

# PRECISIÓN DEL PRODUCTO SATELITAL MODIS PARA LA REPRESENTACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS EN LOS ANDES DE CUSCO

Yerson Ccanchi<sup>1</sup> y Ricardo Zubieta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

**Palabras clave:** Superficies quemadas, incendios forestales, MODIS, Andes, imágenes satelitales.

Citar como Ccanchi, Y. & Zubieta, R. (2025). Precisión del producto satelital MODIS para la representación de áreas quemadas en los Andes de Cusco. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.o 05, págs. 14-19.

## ¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para los tomadores de decisiones?\*

Ante la problemática creciente de los incendios forestales en el Perú. El artículo ofrece una evaluación de la capacidad de datos satelitales del producto MODIS para representar áreas quemadas en zonas de alta montaña de la región Cusco. Con fines de respuesta ante desastres, estos datos pueden ser considerados útiles para el monitoreo de áreas quemadas durante el desarrollo de incendios forestales de gran magnitud. No obstante, el producto MODIS evaluado (MCD64A1) debido a su resolución espacial y temporal no es adecuado para el monitoreo de quemas agrícolas, debido a su menor área superficial y el tiempo de duración de estas prácticas.

## 1. Introducción

Los incendios forestales en la región altoandina pueden alcanzar grandes extensiones de vegetación natural, afectando el desarrollo de ecosistemas como pastizales, matorrales y bosques montanos (Aronés Cisneros et al., 2024). No obstante, el fuego también puede considerarse una fuerza ecológica que impulsa la evolución de los paisajes, regula las interacciones entre especies y contribuye al funcionamiento de los ecosistemas (Pausas, 2022). Entre los principales efectos del fuego se encuentran la alteración de las propiedades físico-químicas del suelo y la modificación en la dominancia de especies vegetales (Roman, 2024)

La zona de alta montaña de Cusco es una de las regiones con mayor número de incendios forestales

registrados en las últimas dos décadas, con eventos que pueden extenderse por más de 500 ha (Ccanchi, 2021; Zubieta et al., 2023). Este problema se ve agravado por condiciones climáticas extremas, como las sequías severas asociadas al fenómeno El Niño y al aumento de la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte Tropical, que crean ambientes extremadamente secos, propicios para la propagación del fuego (Erfanian et al., 2017; Espinoza et al., 2011). Por otro lado, los eventos La Niña pueden incrementar las precipitaciones y favorecer el crecimiento de la vegetación. Aunque estas condiciones pueden beneficiar temporalmente a los ecosistemas mediante un excedente hídrico (Román-Cuesta et al., 2014), si la lluvia es relativamente uniforme durante la temporada húmeda, esta lluvia estacional contribuye usualmente al incremento de la biomasa (Zhang et al. 2020), el

cual a su vez, aumenta el riesgo de incendios debido a la mayor disponibilidad de combustible vegetal durante el periodo seco.

Disponer de información precisa sobre las superficies quemadas es esencial para evaluar el impacto ecológico de los incendios, estimar las emisiones de carbono y diseñar estrategias efectivas de recuperación y prevención (Boschetti et al., 2019; Ramo et al., 2021). En este sentido, la teledetección se ha consolidado como una herramienta clave, ya que proporciona datos de alta frecuencia y amplia cobertura, lo que facilita el análisis de las superficies afectadas por el fuego. Entre los productos satelitales del sensor MODIS más utilizados a nivel global, destaca el MCD64A1 por su amplia cobertura espacial y temporal (Giglio et al., 2018). No obstante, su resolución espacial moderada puede limitar la precisión en la delimitación de las áreas efectivamente quemadas (Boschetti et al., 2019; Hall et al., 2021).

