

Reconstructing Ecosystems: Analysis of the Recolonization of Flora After the 2022 Fires in Pampa Caballero, Granja Porcon, Cajamarca

Edilberto Gastolomendo-Malimba¹; Haydeé Díaz-Rimarachún²; Gladys S. Licapa-Redolfo³

^{1,2}Ingeniería Ambiental, Universidad Privada del Norte, Perú. N00219829@upn.pe; N00220092@upn.pe

³Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Abstract– This study evaluated the vegetation recovery following the 2022 fires in Pampa Caballero, Granja Porcon, Cajamarca, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Sentinel-2 satellite images corresponding to pre-fire, during-fire, and post-fire periods were analyzed. The results showed that the average NDVI significantly decreased during the fire, reflecting a considerable impact on the vegetation. However, two years later, the NDVI increased above pre-fire levels, indicating a remarkable ecosystem recovery. This regeneration highlights the resilience of vegetation in the affected area. The use of NDVI for multitemporal analysis proved to be an effective tool for monitoring post-fire regeneration, providing key information for sustainable management and conservation planning in fire-affected areas. This approach allows the identification of recovery patterns and areas that may require additional interventions to promote long-term ecosystem resilience.

Keywords– Forest fire, Satellite images, NDVI, dNBR, High Andean ecosystems.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

Reconstruyendo Ecosistemas: Análisis de la Recolonización de la Flora Tras los Incendios de 2022 en pampa Caballero, Granja Porcón, Cajamarca

Edilberto Gastolomendo-Malimba¹; Haydeé Díaz-Rimarachín²; Gladys S. Licapa-Redolfo³

^{1,2}Ingeniería Ambiental, Universidad Privada del Norte, Perú. N00219829@upn.pe; N00220092@upn.pe

³Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Resumen— El presente estudio evaluó la recuperación de la vegetación tras los incendios de 2022 en Pampa Caballero, Granja Porcón, Cajamarca, utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Se analizaron imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a periodos Pre-Incendio, durante el Incendio y Post-Incendio. Los resultados mostraron que el NDVI promedio disminuyó significativamente durante el incendio, lo que refleja un impacto considerable en la vegetación. Sin embargo, dos años después, el NDVI aumentó por encima de los niveles previos al incendio, indicando una recuperación notable del ecosistema. Esta regeneración subraya la capacidad de resiliencia de la vegetación en la zona afectada. El uso del NDVI para el análisis multitemporal demostró ser la herramienta efectiva para monitorear la regeneración Post-Incendio, proporcionando información clave para la gestión sostenible y la planificación de la conservación en áreas afectadas por incendios forestales. En conclusión, el enfoque permite identificar patrones de recuperación y áreas que podrían necesitar intervenciones adicionales para fomentar la resiliencia del ecosistema a largo plazo.

Palabras clave—Incendio forestal, Imágenes satelitales, NDVI, dNBR, Ecosistemas altoandinos.

I. INTRODUCCIÓN

Durante milenios, el fuego ha desempeñado un papel fundamental en la dinámica de numerosos ecosistemas forestales, utilizado por los seres humanos como herramienta para la gestión del territorio. Este fenómeno natural ha ejercido una influencia significativa en las comunidades a lo largo de la historia, desempeñando una función crucial en el mantenimiento de la salud de algunos ecosistemas [1]. Los incendios forestales están estrechamente vinculados al cambio climático, ya que el aumento en su frecuencia e intensidad conduce a mayores emisiones de gases de efecto invernadero, exacerbando el calentamiento global y la ocurrencia de eventos climáticos extremos [2].

Un estudio de la Universidad de Maryland ha revelado que desde el 2001, se pierden aproximadamente tres millones de hectáreas adicionales de bosque cada año debido a los incendios [3]. En 2019, se registraron numerosos incendios forestales en distintas partes del mundo, incluyendo la selva amazónica, Indonesia, los bosques del Ártico y Australia, situación que ha generado preocupación por sus implicaciones potenciales [2]. Sin embargo, desde el punto de vista científico – ambiental, estos eventos generan impactos negativos en los ecosistemas altoandinos. Manifestándose en pérdida de biodiversidad y alteraciones paisajísticas,

provocando migraciones de especies, mortalidad de vida silvestre, degradación del suelo con cambios en sus propiedades físicas y químicas, y erosión debido a la pérdida de cobertura vegetal [4].

Asimismo, los incendios forestales, a menudo provocados por acciones humanas, pueden impactar de diversas maneras la biodiversidad. En otros casos, los incendios surgen de la quema de residuos o de intentos de ocupar terrenos [5].

En el Perú, los incendios forestales causan pérdidas significativas y devastadoras, con graves consecuencias para los recursos naturales. Estos incendios destruyen la vegetación, afectan negativamente a la fauna silvestre, eliminan la vida del suelo, contaminan las fuentes de agua y deterioran la calidad del aire [6]. La mayoría de los incendios forestales se consideran de origen humano, relacionados principalmente con la habilitación de áreas para cultivos agrícolas y la quema de pastizales [7]. Una vez iniciado un incendio forestal, su comportamiento y propagación están determinados por tres factores principales: el tipo de combustible disponible, las condiciones climáticas y la configuración del terreno, conocidos comúnmente como la "gran triada" del fuego[8].

