Por el contrario, Landsat 8 tendió a no reconocer muchas zonas quemadas, teniendo con diferencia el mayor error de omisión (73%), en comparación con Sentinel-2 (27%) y MODIS (16%). La causa de este error puede deberse a la nubosidad de la imagen o a subestimaciones relacionadas con la presencia de árboles en pie tras los incendios.

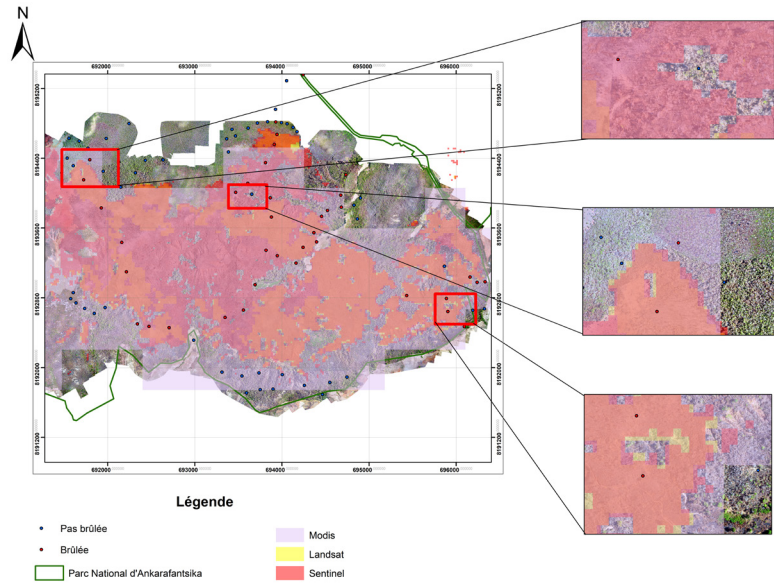
Las imágenes aéreas de los drones se correspondieron de forma consistente con los datos terrestres. Las causas de los errores de omisión y comisión de los tres sensores se revalidaron a continuación utilizando las imágenes en color verdadero de los UAV. La mayoría de los errores se observaron en los bordes de las zonas quemadas en las imágenes de los UAV (Figura 2), y sin duda estaban relacionados con la diferencia de resolución espacial (500 m para MODIS, 30 m para Landsat, 10 m para Sentinel-2 y 5 cm para las imágenes de los UAV). La validación en tierra y las imágenes del UAV también mostraron que los incendios de superficie que no alcanzan las copas de los árboles, dejándolas verdes, no son detectados por las imágenes Landsat y Sentinel.

El sensor Sentinel-2 superó ampliamente a los otros dos sensores, con un error de omisión del 27%, un error de comisión del 10% y una mayor precisión global del 83%. Sentinel-2 también cuenta con una mejor resolución espacial (10 m y 20 m) y temporal (5 días). Además, las imágenes de Sentinel-2 son gratuitas y pueden utilizar 13 bandas espectrales. Además, la probabilidad de disponer de una serie temporal de imágenes incluso con poca nubosidad es mayor con Sentinel-2 que con Landsat.





**Figura 1. Datos de campo utilizados para validar la cartografía de áreas quemadas a partir de MODIS, Landsat 8 y Sentinel-2 en el Parque Nacional de Ankarafantsika.**



**Figura 2. Errores observados en los bordes de las superficies quemadas a partir de MODIS, Landsat 8 y Sentinel-2, en comparación con las imágenes en color real de UAV.**

### Aplicación de los métodos

En base a estos resultados, actualmente se realiza un análisis mensual de las zonas quemadas en todo el país utilizando imágenes de Sentinel-2 y el método cartográfico empleado en este estudio; los resultados están disponibles gratuitamente en el Centro Regional de Recursos para el Manejo del Fuego en África Oriental (REAFMRC). El centro se estableció en el Laboratorio de Investigación sobre la Tierra, el Paisaje y el Desarrollo de la Universidad de Antananarivo, con la ayuda del Centro Mundial de Monitoreo de Incendios (GFMC).

El geoportal de libre acceso del centro REAFMRC facilita compartir información sobre incendios con todos los actores interesados, desde público en general hasta los responsables políticos. Para apoyar esta iniciativa, el

REAFMRC organizó talleres a finales de 2021 y principios de 2022 con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a nivel nacional y regional, dirigidos a diseñadores de geoportales y usuarios de instituciones nacionales públicas y privadas que trabajan en manejo del fuego y de los recursos naturales. Una de las primeras observaciones tras la puesta en marcha del geoportal fue la reducción de casi 1.000.000 ha de la superficie total quemada a nivel nacional en 2021 (4.397.342 ha) respecto a la quemada en 2020 (5.380.250 ha). Esta disminución está vinculada a la mayor presencia del ministerio encargado de la gestión ambiental a nivel local y a la movilización de los actores involucrados en la protección activa y la prevención de incendios.

Desde 1997, la detección satelital se utiliza cada vez más para recabar información sobre las zonas quemadas.



Las imágenes aéreas permiten a los usuarios determinar el tamaño de las zonas quemadas. Foto: Gaston Hedwigino Tahintsoa

La cartografía de las zonas quemadas -basada en imágenes de satélite como Sentinel-2- se ha convertido en una herramienta operativa que facilita la toma de decisiones a los administradores responsables del manejo del fuego. La misma proporciona información valiosa para todos los involucrados en el manejo del fuego y de las tierras quemadas, mediante una estimación rápida, precisa y económica de las áreas quemadas. De hecho, aunque las mediciones sobre el terreno suelen proporcionar estimaciones más precisas de las superficies quemadas, pueden ser difíciles de llevar a cabo, debido a las limitaciones para acceder a ciertas áreas, al considerable tiempo necesario para realizar estimaciones en grandes áreas afectadas y a los importantes recursos humanos y materiales que hay que movilizar.

