



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Vol. 12 n.º 05 mayo 2025

PROGRAMA PRESUPUESTAL n.º 068

"Reducción de la vulnerabilidad y
atención de emergencias por desastres"

En este boletín

- Análisis multidimensional de daños (MDDA) del fenómeno El Niño del 2017 a nivel departamental | **Pág. 4**
- Precisión del producto satelital MODIS para la representación de áreas quemadas en los andes de Cusco | **Pág. 14**
- Resumen del informe técnico de El Niño | **Pág. 20**
- Resumen de comunicado ENFEN | **Pág. 21**



Créditos

Juan Castro Vargas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional

James Apaéstegui Campos
Director de Ciencias de la Atmósfera, Hidrósfera y Cambio Climático

Lina Godoy Encarnación
Coordinadora de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Ricardo Zubieta Barragan
Ken Takahashi Guevara
Editores

Erick Manuel Dávalos Cucchi
Diseño y diagramación

Inundación del centro poblado de Catacaos (Piura-Perú) marzo 2017, después del desborde del río Piura.
Fuente: ANDINA/Oscar Farje

El boletín científico "El Niño" es generado en el marco del Programa Presupuestal n.º 068 "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres"

Producto 1: Estudios para la estimación del riesgo de desastres
Actividad 5: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño
Instituto Geofísico del Perú

** Los textos referidos a la contribución de cada investigación son aportes del equipo editorial del presente boletín*

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012

Teléfono: +51-1-3172300

Lima, septiembre de 2025

Puedes acceder a la colección completa de los boletines científicos El Niño escaneando el siguiente código QR.



Introducción

Los eventos El Niño y La Niña corresponden, a grandes rasgos, a situaciones en las que la temperatura de la superficie del mar está por encima o por debajo del promedio en el océano Pacífico ecuatorial. Estas fluctuaciones están fuertemente influenciadas por El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual es uno de los modos de variabilidad climática más importantes en el océano Pacífico que ejerce una gran influencia sobre el clima a nivel global y regional. La fase cálida de ENOS se puede denominar El Niño “global”.

En el Perú, los impactos de El Niño y La Niña son particularmente complejos debido a que recibimos influencias tanto costeras, asociadas a las fluctuaciones en el mar peruano en el Pacífico oriental, así como influencias remotas a través de teleconexiones atmosféricas desde el Pacífico central. En particular, El Niño en el Pacífico oriental o Costero puede producir lluvias y altas temperaturas en la costa y alterar el ecosistema marino-costero, mientras que El Niño en el Pacífico central o global puede reducir las precipitaciones e incrementar la temperatura en los Andes y en la Amazonía. Por el contrario, La Niña tendría efectos aproximadamente opuestos. Así, El Niño en el Pacífico oriental es el que causa mayores impactos para el Perú, ya que tiene el potencial de provocar grandes daños a infraestructuras, actividades económicas y, más importante, la seguridad y bienestar de las personas, además de sus medios de vida.

El Perú, como parte de la estrategia de gestión pública para enfrentar los peligros naturales, especialmente respecto a El Niño, establece el Programa Presupuestal por Resultados (PPR) 068 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. A partir de 2014, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), al igual que otras instituciones que conforman la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), participa en este PPR con el producto denominado “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”. Este consiste en la entrega en forma oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural oceánico-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permita la toma de decisiones de las autoridades a nivel nacional y regional.

A este producto, el IGP contribuye con la actividad “Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”, la cual incluye la síntesis y evaluación de los modelos

de pronóstico de El Niño generados internacionalmente, como es el caso de los modelos climáticos globales, así como de aquellos obtenidos a partir de modelos propios como el de predicción de ondas oceánicas ecuatoriales, el modelo de inteligencia artificial y el recientemente desarrollado modelo de Sistema Tierra regional de pronóstico para el territorio peruano y el océano Pacífico (IGP RESM-COW v1). Asimismo, incluye el desarrollo de investigaciones y estudios científicos que permiten entender la variabilidad climática y los procesos asociados al cambio climático, a fin de fortalecer, en forma continua, las capacidades para el pronóstico de El Niño.

En esta línea, el IGP ha estructurado y desarrollado el Boletín Científico El Niño, un producto que contiene, en gran medida, los aportes científicos en el estudio y vigilancia del ENOS, con énfasis en El Niño. El Boletín, que se publica mensualmente desde 2014, cuenta con aportes nacionales e internacionales en diversos temas asociados a El Niño, sus impactos, procesos vinculados, temas asociados y otros igual de relevantes, que se presentan en las secciones de “Divulgación Científica” y “Avances Científicos”. De igual forma, se comparte en el Boletín una versión resumida del informe técnico que el IGP elabora mensualmente para cumplir con los compromisos asumidos en el marco del PPR 068 (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5356>). Dicho informe contiene información actualizada operativamente que el IGP proporciona como insumo para que el ENFEN genere en forma colegiada la evaluación final que será entregada a los usuarios. Finalmente, el Boletín presenta los comunicados ENFEN publicados durante el periodo correspondiente.

El IGP busca consolidar al Boletín Científico El Niño como una publicación técnica-científica de referencia, tanto para la comunidad científica y académica, así como para instituciones y autoridades vinculadas a la gestión del riesgo de desastres ávidas de conocimientos e información actualizada sobre El Niño, sus impactos y procesos asociados. Puede consultar la colección completa de Boletines Científicos El Niño en este enlace: <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4974>

ANÁLISIS MULTIDIMENSIONAL DE DAÑOS (MDDA) DEL FENÓMENO EL NIÑO DEL 2017 A NIVEL DEPARTAMENTAL

Eduardo Parodi¹, Ramzy Kahhat¹,
Ian Vázquez-Rowe¹.

¹ Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN), Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú



Eduardo Parodi Gonzales Prada es Ingeniero Civil y Magíster con mención en Gestión de Riesgos Naturales por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), así como Hidrogeólogo de la Universidad de Chile. Se desempeña como docente del Departamento de Ingeniería de la PUCP y es miembro de la Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN). Actualmente, ocupa el cargo de gerente de ingeniería en la empresa en Agua Naturaleza y Tecnología. Además, cuenta con una certificación como evaluador de riesgos certificado por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED).

Palabras clave: DALY desastres, daños ambientales, daños multidimensionales, El Niño 2017, indicador desastres.

Citar como: Parodi, E., Kahhat, R., Vázquez-Rowe, I. (2025) Análisis multidimensional de daños (MDDA) del Fenómeno El Niño del 2017 a nivel Departamental Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.o 05 , págs. 4-13.

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

Esta investigación destaca la necesidad de fortalecer las medidas de gestión prospectiva, reactiva y correctiva descritas en el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (SINAGERD). Los resultados de este artículo muestran que el El Análisis Multidimensional de Daños (MDDA) nos permite distinguir las diferentes configuraciones del daño en los desastres, asimismo, el análisis de los daños usando la herramienta DALY per cápita hace posible el análisis de la acumulación de daños. Con la metodología empleada, se encuentra que la severidad del daño per cápita en determinadas regiones puede interpretarse como un síntoma de deficiencias estructurales en las gestiones del riesgo de desastres. Se recomienda extender el análisis y evaluación a eventos como El Niño de años recientes.