En la región de Cajamarca, los incendios forestales de origen humano han sido una emergencia histórica, estrechamente vinculada a la práctica ancestral de quemas para cambiar el uso de la tierra, especialmente en el contexto agrícola. Estas quemas tienen como consecuencias de devastación de la cobertura forestal, la pérdida de fauna silvestre, el deterioro del patrimonio cultural, y la contaminación del agua y el aire [8].

Asimismo, Los incendios forestales han llegado a ser un problema ambiental de considerable importancia y severidad en los últimos años [9], en Granja Porcón vienen ocurriendo diversos incendios forestales causados por la actividad humana, en un informe realizado en el 2019 del Gobierno Regional de Cajamarca menciona que en la Granja Porcón, en la carretera a San Pablo, los comuneros causaron un incendio forestal que dañó una gran extensión de áreas verdes, incluyendo árboles, montañas y pastos. Los pinos, al contener resinas, contribuyeron a que el incendio se propagara más rápidamente y con mayor intensidad [10].

De tal manera que en el pasado 8 de septiembre del 2022, se suscitó un incendio forestal de origen antrópico, informado por diversos medios de comunicación en la región, como lo

informa la Red de comunicación Regional, Juan Estela Ruiz, administrador de SERFOR en Cajamarca, informó que el incendio forestal en las plantaciones de Granja Porcón arrasó con 180 hectáreas de bosque y 150 hectáreas de pastos. explicó que el siniestro habría sido provocado por campesinos, quienes tienen la costumbre de quemar pastos con la creencia de que esto traerá lluvias [11].

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo Evaluar la recolonización de la flora tras los incendios del 2022 en Pampa Caballero, Granja Porcón, Cajamarca en el 2024, utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como una herramienta principal de análisis, con el fin de comprender como ha ido regenerándose la vegetación a través del tiempo, entendiendo que la recuperación de la vegetación luego de los incendios depende de la intensidad de fuego, la frecuencia de los incendios y factores climáticos como las precipitaciones [12]. Por lo que este estudio radica en la necesidad de comprender la dinámica de recuperación vegetal en las áreas afectadas por incendios, lo cual es fundamental para el desarrollo de estrategias de manejo

sostenible de los recursos forestales en la región, a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales, se espera identificar patrones de regeneración y áreas críticas que requieran intervenciones adicionales. También se anticipa que los resultados de esta investigación proporcionarán información valiosa para la planificación de esfuerzos de conservación y reforestación, sirviendo como un modelo de referencia para otras regiones que enfrentan desafíos similares en la gestión de ecosistemas afectados por los incendios.

II. METODOLOGÍA

A. *Ámbito de estudio*

El área de estudio está ubicada, en el sector Pampa Caballero en el caserío La Shoclla, el cual está dentro de la propiedad de la Cooperativa Atahualpa Jerusalén de Trabajadores Ltda., el área afectada abarca 432.34 ha las cuales fueron calculadas en las fechas donde se suscitó el incendio forestal, lo cual se muestra en la fig. 1.