La técnica aquí expuesta permite localizar rápidamente las zonas prioritarias de intervención para su conservación o para la planificación de protocolos de restauración. En el Parque Nacional de Ankarafantsika, la información proporcionada por los datos satelitales ha permitido a los administradores del parque elaborar, en colaboración con el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible de Madagascar, un plan quinquenal de restauración de las zonas afectadas por los incendios. El plan se ejecutará con las comunidades locales, y contará con el apoyo de organizaciones ambientalistas locales y viveros de las aldeas que proporcionarán plantones de especies forestales para su siembra. Esto no sólo enriquecerá el parque con especies leñosas menos

sensibles al fuego, reduciendo así el riesgo de incendios, sino que también aumentará los ingresos locales gracias a la venta de plantones.

## Conclusiones

Cartografiar la extensión de las zonas afectadas por incendios es muy importante para el manejo integral del fuego, especialmente para la comunicación y movilización de los actores involucrados, la rehabilitación de las zonas quemadas y la toma de decisiones. El escalamiento de este tipo de procesos cartográficos permite el desarrollo de la detección sistemática de las áreas quemadas mensual y anualmente, lo que hace posible ajustar las posibles respuestas de manejo del fuego en paisajes abiertos y boscosos.

En base al uso exitoso de datos obtenidos de mapas satelitales en Madagascar, el geoportal del centro REAFMRC se está ampliando para cubrir todos los países de África Oriental. Se ha dado un primer paso: comparar el enfoque con el de la Agencia Espacial Europea (que mide las áreas quemadas que cubren toda África utilizando imágenes Sentinel-2, pero que solo está disponible para 2019; véase Roteta et al. 2019). A partir de 2023, el geoportal incluirá las zonas quemadas de una docena de países de África Oriental. La segunda fase de validación se llevará a cabo con la colaboración de los actores administrativos locales involucrados en el manejo del fuego y el control de incendios y se apoyará en verificaciones de campo.



## Referencias

Axel AC. 2018. Burned area mapping of an escaped fire into tropical dry forest in western Madagascar using multi-season Landsat OLI data. *Remote Sensing* 10:371. <https://doi.org/10.3390/rs10030371>.

Bastarrika A, Chuvieco E and Martín M. 2011. Automatic burned land mapping from MODIS time series images: Assessment in Mediterranean ecosystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49(9):3401–3413. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2128327>.

Boschetti L, Brivio PA, Eva HD, Gallego J, Baraldi A and Grégoire J. 2006. A sampling method for the retrospective validation of global burned area products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44:1765–1773. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.874039>.

Chuvieco E, Martin MP and Palacios A. 2002. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing* 23:5103–5110. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>.

Filipponi F. 2018. BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2. Conference Proceedings Paper SciForum 2:364. [https://www.researchgate.net/publication/323964124\\_BAIS2\\_Burned\\_Area\\_Index\\_for\\_Sentinel-2/fulltext/5adcc8e1a6fdcc29358b5040/BAIS2-Burned-Area-Index-for-Sentinel-2.pdf](https://www.researchgate.net/publication/323964124_BAIS2_Burned_Area_Index_for_Sentinel-2/fulltext/5adcc8e1a6fdcc29358b5040/BAIS2-Burned-Area-Index-for-Sentinel-2.pdf).

Key CH and Benson NC. 2003. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. United States Geological Survey, Northern Rocky Mountain Science Center: Bozeman, MT. <https://www.frames.gov/catalog/5860>.

Mpakairi KS, Ndaimani H and Kavhu B. 2020. Exploring the utility of Sentinel-2 MSI derived spectral indices in mapping burned areas in different land-cover types. *Scientific African* 10:e00565. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00565>.

Roteta E, Bastarrika A, Padilla M, Storm T and Chuvieco E. 2019. Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. *Remote Sensing of Environment* 222:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.011>.

Stroppiana D, Pinnock S, Pereira JMC and Grégoire J-M. 2002. Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia. *Remote sensing of Environment* 82:21–37. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00021-4).

Stroppiana D, Pinnock S, Pereira JMC and Grégoire J-M. 2002. Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia. *Remote sensing of Environment* 82:21–37. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00021-4).

---

## Afiliación de los autores

**Gaston Hedwigino Tahintsoa**, Researcher, Regional Eastern Africa Fire Management Resource Center (REAFMRC), Antananarivo, Madagascar (gtsoa8@gmail.com)

**Dimby Raherinjatovoarison**, Researcher, Land, Landscape and Development Research Lab (LLandDev), Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts (ESSA-Forêts), University of Antananarivo, Antananarivo, Madagascar (arisondimby@gmail.com)

**Haritiana Zacharie Rakotoarinivo**, Researcher, Land, Landscape and Development Research Lab (LLandDev), Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts (ESSA-Forêts), University of Antananarivo, Antananarivo, Madagascar (haritiana.z@gmail.com)

**Rajira Nambinintsoa Ratsimandresy**, Researcher, Land, Landscape and Development Research Lab (LLandDev), Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts (ESSA-Forêts), University of Antananarivo, Antananarivo, Madagascar (44rajnamb@gmail.com)

**Harifidy Rakoto Ratsimba**, Head researcher, Land, Landscape and Development Research Lab (LLandDev), University of Antananarivo; and Head, Regional Eastern Africa Fire Management Resource Center (REAFMRC), Antananarivo, Madagascar (rrharifidy@moov.mg)