Resumen

El Análisis Multidimensional de Daños (MDDA, por sus siglas en inglés), desarrollado por Parodi, Kahhat y Vázquez-Rowe (2021), surge ante la necesidad de contar con un indicador determinístico que permita valorar de forma integrada las dimensiones sociales, económicas y ambientales de los daños provocados

por un desastre, y que contribuya a gestionar de manera más eficiente la mitigación de riesgos asociados. Para ello, los autores utilizaron la unidad DALY (disability-adjusted life year), que posibilita la acumulación de los daños en sus diferentes dimensiones, incorporando de manera innovadora la variante ambiental mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El MDDA fue aplicado originalmente para evaluar los daños ocasionados en Perú de los Fenómenos de El Niño (FEN) de 1982-83, 1997-98 y 2017 y, de forma comparativa a otros desastres, como los terremotos de Áncash (1970) y Pisco (2007), el terremoto de Haití (2010), el terremoto y posterior tsunami de Indonesia (2004), el huracán Katrina en Estados Unidos (2005) y la erupción del volcán de Cumbre Vieja en La Palma, España, (2021).

Los resultados previos indican que el FEN de 1997-98 fue el evento de mayor impacto total en DALY a nivel nacional, con un daño per cápita comparable al ocurrido en 1982-83. En esta publicación, se regionalizan los daños asociados al FEN del 2017 a nivel departamental, mostrando que los departamentos de la costa peruana: Arequipa, Ica, Lima, Ancash, La Libertad, Lambayeque, Piura y Tumbes acumulan el 85 % del total de los daños. En el caso de Piura, estos representaron cerca del 30 % del total nacional, con una severidad de daños por habitante a nivel departamental que ascendió a 13.4 DALY per cápita, es decir que el daño para la población piurana fue 5.6 veces más severo que el daño promedio per cápita nacional.

Los resultados de este artículo muestran que el MDDA nos permite distinguir las diferentes configuraciones del daño en los desastres, en adicional, el análisis de los daños en DALY per cápita hace posible comparar los daños de cualquier desastre ocurrido en cualquier lugar y en cualquier época, lo que hace que el MDDA sea una potente herramienta para la gestión de riesgos. Asimismo, se comparan los resultados obtenidos por Vázquez-Rowe y colegas (2024) en la evaluación de daños por la erupción volcánica en La Palma, España, del 2021.

En cuanto a los impactos ambientales de los desastres evaluados, el MDDA revela que estos tienden a ser mayores en los sismos que en los FEN, y pueden representar cerca del 18 % de los daños totales, lo que subraya la necesidad de incorporar criterios de mitigación ambiental en la reconstrucción de infraestructura e edificaciones perdidas.

Finalmente, se recomienda ampliar los resultados del MDDA a nivel provincial y distrital, así como extender su aplicación a los recientes FEN ocurridos en 2023 y 2025. En adicional a lo mencionado, sería necesario incluir la evaluación de la incidencia económica de los costos reales de la reconstrucción, que suelen superar ampliamente las pérdidas estimadas inicialmente como afectaciones de los FEN al PBI.

1. Introducción

El Fenómeno de El Niño (FEN) del año 2017 fue el segundo evento tipo Niño Costero registrado en el Perú, después del ocurrido en 1925 (Takahashi, 2017). Se le denominó El Niño Costero debido a que el calentamiento anómalo de la superficie del mar frente a las costas del Pacífico en Sudamérica, específicamente frente a Ecuador y a la costa norte del Perú (región Niño 1+2), ocurrió de forma desconectada de las anomalías térmicas en el Pacífico central (Niño 3.4). Este fenómeno evolucionó rápidamente y ocasionó extensos daños a lo largo del litoral peruano (Figura 1).

Los daños asociados al FEN no sólo se limitan únicamente a los efectos directos de las precipitaciones extremas —como inundaciones, aluviones (huaicos) y desbordes de ríos—, sino que también a numerosos daños menos visibles pero igualmente relevantes, tales como la propagación de epidemias como el dengue, chikungunya y zika, así como afectaciones a sectores productivos como la agricultura, pesquería y la industria textil. Estas consecuencias fueron ampliamente documentadas en los FEN extremos de 1982-83 y 1997-98, así como en el más reciente El Niño Costero de 2017 y el FEN de 2023-24 (BCRP, 2023, pp. 57-61; CDC-MINSA, 2017).

El amplio espectro de daños asociados a eventos como el FEN o cualquier otro desastre no solo se limita únicamente a afectaciones sociales y económicas, sino que también incluye los impactos ambientales derivados de la reposición o restauración de los activos dañados, un aspecto que se suele ser omitido en numerosos estudios dedicados a la cuantificación de daños en eventos de desastre.

En este contexto, el Análisis multidimensional de daños (MDDA, por sus siglas en inglés: Multi-Dimension Damage Assessment) surge como respuesta a la necesidad de valorar integralmente los efectos de un desastre. El MDDA, desarrollado por Parodi, Kahhat y Vázquez-Rowe (2021), proporciona un indicador único de daños que, por primera vez, integra de forma determinística las dimensiones sociales, económicas y ambientales, y que resulta particularmente útil para orientar la toma de decisiones en la gestión del riesgo y en la mitigación de los daños asociados.

Esta integración fue posible gracias al uso de la unidad DALY (Disability-Adjusted Life Year o años de

vida ajustados por discapacidad), unidad que fue originalmente concebida en la década de los noventa por la Universidad de Harvard con apoyo del Banco Mundial (2021) para medir la carga global de una enfermedad (Murray et al., 1994). El DALY combina la mortalidad prematura (años de vida perdidos por fallecer antes de la expectativa de vida) con la morbilidad (años de vida perdidos por la reducción de la calidad de vida a consecuencia de afectaciones a la salud) asociadas a enfermedades, lesiones u otros factores que pudiesen deteriorar la salud física y/o mental de las personas y con ello impactar en su calidad de vida (Parodi et al., 2021).

periodos 1982-83, 1997-98 y 2017, y sus resultados se compararon con los daños registrados en otros desastres ocurridos en el país, como los terremotos de Áncash en 1970 y de Pisco en 2007. Asimismo, se utilizó la misma metodología para analizar desastres en el extranjero como el terremoto de Haití (2010), el terremoto y posterior tsunami de Indonesia (2004) y el huracán Katrina (2005). Más recientemente, Vázquez-Rowe et al. (2024) aplicaron el MDDA para evaluar los daños asociados a la erupción del volcán Cumbre Vieja en la isla de La Palma, en las Islas Canarias, España. Los resultados de dicho análisis también se incluyen en el presente documento.

Inicialmente, el MDDA fue aplicado para evaluar los daños en el Perú relacionados con los FEN de los