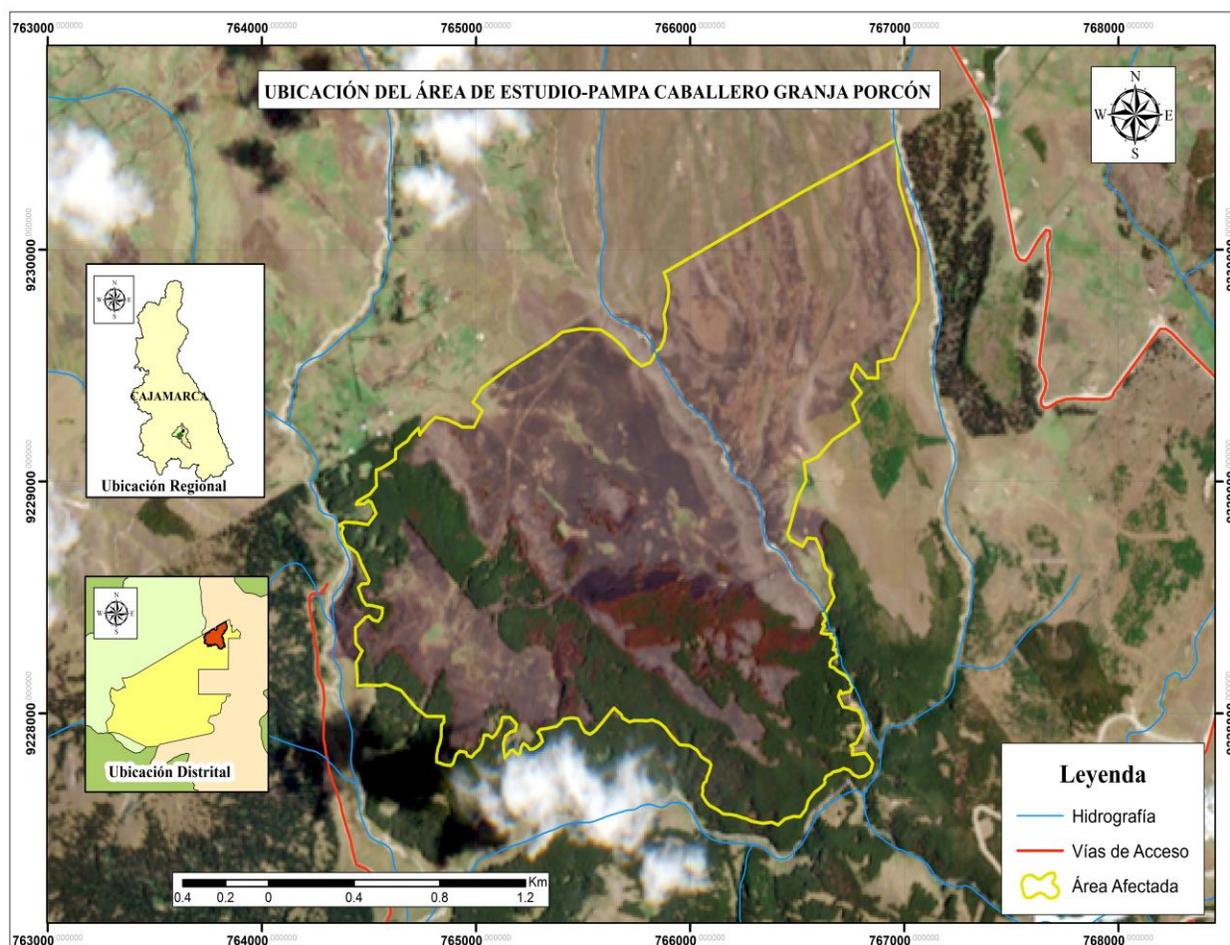


Fig. 1 Área de estudio, Sector Pampa Caballero, Granja Porcón, Cajamarca.

Al exhibir diversas unidades climáticas, muestra una gran biodiversidad [13], por lo que la región de tipo puna, situada en la parte superior de la cordillera de los Andes, a altitudes superiores a los 3800 metros sobre el nivel del mar (Aproximadamente), se distingue por su clima frío y húmedo, en esta área, la presencia de los bosques es escasa y predomina la vegetación herbácea, como pastizales y bofedales, que se utiliza para la ganadería [14]. En la Tabla 1 se muestra la caracterización topográfica del área de estudio.

TABLA I
CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Variable	Unidades	Valor	
		Mínimo	Máximo
Altitud	msnm	3325	3589
Área Afectada	ha	432.43	
Perímetro	km	12.54	

B. Procesamiento de datos

Dado el carácter de la investigación, se adoptó un enfoque metodológico integrado que combina técnicas cuantitativas y cualitativas [15], ya que el análisis de las imágenes satelitales se basó en la base de datos [13] Copernicus, utilizando imágenes del satélite Sentinel-2, adquiridas en diferentes fechas y sin nubes desde la página oficial [16], seleccionando cuatro imágenes representativas: Pre-Incendio (30/07/2022), inicio del Incendio (08/09/2022), término del Incendio (28/10/2022), y Post- Incendio para verificar la recuperación del ecosistema (22/05/2024).

Las imágenes utilizadas son de nivel 2A, lo que indica que incluyen correcciones Geométricas, radiométricas y atmosféricas. Antes del Análisis, las imágenes fueron remuestreadas a 10 metros para uniformizar la resolución espacial de todas las bandas, dado que las imágenes de Sentinel-2 presentan resoluciones de 10, 20 y 60 metros. Posteriormente, se recortaron para ajustarse a la zona de estudio [16], la cual se detalla en la Tabla 2 y para el procesamiento de los datos se emplearon las herramientas Sentinel Application Platform (SNAP) y el software ArcGIS 10.8.

TABLA II
METADATOS DE LAS IMÁGENES SATELITALES UTILIZADAS

Satélite	Sensor	Fecha	Zona UTM	Datum	Fuente
Sentinel - 2	*MSI	30/7/2022	17 S	WGS84	https://browser.dataspace.copernicus.eu/
Sentinel - 2	*MSI	8/9/2022	17 S	WGS84	
Sentinel - 2	*MSI	28/10/2022	17 S	WGS84	
Sentinel - 2	*MSI	22/5/2024	17 S	WGS84	

*MSI: MultiSpectral Instrumento.

C. Cálculo NDVI

El principal indicador empleado en este estudio es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice sirve para medir la biomasa fotosintéticamente activo, en términos simples, la salud de la vegetación, en esencia, el NDVI permite distinguir la vegetación de otros tipos de cobertura terrestre (como las artificiales) y evaluar su estado general. También facilita la identificación y visualización de áreas vegetativas en el mapa, así como la detección de cambios anómalos en el crecimiento [17]. Para realizar el cálculo del NDVI se utiliza la ecuación 1.

$$NDVI = \frac{NIR_{band} - RED_{band}}{NIR_{band} + RED_{band}} \dots \dots (1)$$

Dónde:

NIR band: Banda Infrarrojo Cercano.
Red band: Banda del Rojo Visible.

D. Cálculo del Nivel de Severidad

El Índice Normalizado de Quemaduras (NBR), combina el uso de las longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR) (B8A) y el infrarrojo de onda corta (SWIR) (B12), ya que estas bandas responden de manera distinta a la vegetación sana y a la vegetación quemada, el cual se calcula con la ecuación 2 [18].