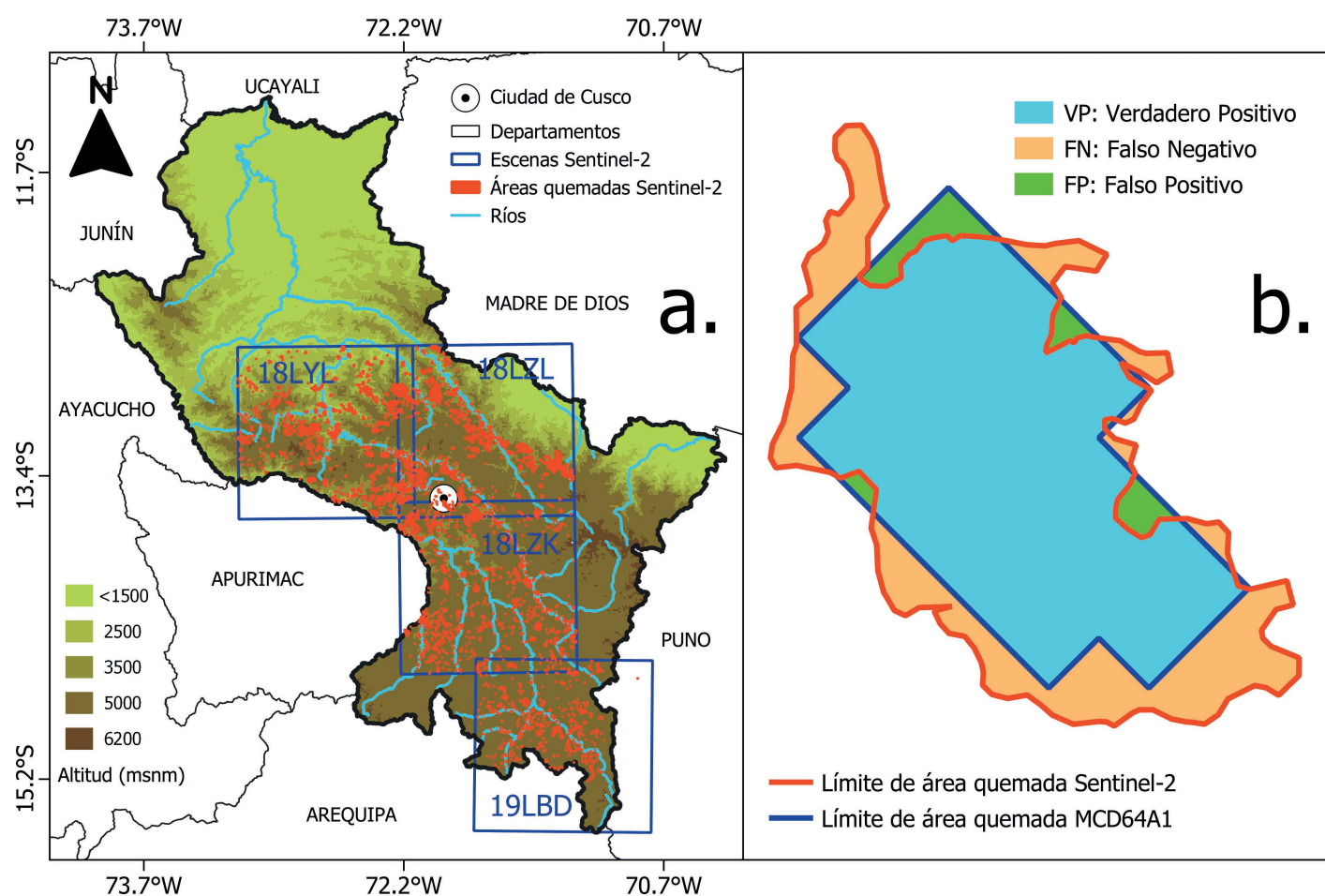
Esta limitación se acentúa en regiones de alta montaña, donde los productos diarios de focos de calor MOD14A1 y MYD14A1, utilizados como datos de entrada para la generación del MCD64A1, presentan una alta tasa de omisión, especialmente sobre superficies quemadas de menor tamaño (Zubieta et al., 2024).