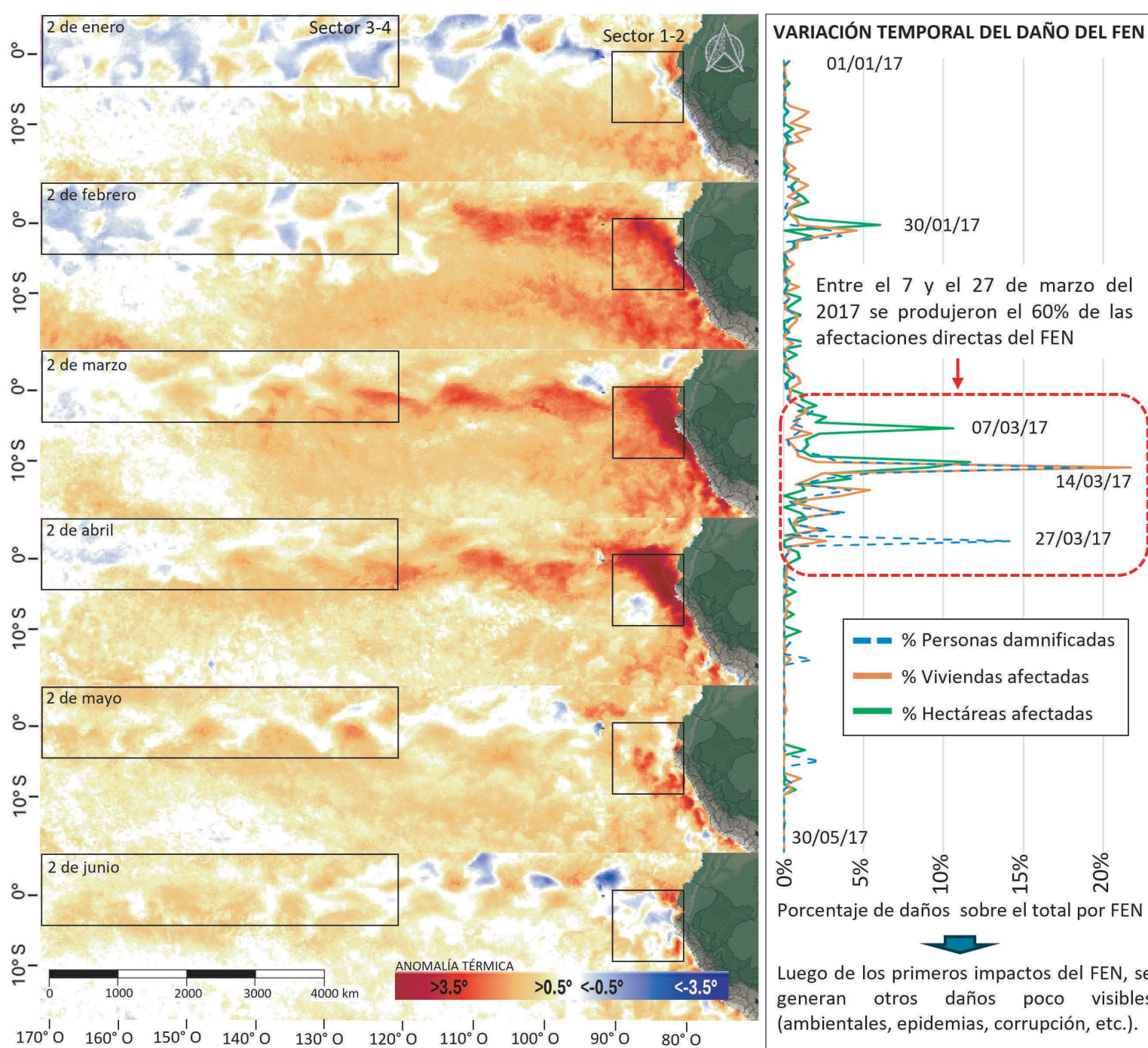


Figura 1. Evolución de las anomalías de la temperatura superficial del mar durante el FEN del 2017 y representación de daños asociados por día entre enero y mayo de 2017. Adaptado de JPL MUR Measures Project, por PO.DAAC, 2019 (<https://doi.org/10.5067/GHM25-4FJ42>) y SINPAD (2017).

2. Estado del arte del MMDA

Los resultados del Análisis Multidimensional de Daños (MDDA) indican que el desastre con mayores daños integrados —sumando las dimensiones sociales, económicas y ambientales— fue El Niño (FEN) extremo de 1997-98, como se muestra en la Figura 2a. No obstante, esta conclusión cambia al normalizar los resultados por población, es decir, al expresarlos en términos de días DALY per cápita. La Figura 2b revela que los daños per cápita del FEN del 1997-98 fueron similares a los infringidos por el FEN del 1982-83. Asimismo, los resultados también muestran que los daños directos a la salud humana fueron menores en el evento de 1997-98 en comparación con los otros FEN evaluados. Esta diferencia podría atribuirse a una menor exposición humana al peligro, probablemente como consecuencia de una mejor gestión de los riesgos del FEN. En contraste, el FEN de 1997-98 fue el evento con mayor impacto económico registrado en el Perú durante el presente siglo, lo cual quizás habría sido consecuencia del incremento de la infraestructura expuesta.

Con relación a los daños ambientales, el MDDA muestra que estos fueron mayores en DALY total y DALY per cápita en el sismo del 2017 que en los FEN evaluados. Esta diferencia se explica debido a que el sismo de Pisco ocasionó daños de mayor gravedad y extensión a la infraestructura civil que los FEN, generando mayores impactos ambientales asociados a la reposición de la infraestructura perdida. En algunos casos, los daños ambientales pueden representar hasta el 18 %, lo que pone en evidencia la necesidad de reconstruir la infraestructura y las edificaciones afectadas, con criterios de mitigación de impactos ambientales asociados a su reposición y bajo esquemas de optimización ecológica de los activos repuestos. En cualquier caso, la aplicación del MDDA deja claro que los daños ocasionados por un desastre no sólo se limitan exclusivamente a las pérdidas económicas o a los impactos inmediatos sobre la salud de las poblaciones afectadas. También incluyen daños ambientales, los mismos que, aunque menos perceptibles no son por ello menos importantes, ya que, constituyen una afectación al bienestar de las personas, a menudo de carácter indirecto, diferido en el tiempo y extendido fuera del ámbito de afectación inicial del desastre.

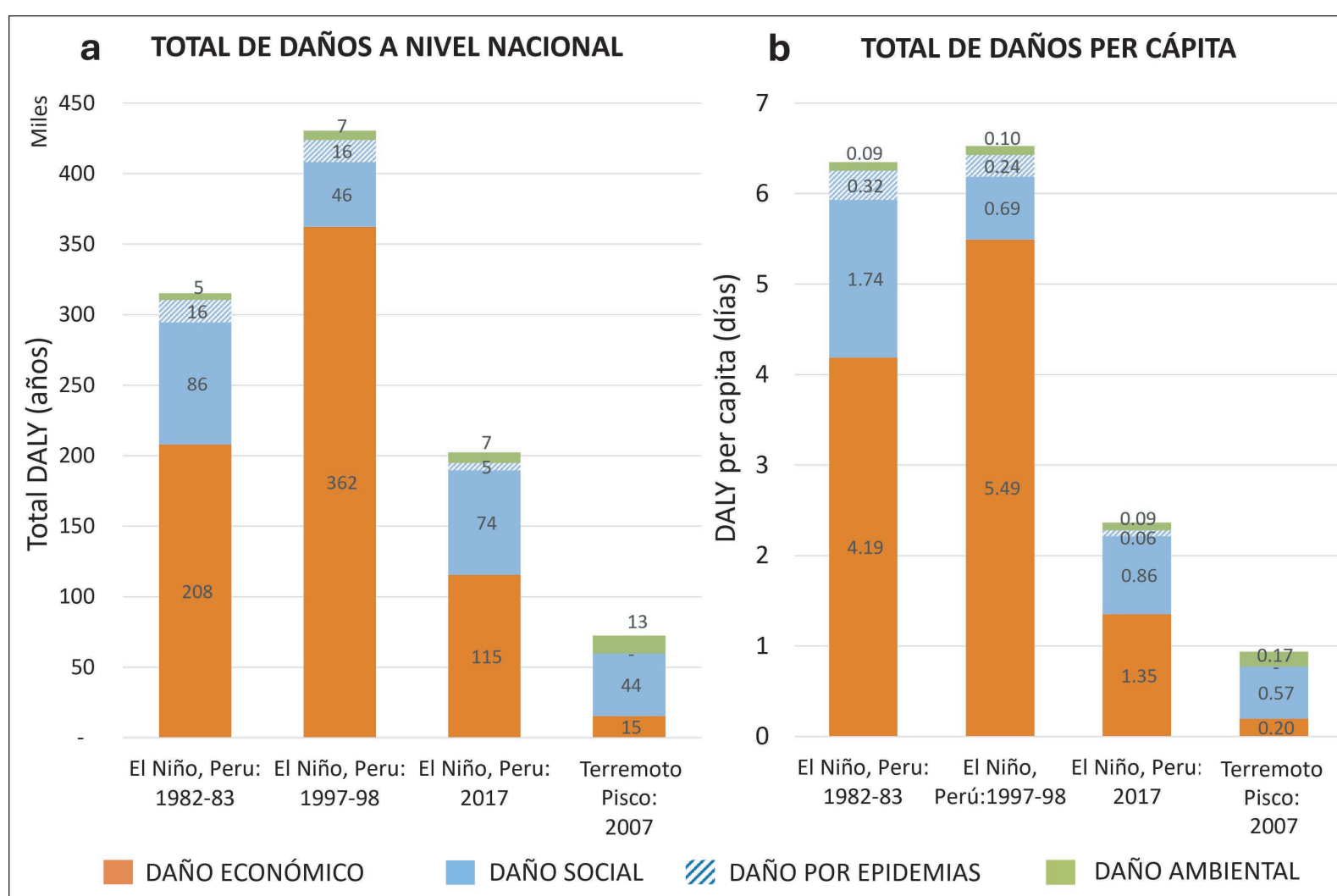


Figura 2. Daño Total (a) y daño per cápita (b) de los principales desastres de origen natural del Perú del siglo XXI. De “Multi-dimensional damage assessment (MDDA): A case study of El Niño flood disasters in Peru”, por Parodi et al, 2021 (<https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100329>).