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \dots \dots (2)$$

Dónde:

NBR: Índice Normalizado de Quema.
NIR: Infrarrojo Cercano
SWIR: Infrarrojo de Onda Corta

La variación NBR antes del incendio y después del incendio, extraído de las imágenes, se utiliza para calcular el diferencial NBR (dNBR o ΔNBR). Este indicador ayuda a estimar la severidad del incendio. Valores más altos de dNBR señalan mayores daños a la vegetación y el suelo, mientras que los valores negativos pueden indicar la regeneración de la vegetación tras el incendio. El cálculo del dNBR se realiza con la ecuación 2 [19].

$$dNBR \text{ o } \Delta NBR = (PreIncendioNBR - PostIncendioNBR) \dots \dots (3)$$

Dónde:

PreIncendioNBR: Antes del Incendio.
PostIncendioNBR: Después del Incendio

Los valores de dNBR pueden variar en cada caso, por lo que, siempre que sea posible, se recomienda realizar una evaluación de campo para obtener interpretaciones más precisas. No obstante, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) ha desarrollado una tabla de clasificación para

ayudar en la interpretación de la severidad del incendio [19], la cual se muestra en la figura 2.

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10 ³)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

Fig. 2 Niveles severidad de incendios determinados a partir del dNBR, según la propuesta del USGS.

III. RESULTADOS

A. Dinámica Temporal del NDVI

El análisis temporal del NDVI es fundamental para comprender cómo ha cambiado la vegetación en respuesta a un evento de perturbación, en este caso un incendio forestal y cómo se ha recuperado con el tiempo. A continuación, se presenta un análisis detallado basado en los valores mínimos, máximos y medios del NDVI para las diferentes etapas: Pre-Incendio, Durante el incendio, y Post-Incendio.

En la Tabla 3, se muestra los resultados obtenidos del análisis realizado antes del incendio, en la fecha del 30 de julio del 2022, la vegetación muestra un estado saludable, con un valor promedio de 0.5838. esto sugiere que la mayoría de la vegetación en el área estaba verde y densa, indicando buena salud y buena cobertura vegetal.

TABLA III
PROMEDIO DEL NDVI EN EL PRE-INCENDIO

Nº	Fecha	NDVI		Valor Promedio del NDVI	Periodo
		Mín	Máx	Media	
1	30-Jul-22	0.1261	0.9376	0.5838	Pre- Incendio

Durante el período del incendio, se identificaron dos fechas clave: el 8 de septiembre de 2022, considerado como el inicio del incendio forestal en el área de estudio, y el 12 de octubre de 2022, cuando ya se había logrado el control total del incendio, marcando así su final. Por lo tanto, durante el incendio, se observa una disminución en el valor promedio del NDVI a 0.5345, lo que sugiere un impacto significativo en la vegetación. La aparición de valores negativos (mínimo de -0.0200 indica áreas donde la vegetación fue completamente destruida por el incendio tal como se muestra en la Tabla 4. Luego de un mes después del incendio, el valor promedio del NDVI cae a 0.4498, indicando que la vegetación ha sido completamente destruida por el incendio, esto sugiere que después del tiempo de que el incendio ha sido controlado y

aunque algunas áreas han comenzado a regenerarse, todavía existen zonas con vegetación deteriorada o ausente.

TABLA IV
PROMEDIO DEL NDVI EN EL INCENDIO

Nº	Fecha	NDVI		Valor Promedio del NDVI	Periodo
		Mín	Máx	Media	
1	8-Sep-22	-0.0200	0.9600	0.5345	Incendio
2	13-Oct-22	-0.00042	0.8800	0.4498	

Entonces luego de 2 años después del incendio, la vegetación ha mostrado una recuperación considerable. El promedio del NDVI ha aumentado a 0.6368, superando incluso el valor del Pre-Incendio, lo que indica que la vegetación no solo se ha recuperado, sino que, en algunos casos, ha alcanzado un mejor estado que antes del evento tal como se muestra en la Tabla 5.

TABLA V
PROMEDIO DEL NDVI EN EL POST-INCENDIO

Nº	Fecha	NDVI		Valor Promedio del NDVI	Periodo
		Mín	Máx	Media	
1	22-May-24	0.1800	0.9900	0.6368	Post- Incendio

Este análisis revisado subraya el impacto inicial del incendio y la subsecuente recuperación de la vegetación en el área de estudio, en la que se puede visualizar en la Figura 3.

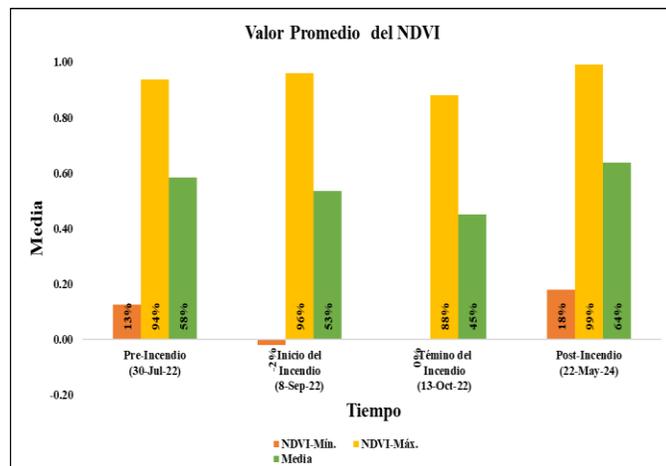


Fig. 3 Valor Promedio Expresado en porcentajes en relación con el área de estudio.

B. Clasificación e interpretación del NDVI

Los valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable. Se observa en áreas con vegetación vigorosa y un dosel bien desarrollado, lo que es típico en bosques maduros o cultivos en buen estado. Por consecuencia, los valores cercanos a 0, representan vegetación escasa o estresada, suelos

descubiertos o áreas en las primeras fases del crecimiento de cultivos, y los valores negativos, indican superficies sin vegetación, como cuerpos de agua, áreas rocosas o suelos desnudos [20].