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la representatividad espacial de las superficies quemadas propuestas por MODIS mediante el producto MCD64A1 en la región altoandina de Cusco. Ello mediante la evaluación de sus errores de omisión y comisión con respecto a superficies quemadas identificadas mediante imágenes Sentinel-2. Esta comparación busca comprender las limitaciones y alcances de MODIS en la detección de áreas impactadas por incendios forestales, contribuyendo así al fortalecimiento de los sistemas de monitoreo y gestión del fuego en ecosistemas altoandinos.

## 2. Metodología

Este estudio se fundamentó en el análisis del producto satelital MCD64A1, el cual proporciona información sobre superficies quemadas con una resolución espacial de 500 m y una resolución temporal mensual, asignando una fecha aproximada al evento de quema. Sin embargo, una de sus limitaciones de este producto es su incapacidad para distinguir si los píxeles adyacentes corresponden a un mismo evento de incendio.

Para abordar este problema, Artés et al. (2019) propusieron una metodología basada en un algoritmo de análisis espaciotemporal que permite identificar



**Figura 1.** (a) Mapa de ubicación de la zona de estudio. (b) Superficies quemadas identificadas con MCD64A1 y Sentinel-2 para el cálculo de errores de comisión y omisión a nivel de área.

eventos individuales de incendio a partir del agrupamiento de píxeles contiguos y cercanos en el tiempo del producto MCD64A1. Este enfoque permite reconstruir la evolución de incendios complejos, incluso cuando presentan múltiples focos de ignición o superficies no contiguas. El producto refinado resultante de esta metodología es el Global Wildfire Information System (GWIS), el cual fue empleado en el presente estudio para determinar tres características clave de los incendios registrados: el tamaño total del área quemada, la fecha de inicio del incendio y la fecha de finalización del evento.

Para evaluar la precisión del producto MCD64A1, se utilizaron como referencia los datos de superficies quemadas identificados por Zubieta et al. (2023), obtenidos a partir de imágenes del satélite Sentinel-2. Gracias a su resolución espacial de 20 m, estas imágenes permitieron detectar y caracterizar áreas quemadas a partir de 1 ha. El área y el periodo de estudio fueron los mismos considerados en Zubieta et al. (2023), abarcando zonas por encima de los 1500 m. s. n. m. en los Andes de Cusco). Se utilizaron las escenas Sentinel-2: 18LZL, 18LZK, 18LYL y 19LBD, durante los meses de julio y agosto de los años 2019 y 2020. Estos meses fueron seleccionados por coincidir con la temporada de estiaje, periodo caracterizado por cielos despejados y una mayor incidencia de incendios forestales y quemas agrícolas.

Con la finalidad de evaluar la capacidad del producto MCD64A1 para identificar incendios de diferentes dimensiones, se estimó el porcentaje de superficies quemadas detectadas con Sentinel-2 que no fueron captadas por MCD64A1 en comparación a los

delimitados usando Sentinel-2, según su rango de tamaño. Adicionalmente, se evaluó la precisión del producto MCD64A1 en la detección de áreas quemadas mediante el cálculo de los errores por comisión y omisión, siguiendo las métricas propuestas por Boschetti et al. (2019). Estas métricas se estimaron utilizando las siguientes fórmulas:

$$EC (\%) = \frac{FP}{VP + FP} \times 100$$

$$EO (\%) = \frac{FN}{VP + FN} \times 100$$

Donde:

- EC y EO representan los errores por comisión y omisión, respectivamente, expresados en porcentaje.
- FP (Falso Positivo): Área identificada como quemada por MCD64A1 que no está en la referencia de Sentinel-2.
- FN (Falso Negativo): Área quemada detectada en Sentinel-2 que no fue identificada por MCD64A1.
- VP (Verdadero Positivo): Área quemada detectada tanto por MCD64A1 como por Sentinel-2, es decir, aquellas cicatrices que coinciden en ambos productos.