2.1 Comparación de daños per cápita de desastres

La metodología de MDDA permite también estimar la severidad relativa de un desastre mediante el cálculo de daños DALY per cápita. Para ello, se divide el total de daños entre la población de la zona geográfica bajo análisis al momento de ocurrir el evento. La comparación internacional de daños per cápita de algunos desastres (Figura 3) muestra que la carga de daño a nivel nacional atribuible a un desastre puede alcanzar valores cercanos a los 1000 DALY per cápita en días, como ocurrió en el caso del sismo de Haití en el 2010. La carga nacional de este evento, implicó un daño DALY equivalente a 2 años promedio para la población haitiana, que solo puede ser atribuible a la gran vulnerabilidad de la zona afectada.

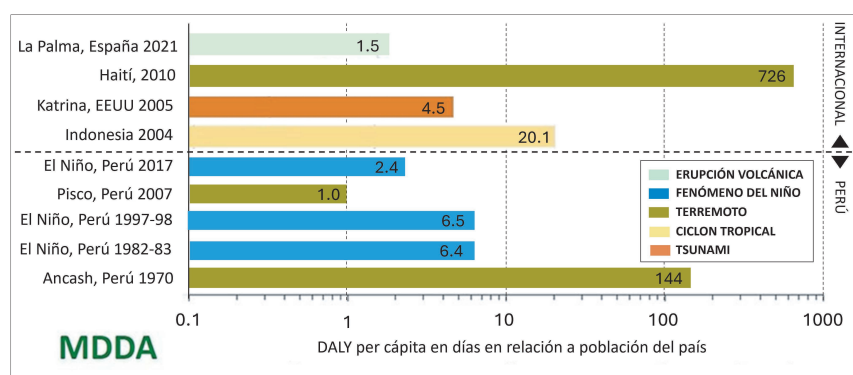


Figura 3. Comparación de severidad de daños (DALY per cápita) de desastres nacionales e internacionales. Adaptado de “Multi-dimensional damage assessment (MDDA): A case study of El Niño flood disasters in Peru”, por Parodi et al, 2021 (<https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100329>) y “Applying the multi-dimensional damage assessment (MDDA) methodology to the Cumbre Vieja volcanic eruption in La Palma (Spain)”, por Vázquez-Rowe et al, 2024 (<https://doi.org/10.1007/s11069-024-06775-y>)

3. Metodología

La presente evaluación tuvo como objetivo presentar los resultados del MDDA del Niño Costero de 2017, regionalizados a nivel departamental en el Perú, y establecer una comparación con otros tipos de desastres. El cálculo se realizó en base a la conciliación de los inventarios de daños reportados en fuentes oficiales, incluyendo el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2017), el Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), así como los datos poblacionales proporcionados por el censo del INEI en el 2017 y los factores de discapacidad definidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2021). Los inventarios de daños fueron transformados a unidades de DALY mediante la expresión formulada por Parodi y colegas (2021):

$$\begin{array}{cccc}
 \text{DAÑO} & \text{DAÑO} & \text{DAÑO} & \text{DAÑO} \\
 \text{TOTAL} & \text{ECONÓMICO} & \text{SOCIAL} & \text{AMBIENTAL} \\
 \hline
 \text{TD}_d = & 0.25 \times \text{EL} / \text{PBI}_{pc} + & \text{Td} \times (92 - \text{A}_{av}) + & 0.0405 \times \text{Taf} + & 3.304 \times 10^{-6} \times \sum_{i=1}^n \text{Ei} \cdot \text{Qi} \\
 & & \text{MORTALIDAD} & \text{MORBILIDAD} &
 \end{array}$$

Donde TDd= Total del daño en DALY, EL= pérdidas económicas, PBIpc = producto bruto interno per cápita, Td=total decesos, Aav= edad promedio de los fallecidos, Taf= total afectados, Ei= impacto ambiental en unidades de DALY a nivel endpoint por tipo de activo a ser repuesto y Qi es la cantidad de activos de cada tipo inventariado.

Esta expresión se fundamenta en la transformación propuesta por Noy (2015) para convertir los daños económicos en unidades de DALY, en la metodología de acumulación de la mortalidad y morbilidad del Banco Mundial (2021), y en la valoración de los daños ambientales en unidades DALY (es decir, categorías de impacto de punto final) estimados mediante la metodología del ACV establecidos en la base de datos ReCiPe del 2016 para el área de protección de salud humana (Huijbregts, 2017).

Con el objetivo de facilitar futuros cálculos, se pone a disposición de los lectores: (i) los valores unitarios del daño ambiental de la reposición o restauración de los principales activos afectados, (ii) los parámetros de población y PBI a nivel departamental al año 2017 —requeridos para el cómputo de los daños desagregados por departamento para el FEN del 2017 adaptados de la base de datos de SINPAD (2017) administrada por el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI)— y (iii) los inventarios departamentales de daños utilizados con la finalidad de estimar el MDDA por región para el FEN 2017, el cual pueden descargarlo en el enlace siguiente: <https://shorturl.at/dtYBv>.

Para efectos del presente análisis, se consideró que todos los daños ocurridos asociados a eventos de precipitaciones extremas entre el 1 de enero y el 30 de junio de 2017 en todos los departamentos evaluados son atribuibles al FEN. Sin embargo, debe señalarse que algunos de los numerosos eventos climáticos extremos registrados durante ese periodo podrían tener causas ajenas al FEN. Adicionalmente, la regionalización departamental de los daños económicos se basó en la reducción de PBI atribuida al FEN del 2017, según lo reportado por el Banco Central de Reserva del Perú (BCRP). Cabe destacar que estos valores son sensiblemente menores a los costos de reconstrucción reportados por la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios, que podrían superar el doble de las pérdidas totales atribuidas inicialmente al FEN del 2017 por el BCRP e INDECI.

4. Resultados

Los resultados de la evaluación de daños por el Niño Costero de 2017 muestran que los departamentos costeros de Tumbes, Piura, Lambayeque La Libertad, Áncash, Lima, Ica y Arequipa fueron las zonas con mayor magnitud de daños acumulados para las tres

dimensiones comprendidas en el MDDA (social, económica y ambiental), sumando en conjunto el 85 % del total nacional como se muestra en la Tabla 1. El MDDA también indica que Piura concentró un tercio de todos los impactos del FEN a nivel nacional, como se aprecia en la geoespacialización de daños.

Tabla 1. Daños totales en DALY por departamento por El Niño 2017.