Entonces la función de NDVI a color procesa la imagen de entrada aplicando el cálculo de NDVI y emplea un gradiente o paleta de colores para visualizar los resultados [21], por lo tanto, el mapa de colores predeterminado se conoce como NDVI3. Los píxeles en tonos rojos y naranjas indican zonas sin vegetación, mientras que los píxeles amarillos corresponden a áreas con vegetación de baja a moderada densidad. Los píxeles verdes señalan regiones con vegetación densa y vigorosa [21], esto a su vez está representado por colores como se muestra en la Figura 4.

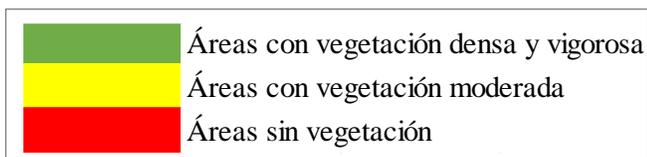


Fig. 4 Clasificación NDVI.

El análisis temporal del NDVI en la zona de estudio revela un ecosistema saludable antes del incendio, con valores de entre 0.1261 y 0.9376 en el NDVI, representando vegetación vigorosa en la mayor parte del área, sin embargo, al inicio del incendio, los valores disminuyen ligeramente de -0.0238 a 0.9633 en los valores del NDVI, indicando el comienzo del estrés en la vegetación, este deterioro se acentúa al término del incendio, donde los valores oscilan entre -0.00042 y 0.8811, reflejando un daño significativo en la vegetación, con amplias zonas estresadas o destruidas, en el periodo Post-Incendio, se observa una recuperación notable, con valores de NDVI entre 0.1802 y 0.9879, lo que indica una regeneración significativa de la vegetación, aunque claramente la dinámica de afectación y recuperación de la vegetación tras el incendio, destacando la resiliencia del ecosistema como podemos observar en la Figura 5.

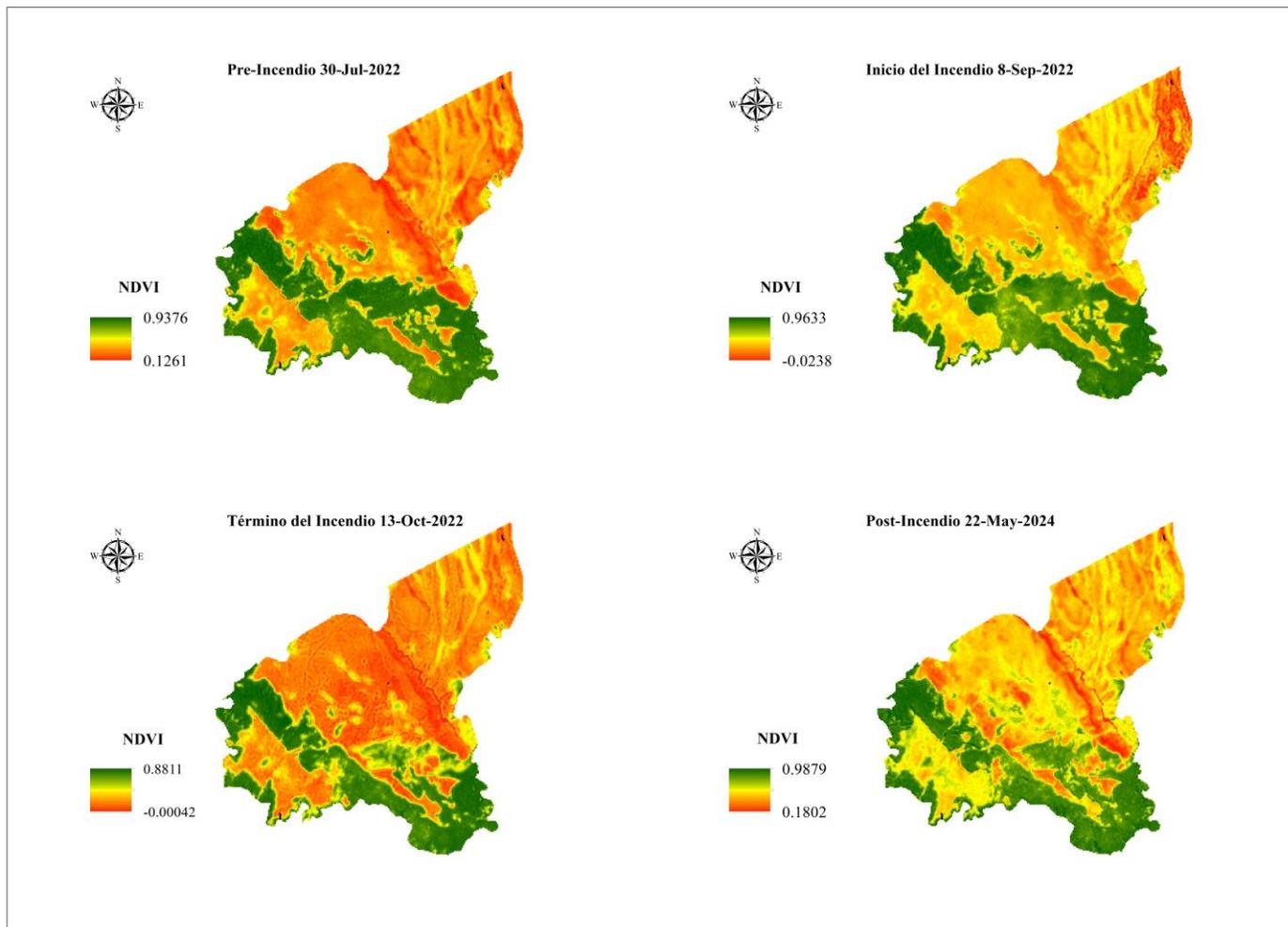


Fig. 5 Evolución temporal del NDVI en Pampa Caballero – Granja Porcón.