La representación gráfica de este análisis se muestra en la Figura 1b.

**Tabla 1.** Comparación de la detección de superficies quemadas con Sentinel-2 y MCD64A1 en la región altoandina de Cusco

Rango de superficie quemada (ha)	N° de superficies quemadas detectadas con Sentinel-2	N° de coincidencias con MCD64A1	% no detectado por MCD64A1
>=1&<5ha	2213	0	100
>=5&<10ha	440	0	100
>=10&<25ha	384	0	100
>=25&<50ha	238	2	99.2
>=50&<100ha	117	4	96.6
>=100&<500ha	146	32	78.1
>=500ha	24	23	4.2

### 3. Resultados y discusión

Las cicatrices de quemas identificadas mediante Sentinel-2 representan la totalidad de los incendios ocurridos en el área y período de estudio descritos por Zubieta et al. (2023). La Tabla 1 proporciona evidencias de las limitaciones del producto MCD64A1 en la detección de superficies quemadas de pequeña extensión. En particular, se observa que los incendios menores a 25 ha no son detectados por MCD64A1, lo cual es coherente con su resolución espacial de 500 m, que equivale a una superficie mínima de detección de aproximadamente 25 ha por píxel.

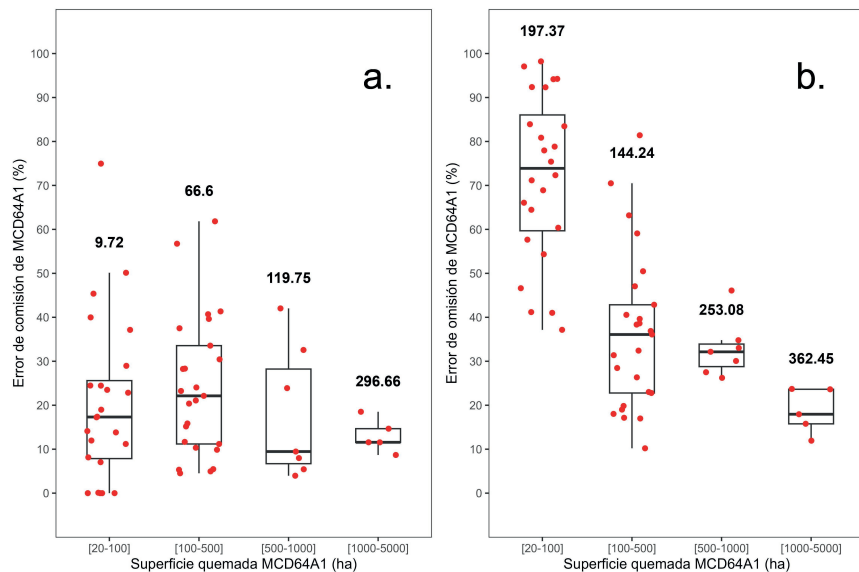
Debido a esta resolución, los incendios de menor tamaño quedan enmascarados dentro de píxeles mixtos, en los que las señales espectrales de áreas quemadas se combinan con la vegetación, suelo o cuerpos de agua, lo que impide su adecuada identificación (Zhu et al., 2017). Para el rango de incendios de 25 a 100 ha, se observa una leve mejora en la detección; sin embargo, la omisión sigue siendo significativa, superando el 90 % de los eventos identificados con Sentinel-2. Esta alta tasa de omisión está en línea con la metodología empleada en la detección de áreas quemadas mediante el producto MCD64A1, el cual depende fundamentalmente de la detección de focos de calor MODIS como insumo clave para su algoritmo (Giglio et al., 2018).