Región	Daños económicos DALY	Daños sociales DALY	Daños ambientales DALY	Total, daños integrados DALY	Porcentaje por región
Áncash	17,734	6825	530.6	25,090	10.73 %
Arequipa	3432	3345	231.1	7008	3.00 %
Ayacucho	3284	832.5	165.8	4282	1.83 %
Cajamarca	7826	1,042	149.5	9017	3.86 %
Huancavelica	4373	1,572	250.8	6196	2.65 %
Ica	2376	4626	292.2	7294	3.12 %
La Libertad	28,692	17,568	1,359.0	47,619	20.37 %
Lambayeque	20,348	5485	593.2	26,425	11.30 %
Lima	7965	3137	790.7	11,893	5.09 %
Loreto	269.3	5483	163.2	5915	2.53 %
Piura	50,224	20,566	2,114.0	72,904	31.19 %
Tumbes	3010	3098	303.0	6411	2.74 %
Otros	555.8	2901	264.2	3721	1.59 %
Total	150,090	76,478	7,207	233,776	100 %

Por otro lado, cuando se examinan los resultados de daños per cápita a nivel departamental (Tabla 2), se observa que Tumbes, Piura, La Libertad, Áncash, Lambayeque y Huancavelica fueron los departamentos más severamente afectados, mostrando una mayor intensidad del daño per cápita durante el FEN de 2017.

La visualización geoespacial de los daños acumulados por departamento muestra que el gradiente de daños totales norte-sur no es continuo, como podría suponerse intuitivamente (Figura 4a, 4b y 4c). En particular, Piura y La Libertad destacan con aproximadamente el 50% del total de daños en cada una de las tres dimensiones evaluadas. Asimismo, se observa que el daño ambiental

puede ser relevante en regiones donde las pérdidas económicas aparentan ser menores como Loreto y Arequipa. Esta situación podría estar asociada a la asignación de presupuestos de reconstrucción en dichas regiones.

Por otro lado, el análisis geoespacial de los daños per cápita por departamento (Figura 4d, 4e y 4f) permiten

apreciar de forma clara un gradiente norte-sur, con la excepción del departamento de Lima, donde la alta densidad poblacional atenúa los valores per cápita. En contraste, Huancavelica muestra un nivel de daños per cápita relevante en todas las dimensiones evaluadas, lo que sugiere la necesidad de realizar una evaluación más detallada en esta región.

Tabla 2. Daños DALY per cápita en días por departamento por El Niño 2017.

Región	Daños económicos DALY p.c.	Daños social DALY p.c.	Daños ambiental DALY p.c.	Daño Integrado DALY p.c.
Áncash	5.62	2.16	0.17	7.95
Arequipa	0.85	0.83	0.06	1.74
Ayacucho	1.83	0.46	0.09	2.39
Cajamarca	2.00	0.27	0.04	2.31
Huancavelica	4.32	1.55	0.25	6.12
Ica	0.96	1.87	0.12	2.94
La Libertad	5.54	3.39	0.26	9.19
Lambayeque	5.83	1.57	0.17	7.58
Lima	0.26	0.10	0.03	0.39
Loreto	0.10	2.13	0.06	2.30
Madre de Dios	-	0.74	0.01	0.76
Moquegua	-	0.53	0.08	0.61
Pasco	-	0.23	0.03	0.26
Piura	9.29	3.80	0.39	13.48
Tumbes	4.60	4.73	0.46	9.79
Ucayali	-	0.38	0.08	0.46

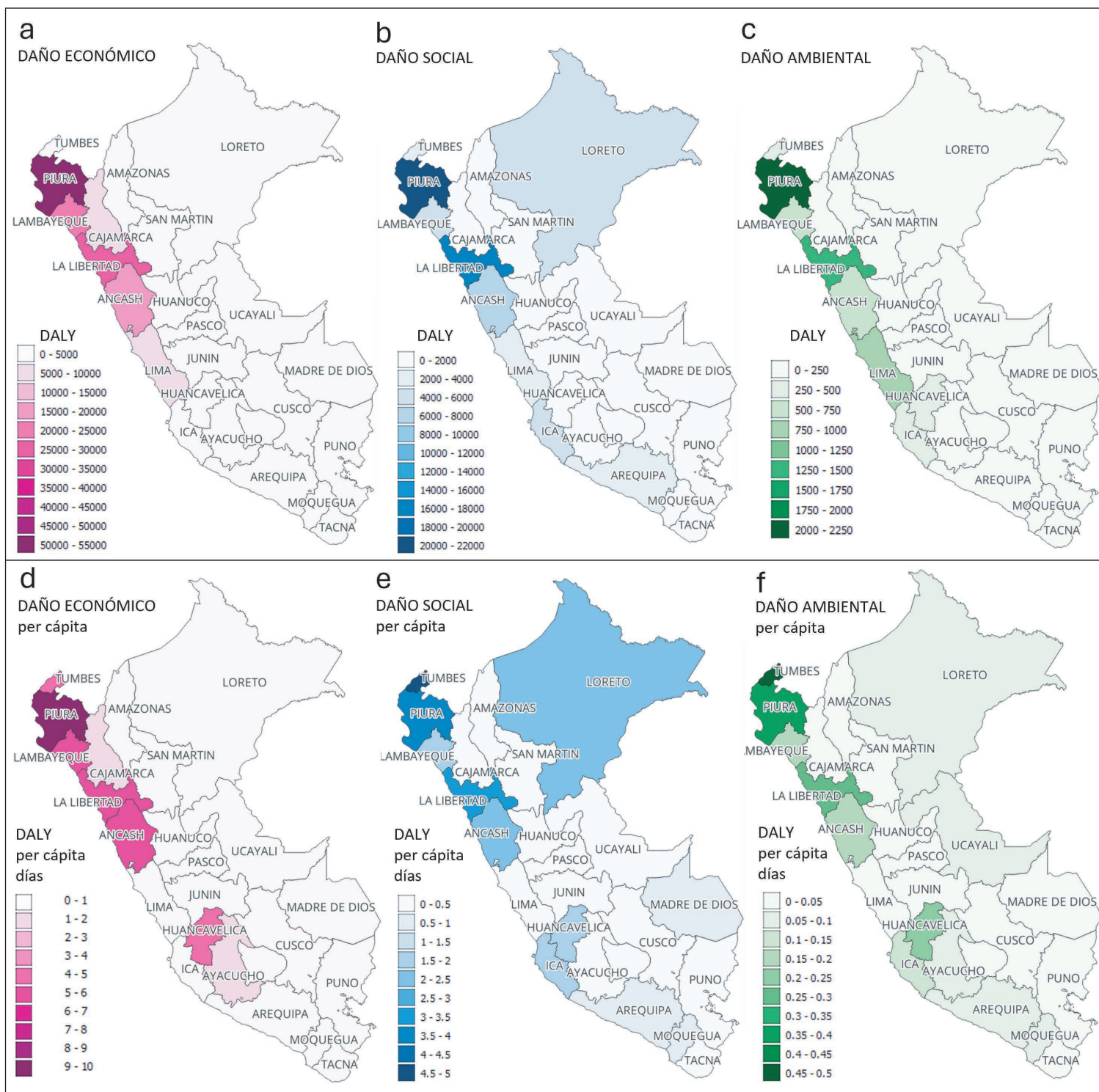


Figura 4. Geoespacialización de daños por departamento (a, b, c) y daños per cápita por departamento (d, e, f) de El Niño 2017.

5. Discusión

La evaluación de la magnitud total del daño, integrada para las dimensiones sociales, económicas y ambientales asociadas al FEN de 2017, indica que los departamentos de Piura, La Libertad y Lambayeque, con un total acumulado de 99,264 DALY, concentran el 63 % del daño total. Sin embargo, también se observa que Tumbes, con sólo 3,010 DALY, representa el 2.7 % del total nacional, lo que podría interpretarse erróneamente como una afectación menor. Este sesgo se explica por la reducida extensión geográfica y la baja población del departamento. No obstante, esta apreciación cambia cuando se analiza el nivel de daño con relación al

total de la población (DALY per cápita en días). Bajo esta perspectiva, Tumbes alcanza una severidad de 9.8 DALY en días por habitante, logrando que sea el departamento con la segunda más alta del país después de la de Piura (13.5 DALY en días).