C. Análisis de severidad

El análisis revela que el área total, presenta un valor mínimo de NDVI de -0.256, indicando la presencia de superficies gravemente afectadas, entonces la diferencia entre el valor mínimo y máximo tiene un rango de 1.474, el cual muestra una alta variabilidad en la cobertura vegetal, con un promedio de NDVI de 0.275, lo que sugiere una vegetación escasa o estresada en la mayor parte del área, la desviación estándar es de 0.183, el cual indica una considerable dispersión en valores de NDVI, mientras que el valor medio es de 0.248, ligeramente inferior al promedio, sugiere una distribución sesgada hacia valores más bajos, y el percentil 90

es de 0.490 muestra que solo el 10% del área tiene un NDVI superior a este valor como se muestra en la tabla 6 y en la Figura 6, puesto que se refuerza la conclusión de que la mayoría del área posee una cobertura vegetal limitada y predominante estresada.

TABLA VI
VALORES DEL NIVEL DE SEVERIDAD DEL INCENDIO

Mín.	Máx.	Rango	Promedio	Desviación Estándar	Valor Medio	Percentil 90
-0.256	1.218	1.474	0.275	0.183	0.248	0.490

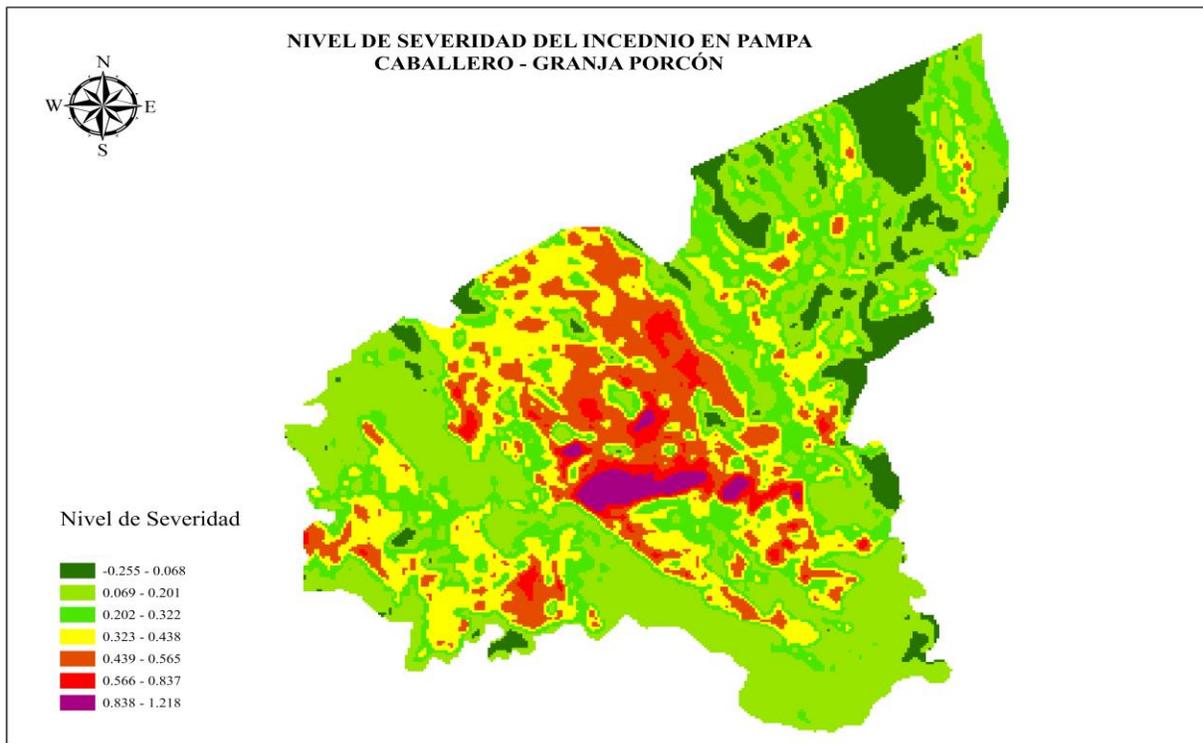


Fig. 6 Nivel de severidad del área de estudio.

IV. DISCUSIONES

El análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a lo largo del tiempo ha permitido evaluar la respuesta de la vegetación tras el incendio forestal ocurrido el 8 de septiembre de 2022 en la región de Pampa Caballero, Granja Porcón, Cajamarca. Los resultados evidencian un impacto significativo del incendio en la cobertura vegetal mostrado en la Figura 7, seguido de un proceso de regeneración notable, lo que subraya la resiliencia del ecosistema.



Fig. 7 Incendio forestal en el área de estudio, 08 de setiembre del 2022.