En esta línea, Zubieta et al. (2023, 2024) también reportan que un alto porcentaje de superficies quemadas menores a 100 ha en los Andes de Cusco no son detectadas por MCD64A1, lo cual refuerza la evidencia sobre las limitaciones del MCD64A1 en la identificación de incendios de pequeña escala. En el caso de incendios de mayor magnitud, específicamente en el rango de 100 a 500 ha, el producto MCD64A1 logra identificar aproximadamente el 22 % de las áreas quemadas reconocidas por Sentinel-2, lo que representa una mejora relativa en su desempeño. La mayor coincidencia entre ambos sensores se presenta en incendios de gran extensión, es decir, aquellos con áreas quemadas superiores a 500 ha. En este rango, de los 24 eventos identificados con Sentinel-2, 23 fueron también detectados con MCD64A1, lo que representa una tasa de omisión del 4.2 %.

Esta mayor capacidad de detección, como señala Zhu et al. (2017), puede explicarse por el hecho de que los incendios de gran magnitud suelen tener una mayor duración, lo que genera cambios más pronunciados en la reflectividad de la superficie terrestre. Tales variaciones espectrales, al ser más evidentes, pueden ser captadas con mayor precisión por el sensor MODIS.

En total, se identificaron 61 superficies quemadas con MCD64A1 que coinciden espacialmente con aquellas detectadas por Sentinel-2. Sin embargo, se registraron 25 superficies adicionales en MCD64A1 que no corresponden a ninguna cicatriz de quema real, según lo verificado con Sentinel-2. De estas, 10 se localizaron en zonas glaciares, donde la exposición del suelo tras la desaparición de la nieve generó un contraste espectral marcado con tonos oscuros; sumado a las áreas mencionadas, 13 de ellas se situaron en zonas afectadas por sombras de nubes, lo cual dificultó la detección precisa; y 2 se ubicaron en sectores con múltiples manchas pequeñas (<1 ha) que presentaban variaciones en el color del suelo, lo que complicó su clasificación como área quemada.

Estos errores de clasificación son consistentes con lo señalado por Bastarrika et al. (2011), quienes destacan que uno de los principales desafíos en la automatización de la detección de áreas quemadas radica en la confusión con superficies que presentan firmas espectrales similares a las de una cicatriz de quema. Asimismo, coinciden en parte con los hallazgos de Zubieta et al. (2023, 2024), quienes reportaron una alta tasa de omisión en la detección de fuegos activos de pequeña magnitud en la región altoandina de Cusco. Aunque su enfoque se centró en los focos de calor y no en la delimitación de superficies quemadas, ambos tipos de análisis están estrechamente relacionados, ya que la ausencia de detección de fuegos activos limita la posterior identificación satelital de áreas efectivamente quemadas. Del mismo modo, Giglio et al. (2018) señalan que los algoritmos basados en índices espectrales, como el empleado en el producto MCD64A1, pueden generar falsas detecciones en entornos donde la reflectividad del suelo cambia de forma abrupta debidos a factores no relacionados con incendios, como nieve derretida, sombras topográficas o cambios de otro orden.



**Figura 2.** Diagramas de cajas que muestran la distribución de los errores de comisión (a) y omisión (b) del producto MCD64A1 en los Andes de Cusco, según el rango de tamaño de la superficie quemada. Los puntos rojos representan cada superficie quemada. En negrita se indica el valor promedio de las áreas sobreestimadas (comisión) y subestimadas (omisión) para cada rango de tamaño.

En la Figura 2a-b, se observa que las superficies quemadas entre 20 a 100 ha presentan un error de comisión menor al 50 %, con una sobreestimación promedio de 9.72 ha. Sin embargo, en algunos casos, el error de comisión es del 0 %, lo que indica que MCD64A1 subestima incluso incendios de mayor superficie. Por su parte, el error de omisión en este rango es elevado supera el 60 % en el 75 % de los casos, y alcanza valores cercanos al 100 % en algunos eventos, lo que implica que el área realmente quemada podría duplicar la representada por MCD64A1. En promedio, la subestimación es de 197.37 ha en comparación con Sentinel-2.