Cabe destacar que los valores de DALY per cápita se han calculado con base en una estimación a escala nacional, lo cual no limita la posibilidad de establecer otros límites de evaluación diferentes (mayores o menores) para el análisis, en cuyo caso se podrá apreciar que el nivel de la afectación per cápita variará según la delimitación de la zona que se evalúe. Un ejemplo de ello es que la severidad del daño del FEN del 2017 a nivel nacional fue de 2.4 DALY per cápita, mientras que la para la región de

Piura fue de 13.5 DALY per cápita, es decir 5.6 veces más que el promedio nacional.

Por último, la representación geoespacial de las diferentes dimensiones del daño integradas para cada departamento permite apreciar fácilmente que el daño total integrado (Figura 5a) acumulados en los

departamentos de Piura, Lambayeque, La Libertad y Áncash fueron los mayores durante el evento. Por su parte, la Figura 5b destaca la severidad del daño per cápita en Tumbes, Huancavelica e Ica.

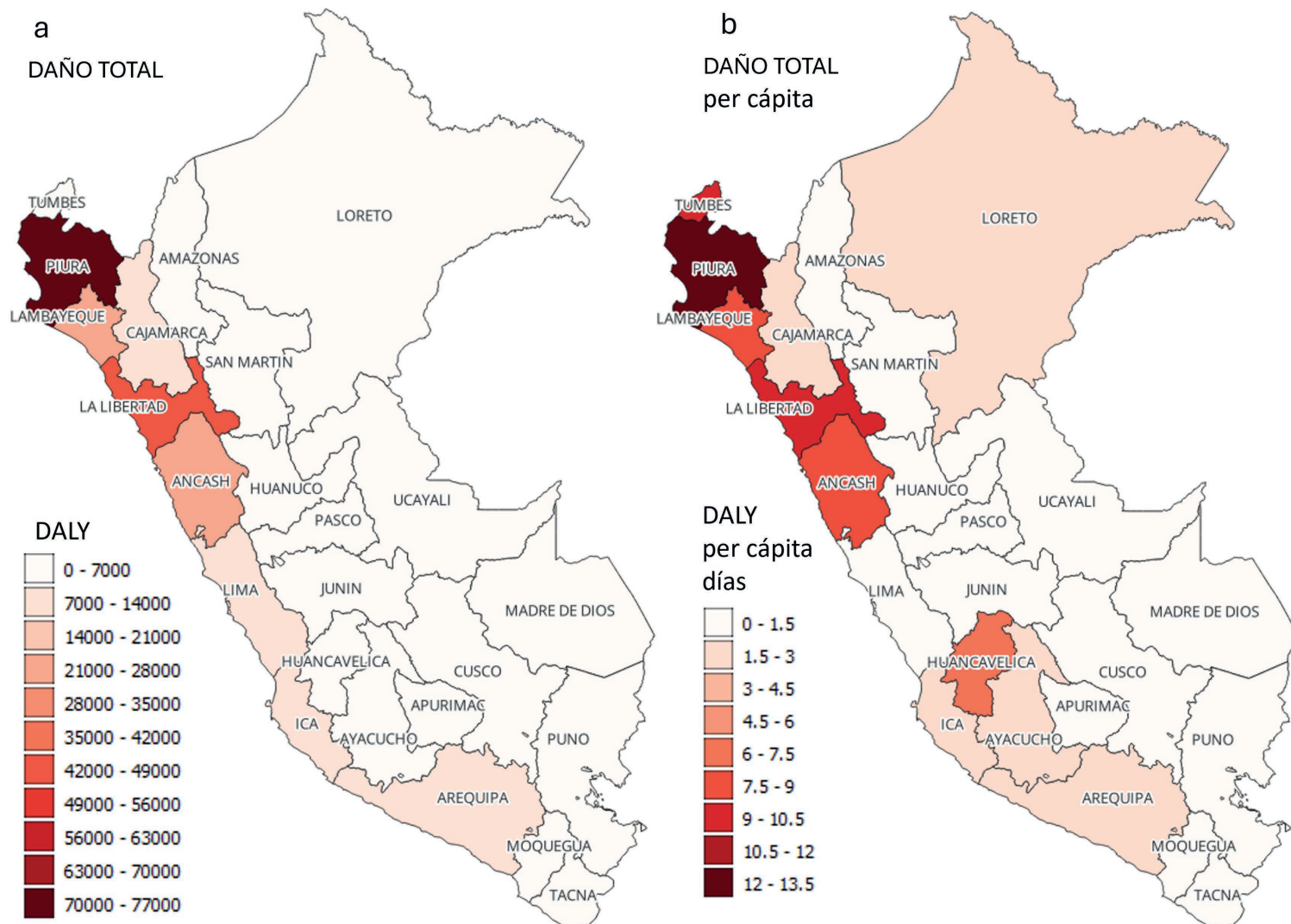


Figura 5. Distribución del daño total integrado (a) y daño integrado per cápita (b) del FEN del 2017.

6. Conclusiones y recomendaciones

La distribución departamental de las diferentes dimensiones integradas de daños permite evidenciar que tanto el total acumulado como el ratio de daños per cápita a nivel departamental constituyen información valiosa para el desarrollo de políticas públicas de mitigación de impactos por el FEN, diferenciadas y adecuadamente dosificadas para cada dimensión del daño. La metodología empleada revela, además, que la severidad del daño per cápita en determinados departamentos puede interpretarse como un síntoma de deficiencias estructurales en las gestiones del riesgo de desastres, así como de una mayor vulnerabilidad en cada dimensión analizada.

Ante esta evidencia, esta investigación destaca la necesidad de fortalecer las medidas de gestión prospectiva, reactiva y correctiva descritas en el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (SINAGERD). En ese marco, se recomienda ampliar los resultados del MDDA del 2017 a escalas más desagregadas, como son los niveles provincial y distrital, para una evaluación más precisa y localizada de los daños. Así también, se recomienda extender el análisis del MDDA a eventos recientes como los El Niño costeros de 2023 y 2025 y finalmente realizar un análisis de la incidencia del impacto económico de los costos reales de reconstrucción, los cuales son muy superiores a las pérdidas estimadas como reducciones al PBI reportadas por instituciones oficiales.

Finalmente, como se ha demostrado, expresar los daños en términos de DALY per cápita permite comparar la severidad —es decir, la intensidad del daño por habitante— de un desastre con cualquier otro ocurrido en cualquier zona o en cualquier época. Esta capacidad comparativa convierte al MDDA en una herramienta potente para la gestión del riesgo de desastres y la formulación de estrategias adecuadas y oportunas para la mitigación de daños.