Inicialmente, los valores del NDVI previos al incendio indicaban una vegetación saludable, con un promedio de 0.5838, lo cual es consistente con un ecosistema altoandino vigoroso, dominado por pajonales como se muestra en la figura 8, sin embargo, durante el incendio, se observó una disminución en el valor promedio del NDVI, bajando a 0.5345, lo que refleja un daño inmediato en la vegetación. Este impacto se intensificó hacia el final del incendio, con una reducción adicional del NDVI a 0.4498, sugiriendo que la vegetación en el área fue gravemente afectada.



Fig. 8 Vegetación Altoandina en el área de estudio con plantaciones forestales en el Pre-Incendio.

Dos años después del incendio, el NDVI promedio se incrementó a 0.6368, superando incluso los valores previos al incendio. Esto sugiere no solo una recuperación de la vegetación, lo cual puede atribuirse a la capacidad de muchas especies nativas para rebrotar tras un incendio, gracias a sus sistemas de raíces que almacenan nutrientes y permiten un nuevo crecimiento desde la base [22], en tal sentido es que en el área de estudio encontramos ecosistemas altoandinos dominados principalmente por especies herbáceas como pajonales. Además, las condiciones climáticas favorables en el periodo posterior al incendio pueden haber facilitado este proceso de regeneración, ya que la cercanía a fuentes de propágulos y las condiciones bióticas resultantes del incendio, como la cobertura vegetal y la presencia de fauna silvestre, influyen significativamente en la recuperación [23], como se muestra en la Figura 9. Estudios han demostrado que la recuperación de la vegetación puede depender de la intensidad del fuego y de factores ambientales, donde los ecosistemas que experimentan incendios pueden no solo recuperarse, sino también mejorar en diversidad y densidad de especies en el tiempo Post-Incendio [23]. Sin embargo, es relevante considerar que la invasión de especies exóticas puede ser favorecida en áreas afectadas por incendios, lo que puede complicar la recuperación de la vegetación nativa [23]. Por lo tanto, la combinación de regeneración natural y condiciones ambientales favorables es crucial para entender la dinámica de la recuperación Post-Incendio en los ecosistemas afectados.



Fig. 9 Presencia de fauna silvestre en las áreas afectadas por el incendio.

La clasificación del NDVI en el área en estudio revela una variabilidad significativa en la regeneración de la vegetación. Las zonas con NDVI más altos corresponden a áreas con vegetación densa y saludable, mientras que las áreas con NDVI bajos o negativos indican zonas aún estresadas o sin vegetación, como suelos desnudos o superficies rocosas, esta variabilidad resalta la necesidad de intervenciones focalizada para apoyar la regeneración en las áreas más afectadas.

El análisis de severidad del incendio, basado en la diferencia entre los valores del NBR antes y después del incendio (dNBR), ha mostrado una alta variabilidad en la cobertura vegetal, con un promedio de NDVI de 0.275 y una desviación estándar de 0.183. Estos resultados refuerzan la conclusión de que la mayoría del área aún presenta una cobertura vegetal limitada y estresada, a pesar de la recuperación observada en algunas zonas. Investigaciones han demostrado que el dNBR está estrechamente vinculado con la cantidad de vegetación afectada por el fuego y la intensidad del mismo [24] [25].

Un estudio en la región de Cajamarca, reveló que seis meses después de los incendios en Huasmín y San Felipe, los niveles de NDVI aumentaron de 0.38 y 0.34 a 0.71 y 0.57, indicando una significativa recuperación de la vegetación [25]. Esto resalta la importancia del dNBR y el NDVI como indicadores clave para evaluar el impacto y la recuperación tras incendios forestales [25], tal como se muestra el impacto del incendio en la Figura 10.



Fig. 10 Área afectada por el incendio con alto índice de severidad.

Por lo tanto, el presente estudio ha permitido comprender mejor la dinámica de la recuperación vegetal en Pampa Caballero después del incendio de 2022. La resiliencia del ecosistema, entendida como su capacidad para recuperarse de perturbaciones manteniendo sus características estructurales y funcionales, es un concepto central en ecología [26]. Sin embargo, la variabilidad en los procesos de recuperación indica que es necesario un monitoreo y conservación continuos para garantizar una recuperación completa y sostenible esto se debe a que la velocidad y el grado de perturbación sugieren que la resiliencia no es un proceso homogéneo [27]. En algunos casos, la recuperación de una especie dominante es fundamental para la resiliencia del sistema en su conjunto [28]. Por lo tanto, estos hallazgos son cruciales para el desarrollo de estrategias de manejo sostenible de los recursos forestales en la región y pueden servir como referencia para otras áreas que enfrentan desafíos similares.

V. CONCLUSIONES

El análisis de la regeneración de la vegetación en Pampa Caballero, Granja Porcón, Cajamarca, mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ha mostrado ser una herramienta eficaz para evaluar la recolonización de la flora tras los incendios suscitado en 2022. A lo largo del estudio, se ha observado una dinámica clara en la recuperación de la vegetación, reflejada en los cambios en los valores de NDVI en diferentes periodos: Pre.Incendio, Durante el Incendio y Post.Incendio.

Inicialmente, los resultados indicaron un impacto negativo significativo en la vegetación, con una disminución considerable en los valores de NDVI durante y después del incendio, sin embargo, dos años después del evento, se ha evidenciado una recuperación notable en la vegetación, con valores de NDVI que incluso superan los registrados en el periodo Pre-Incendio. este hallazgo sugiere que el ecosistema

afectado ha mostrado una capacidad de resiliencia significativa, logrando no solo recuperarse, sino también alcanzar un estado de vegetación más densa y saludable que antes del incendio.