Para incendios de 100 a 500 ha, el error de comisión aumenta ligeramente, con una sobreestimación promedio de 66.6 ha. El error de omisión disminuye, con una subestimación promedio de 144.24 ha, lo que sugiere una mejora en el desempeño de MCD64A1 en este rango de tamaño, aunque aún persisten limitaciones en la detección de estos eventos. En el caso de incendios cuya superficie está entre 500 a 1000 ha, el error de comisión no supera el 50 %, con una sobreestimación media de 119.75 ha. El error de omisión se mantiene entre 25 % y 50 %, aunque la subestimación en promedio sigue siendo alta, alcanzando los 253.08 ha. Para incendios de 1000 a 5000 ha, el error de comisión es el más bajo (<20 %), con una sobreestimación promedio de 296.66 ha. Si bien los errores de omisión son menores (<30%), la superficie total omitida sigue siendo considerable, con un promedio de 362.45 ha.

Estos resultados muestran que MCD64A1 mejora su

detección conforme aumenta la magnitud del incendio, pero continúa subestimando el área quemada, incluso en eventos de gran extensión. En incendios menores a 100 ha, la alta omisión se debe a la baja resolución de MODIS (500 m), que dificulta la detección de eventos pequeños y dispersos (Boschetti et al., 2019; Ramo et al., 2021). Para incendios de tamaño intermedio, aunque la detección mejora, la fragmentación de los focos de fuego y la mezcla espectral dentro de los píxeles de MODIS generan errores en la delimitación de las cicatrices (Zhu et al., 2017). Finalmente, en incendios de gran superficie, si bien los errores de omisión son menores, la segmentación basada en píxeles grandes impide una estimación real del área quemada, especialmente en los bordes y zonas periféricas, lo que afecta una representación completa de las áreas afectadas (Giglio et al., 2018).

## 4. Conclusiones

El producto MCD64A1 del sensor MODIS no representa adecuadamente las áreas afectadas por incendios de pequeña y mediana magnitud en la región altoandina de Cusco. Para incendios menores a 100 hectáreas, su capacidad de detección es muy limitada, mientras que en eventos de mayor extensión su precisión mejora, aunque persisten errores asociados a la segmentación en píxeles grandes. En términos de superficie, el producto tiende a subestimar las áreas realmente quemadas en incendios pequeños, llegando en algunos casos a representar solo la mitad del área afectada. Esta limitación también ha sido señalada en estudios previos sobre los Andes de Cusco, que destacan las dificultades de los productos satelitales para registrar adecuadamente eventos de baja magnitud en entornos con alta heterogeneidad espacial. Por otro lado, también se identificaron errores por sobreestimación, debido a que cambios en la reflectividad del suelo, por ejemplo, en zonas glaciares y regiones con sombras de nubes, pueden confundirse con cicatrices de fuego.

Estos hallazgos muestran que, aunque MCD64A1 es una herramienta útil para el monitoreo de incendios de gran magnitud, su capacidad para identificar y cuantificar superficies quemadas pequeñas es limitada, lo que podría llevar a una subestimación significativa del impacto real del fuego en ecosistemas altoandinos. Por ello, es clave realizar mayores investigaciones que integren sensores de mayor resolución y que combinen diversas fuentes de información satelital. Esta integración permitiría mejorar la precisión en la detección y análisis de incendios en regiones de alta montaña.