Referencias

Autoridad para la Reconstrucción con Cambios - [ARCC]. (2017). *Plan Integral de Reconstrucción con Cambios*. <https://www.fao.org/faolexresults/details/en/c/LEX-FAOC173655/>

Banco Mundial (2021). *GDP per capita (current US\$) - Peru* [Conjunto de datos]. World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD.?locations=PE>

Banco Central de Reserva Del Perú - [BCRP] (2023, junio). *Reporte de inflación. Panorama actual y proyecciones macroeconómicas. 2023-2024*. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Reporte-inflacion/2023/junio/report-de-inflacion-junio-2023.pdf>

Instituto Nacional de Defensa Civil - [INDECI] (2017, diciembre). *Compendio Estadístico del INDECI 2017 – Gestión Reactiva/Perú*. <https://www.gob.pe/institucion/indeci/informes-publicaciones/861434-compendio-estadistico-2017>

JPL MUR Measures Project (2019). *GHRSSST Level 4 MUR 0.25 deg Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis Ver. 4.2*. PO.DAAC, CA, USA [Conjunto de datos]. Physical Oceanography Distributed Active Archive Center - [PO.DAAC] <https://doi.org/10.5067/GHM25-4FJ42>

Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades - [CDC-MINSA] (2017). *Boletín Epidemiológico del Perú, Ministerio de Salud - [MINSA], 26, SE 12*. <https://www.dge.gob.pe/portal/docs/vigilancia/boletines/2017/12.pdf>

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). *ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment, 22(2), 138–147*. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

Murray, C. J., Lopez, A. D., & Jamison, D. T. (1994). *The*

global burden of disease in 1990: summary results, sensitivity analysis and future directions. Bulletin of the World Health Organization, 72(3), 495–509. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/264056>

Noy, Ilan (2015, abril). *A non-monetary global measure of the direct impact of natural disasters. (Working Paper No. 19262)*. <https://ir.wgtn.ac.nz/handle/123456789/19262>

Parodi, E., Kahhat, R., & Vázquez-Rowe, I. (2021). *Multi-dimensional damage assessment (MDDA): A case study of El Niño flood disasters in Peru. Climate Risk Management, 33, 100329*. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100329>

Parodi E, Kahhat R, Vázquez-Rowe I (2021). *Mul-dimensional damage assessment (MDDA): a case study of El Niño flood disasters in Peru. Clim Risk Manag 33:100329*. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100329>

Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación [SINPAD]. (Accesado en diciembre del 2017). <https://sinpad.indeci.gob.pe/login>

Takahashi, K. (2017). *Fenómeno El Niño: “Global” vs “Costero”. Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú, 4(4), 4-7*. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5101>

Vázquez-Rowe, I., Cucchi, C., Moya, L., Parodi, E., & Kahhat, R. (2024). *Applying the multi-dimensional damage assessment (MDDA) methodology to the Cumbre Vieja volcanic eruption in La Palma (Spain). Natural Hazards (Dordrecht), 120(15), 14593–14624*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06775-y>

World Health Organization - [WHO] (2020, diciembre). *WHO methods and data sources for life tables 1990-2019 (Global Health Estimates Technical Paper WHO/DDI/DNA/GHE/2020.1)*. https://www.who.int/docs/default-source/gho-documents/global-health-estimates/ghe2019_life-table-methods.pdf

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

Yerson Ccanchi¹ y Ricardo Zubieta¹

¹ 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

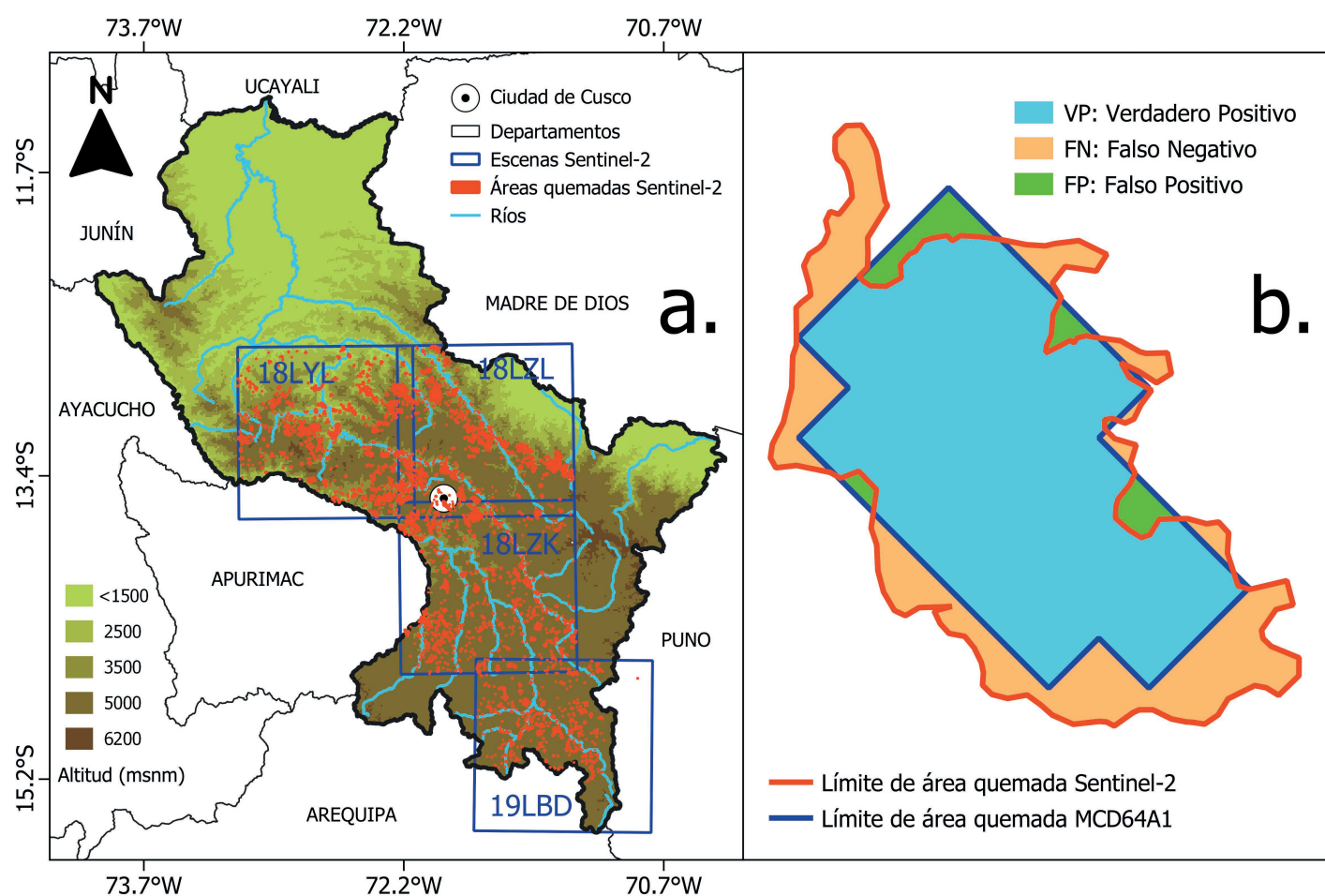


Figura 1. (a) Mapa de ubicación de la zona de estudio. (b) Superficies quemadas identificadas con MCD64A1 y Sentinel-2 para el cálculo de errores de comisión y omisión a nivel de área.

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)	Nº de superficies quemadas detectadas con Sentinel-2	Nº 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.