## 5. Referencias

- Aronés Cisneros, A., Badia Perpinyà, A., Nadal Tersa, J., & Bonnesoeur, V. (2024). Incendios forestales en ecosistemas de la puna húmeda en los Andes de Ayacucho, Perú. *Investigaciones Regionales*, 59, 127–147.  
<https://doi.org/10.38191/iirr-jorr.24.014>
- Artés, T., Oom, D., De Rigo, D., Durrant, T. H., Maianti, P., Libertà, G., & San-Miguel-Ayanz, J. (2019). A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour. *Scientific data*, 6(1), 296.  
<https://doi.org/10.1038/s41597-019-0312-2>
- Boschetti, L., Roy, D. P., Giglio, L., Huang, H., Zubkova, M., & Humber, M. L. (2019). Global validation of the collection 6 MODIS burned area product. *Remote Sensing of Environment*, 235, 111490.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111490>
- Ccanchi, Y. (2021). Evaluación de sequías y del riesgo potencial a la ocurrencia de incendios forestales en ecosistemas altoandinos mediante uso de sensores remotos. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional Agraria La Molina.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/5195>
- Erfanian, A., Wang, G., & Fomenko, L. (2017). Unprecedented drought over tropical South America in 2016: significantly under-predicted by tropical SST. *Scientific reports*, 7(1), 5811.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-05373-2>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., & Pombosa, R. (2011). Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, 38(13), L13406.  
<https://doi.org/10.1029/2011GL047862>
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. L., & Justice, C. O. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote sensing of environment*, 217, 72-85.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>
- Hall, J. V., Argueta, F., & Giglio, L. (2021). Validation of MCD64A1 and FireCCI51 cropland burned area mapping in Ukraine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102443.  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102443>
- Manta Nolasco, M. I. (2017). Contribución al conocimiento de la prevención de los incendios forestales en la sierra peruana. Universidad Nacional Agraria La Molina.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/4302>
- Pausas, J. G. (2022). Pyrogeography across the western Palaeartic: A diversity of fire regimes. *Glob Ecol Biogeogr* 31(10),1923–1932.  
<https://doi.org/10.1111/geb.13569>
- Ramo, R., Roteta, E., Bistinas, I., Van Wees, D., Bastarrika, A., Chuvieco, E., & Van der Werf, G. R. (2021). African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, 118(9), e2011160118.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2011160118>
- Roman, M., Zubieta, R., Ccanchi, Y., Martínez, A., Paucar, Y., Alvarez, S., Loaysa, Julio & Ayala, Filomeno F. (2024). Seasonal Effects of Wildfires on the Physical and Chemical Properties of Soil in Andean Grassland Ecosystems in Cusco, Peru: Pending Challenges. *Fire*, 7(7), 259.  
<https://doi.org/10.3390/fire7070259>
- Román-Cuesta, R. M., Carmona-Moreno, C., Lizcano, G., New, M., Silman, M., Knoke, T., Malhi, Y., Oliveras, I., Asbjornsen, H., & Vuille, M. (2014). Synchronous fire activity in the tropical high Andes: an indication of regional climate forcing. *Global Change Biology*, 20(6), 1929–1942.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.12538>
- Zhang, J., Zuo, X., Zhao, X., Ma, J., & Medina-Roldán, E.(2020). Effects of rainfall manipulation and nitrogen addition on plant biomass allocation in a semiarid sandy grassland. *Scientific Reports*. 10(1), 9026.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-65922-0>
- Zhu, C., Kobayashi, H., Kanaya, Y., & Saito, M. (2017). Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands. *Scientific Reports*, 7(1), 4181.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-03739-0>
- Zubieta, R., Ccanchi, Y., & Liza, R. (2023). Performance of heat spots obtained from satellite datasets to represent burned areas in Andean ecosystems of Cusco, Peru. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101020.  
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101020>
- Zubieta, R., Ccanchi, Y., & Liza, R. (2024). Focos de calor obtenidos a partir de satélite y su utilidad para la detección de fuegos activos en ecosistemas andinos del Cusco. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, 11 (4), 4-10.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/5618>

## Agradecimientos

Este artículo de avance fue financiado por el Instituto Geofísico del Perú y el Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA), en el marco del concurso "E041-2024-03 Proyectos de Investigación Básica" [número de contrato PE501088039-2024]. Los autores también agradecen al Instituto Geofísico del Perú (IGP) que ejecuta actualmente el proyecto "Estudio de efectos de quemas controladas, alternativa para posible reducción de los impactos ocasionados por incendios sobre la cobertura vegetal en regiones frecuentemente afectadas".