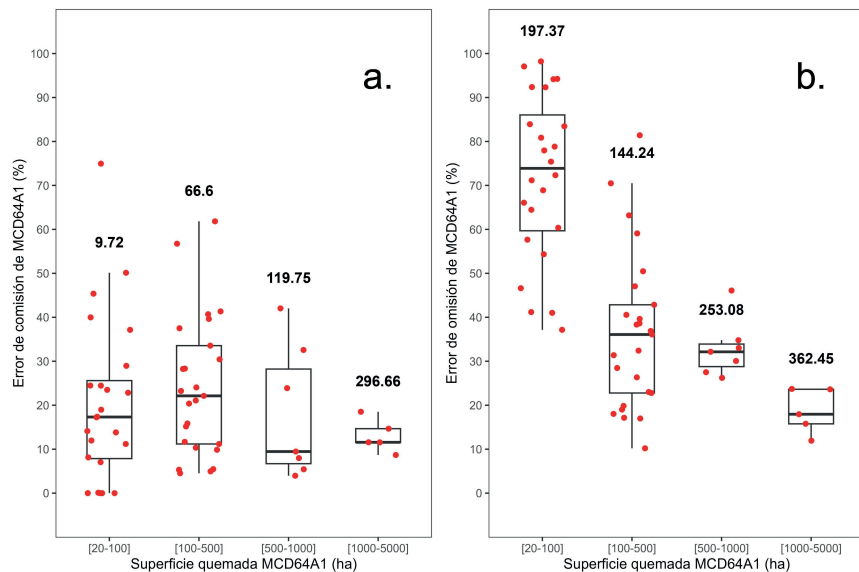


Figura 2. Diagramas de cajas que muestran la distribución de los errores de comisión (a) y omisión (b) del producto MCD64A1 en los Andes de Cusco, según el rango de tamaño de la superficie quemada. Los puntos rojos representan cada superficie quemada. En negrita se indica el valor promedio de las áreas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

RESUMEN INFORME TÉCNICO

n.º PPR/EL NIÑO-IGP/2025-04

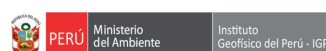
Publicado el 21 de mayo de 2025

Según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN) de marzo, se habría alcanzado la categoría Cálida Débil (0.72); mientras que los ICEN temporales (ICEN-tmp) de abril (0.49) y de mayo (0.10) se ubican en la categoría Neutra. Por otro lado, el promedio de los pronósticos de los modelos climáticos de NMME indican, a la fecha, que las anomalías de la temperatura superficial del mar frente a la costa norte y centro del Perú oscilarían dentro de la categoría Neutra hasta fines del verano de 2026.

En el Pacífico central, el Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de marzo (-0.19), así como sus temporales de abril (-0.09) y mayo (-0.11), corresponden a la categoría Neutra. Según el promedio de los pronósticos generados por los modelos climáticos de NMME se prevé condiciones dentro de la categoría Neutra hasta fines del verano de 2026.

Hay que indicar que los pronósticos de los modelos climáticos más allá de mayo, es muy probable, que continúen siendo menos precisos como consecuencia de la llamada "Barrera de predictibilidad" del ENOS.

El informe técnico completo se encuentra disponible en:
<http://bit.ly/459fVUG>



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

PP 068 "Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencia por Desastres"

Producto: "Estudios para la estimación de los riesgos de desastres"

Actividad: "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño"

Instituto Geofísico del Perú

INFORME TÉCNICO N° PpR/El Niño-IGP/2025-04

21/05/2025

Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

Resumen

Según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN) de marzo, se habría alcanzado la categoría Cálida Débil (0.72); mientras que los ICEN temporales (ICEN-tmp) de abril (0.49) y de mayo (0.10) se ubican en la categoría Neutra. Por otro lado, el promedio de los pronósticos de los modelos climáticos de NMME indican, a la fecha, que las anomalías de la temperatura superficial del mar frente a la costa norte y centro del Perú oscilarían dentro de la categoría Neutra hasta fines del verano de 2026.

En el Pacífico central, el Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de marzo (-0.19), así como sus temporales de abril (-0.09) y mayo (-0.11), corresponden a la categoría Neutra. Según el promedio de los pronósticos generados por los modelos climáticos de NMME se prevé condiciones dentro de la categoría Neutra hasta fines del verano de 2026.

Hay que indicar que los pronósticos de los modelos climáticos más allá de mayo, es muy probable, que continúen siendo menos precisos como consecuencia de la llamada "Barrera de predictibilidad" del ENOS.

www.igp.gob.pe
Calle Badojuz Nº 169
Urb. Mayorazgo IV Etapa
Ate, Lima 15012 - Perú.
(51) 13172300



Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

COMUNICADO OFICIAL

EFEN n.º 06 - 2025



ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO "EL NIÑO"

COMISIÓN MULTISECTORIAL ENCARGADA
DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO "EL NIÑO" – ENFEN
Decreto Supremo n.º 007-2017-PRODUCE

Estado del sistema de alerta: No activo¹

Publicado el 16 de mayo de 2025

La Comisión Multisectorial del ENFEN, en base al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas hasta la fecha, así como de los pronósticos de los modelos climáticos nacionales como internacionales, mantiene el Estado del Sistema de Alerta ante El Niño costero / La Niña costera en "No Activo" en la región Niño 1+2 (Figura 1), debido a que es más probable que la temperatura superficial del mar en dicha región se mantenga, en promedio, dentro de las condiciones neutras² hasta diciembre de 2025 (Figura 2).

Asimismo, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1) es más probable que la condición neutra continúe hasta diciembre de 2025 (Figura 2)². Es importante considerar que la fiabilidad de los modelos climáticos mejora, en general, a partir de mayo o junio, una vez superada la barrera de predictibilidad³.

El pronóstico estacional vigente para el trimestre mayo – julio⁴ de 2025, indica que en gran parte de las regiones andina y amazónica se presentarán lluvias dentro del rango habitual para esta época del año, con condiciones térmicas entre normales y por encima de lo normal; mientras que en la costa se prevén temperaturas normales, a excepción de la costa sur donde las temperaturas mínimas fluctuarán entre condiciones normales y ligeramente frías. En cuanto a los caudales⁵, hay una mayor probabilidad que el río Tumbes supere su rango estacional, principalmente en mayo.

En cuanto a los recursos pesqueros, luego del inicio de la temporada de pesca de anchoveta del stock norte-centro el 22 de abril, se espera que para las próximas semanas se mantengan buenos rendimientos hasta las 50 millas náuticas de la costa. En el caso de

¹ No activo: Ocurre cuando se presentan condiciones neutras o, cuando de acuerdo al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas y de la predicción de los modelos climáticos, el pronóstico probabilístico mensual del Índice Costero El Niño (ICEN) indica que la probabilidad de la categoría neutra superará el 50% durante al menos los siguientes tres meses consecutivos (Nota Técnica ENFEN 02-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-02-2024-sistema-de-alerta-ante-el-nino-y-la-nina-costera/>)

² Las condiciones mensuales se establecen en base al valor del ICEN. En el caso de la condición neutra, esta corresponde cuando el valor del ICEN es mayor o igual que -0.7 y menor o igual que +0.5 (Nota Técnica ENFEN 01-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-01-2024-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-ninacostera-en-el-peru/>). Para el caso del Pacífico central, la condición neutra se considera cuando el valor del ONI es mayor que -0.5 y menor que +0.5 (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

³ <https://doi.org/10.1002/joc.3513>

⁴ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-59.pdf>

las especies transzonales, se prevé que continúe la disponibilidad de caballa y bonito a lo largo del litoral peruano. En cuanto a la merluza, continuaría la disponibilidad observada para la pesquería industrial, con un ligero incremento de la presencia de ejemplares mayores a 35 cm al norte de Punta Sal. Con respecto al calamar gigante o pota, se mantendría el incremento de sus desembarques.

Se recomienda a los tomadores de decisiones adoptar medidas correspondientes a la prevención y reducción del riesgo de desastres, durante el periodo de estiaje. Asimismo, hacer seguimiento de los avisos meteorológicos⁶ y pronósticos climáticos⁷, para las acciones correspondientes. Por otro lado, se exhorta a la población a mantenerse informada a través de las fuentes oficiales del ENFEN.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará monitoreando la evolución de las condiciones oceánicas, atmosféricas y biológicas-pesqueras, y actualizando las perspectivas. La emisión del próximo Comunicado Oficial ordinario será el viernes 13 de junio de 2025.

- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace:
<http://bit.ly/4mzmjKZ>

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN



⁵ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02694SENA-57.pdf>

⁶ <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=aviso-meteorologico>

⁷ <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=pronostico-climatico>



-  @igp.peru
-  @igp_peru
-  @igp.peru
-  @igp_videos
-  @institutogeofisicodelperu
-  @igp.peru