Estos resultados subrayan la importancia del monitoreo continuo y la implementación de estrategias de manejo sostenible para garantizar la recuperación a lo largo de los ecosistemas afectados por incendios forestales. Además, la metodología empleada en este estudio, basada en el análisis multitemporal de imágenes satelitales, proporciona un modelo útil para la planificación de esfuerzos de conservación y reforestación en otras regiones con desafíos similares. El estudio destaca la necesidad de seguir investigando los factores de gestión de recursos naturales y mitigar los efectos negativos de futuros incendios en la región.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento y reconocimiento al equipo de trabajo por su dedicación y esfuerzo en esta investigación. Su compromiso y colaboración han sido fundamentales para alcanzar nuestros objetivos. Asimismo, extendemos un agradecimiento especial al Gerente General de la Cooperativa Agraria Atahualpa Jerusalén de Trabajadores Ltda., Señor Alejandro Quispe Chilón, por su valioso apoyo al permitir la realización de esta investigación en las instalaciones de la Cooperativa.

REFERENCIAS

- [1] "DIVERSIDAD BIOLÓGICA FORESTAL - Unasylva 209". Consultado: el 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/4/y3582s/y3582s08.htm>
- [2] "Informe incendios forestales 2020: El planeta en llamas". Consultado: el 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.wwf.es/?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas>
- [3] A. Tyukavina *et al.*, "Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019", *Front. Remote Sens.*, vol. 3, 2022, doi: 10.3389/frsen.2022.825190.
- [4] J. De La Cruz-Arango, R. Córdor Alarcón, J. De La Cruz-Arango, y R. Córdor Alarcón, "Dinámica de regeneración natural post-incendio de ecosistemas altoandinos en el distrito de Chiara. Ayacucho-Perú", *J. Selva Andina Biosphere*, vol. 11, núm. 1, pp. 6–21, 2023, doi: 10.36610/j.jsab.2023.110100006.
- [5] D. W. Ramírez y R. Vargas, "Primeros estadios en la regeneración natural de la vegetación post-incendio en los Humedales de Ventanilla (Lima-Peru)", *Ecol. Apl.*, vol. 16, núm. 1, pp. 23–30, ene. 2017, doi: 10.21704/rea.v16i1.900.
- [6] "Plan de Prevención y Reducción de Riesgos de Incendios Forestales Periodo 2019-2022 | SINIA". Consultado: el 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/plan-prevencion-reduccion-riesgos-incendios-forestales-periodo-2019>
- [7] "[CENEPRED] Escenario de Riesgo por Incendios Forestales (Biblioteca SIGRID)". Consultado: el 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/10471>
- [8] "[CENEPRED] Escenario de riesgo por incendios forestales de la región Cajamarca (Biblioteca SIGRID)". Consultado: el 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/14476>
- [9] "Cajamarca: SERFOR evalúa daños ocurridos en Porcón luego de incendio forestal". Consultado: el 14 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/serfor/noticias/652019->

- cajamarca-serfor-evalua-danos-ocurridos-en-porcon-luego-de-incendio-forestal
- [10] “INCENDIO FORESTAL EN PORCÓN CAUSÓ GRAN IMPACTO EN LA POBLACIÓN CAJAMARQUINA”, NOTICIAS Gobierno Regional Cajamarca. Consultado: el 14 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.regioncajamarca.gob.pe/portal/noticias/det/295>
- [11] “INCENDIO FORESTAL EN GRANJA PORCÓN ARRASÓ CON 180 HECTÁREAS DE BOSQUES Y 150 HECTÁREAS DE PASTO”, RCR Peru. Consultado: el 14 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rcrperu.com/incendio-forestal-en-granja-porcon-arraso-con-180-hectareas-de-bosques-y-150-hectareas-de-pasto/>
- [12] J. A. S. Saavedra, “Los incendios forestales y su repercusión en el ecosistema peruano: Forest fires and their impact on the Peruvian ecosystem”, *LATAM Rev. Latinoam. Cienc. Soc. Humanidades*, vol. 4, núm. 2, Art. núm. 2, abr. 2023, doi: 10.56712/latam.v4i2.610.
- [13] Y. E. C. Aguilar, G. P. G. Angarita, y P. A. S. Daza, “Análisis de la cobertura vegetal en incendios forestales mediante índices espectrales: caso de estudio Cerros Orientales (Bogotá, Colombia): Español”, *Av. Investig. En Ing.*, vol. 18, núm. 1 (Enero-Junio), Art. núm. 1 (Enero-Junio), abr. 2021, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.6931.
- [14] “Políticas Ecosistemas”, INAIGEM. Consultado: el 14 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://inaigem.gob.pe/web2/politicas-ecosistemas/>
- [15] H. Ñ. Paitán, E. M. Mejía, E. N. Ramírez, y A. V. Paucar, *Metodología de la investigación cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la U, 2014.
- [16] M. L. España-Boquera, O. Champo-Jiménez, M. D. Uribe-Salas, M. L. España-Boquera, O. Champo-Jiménez, y M. D. Uribe-Salas, “Extensión y severidad de incendios forestales en Michoacán en 2021 a partir de imágenes Sentinel-2”, *Polibotánica*, núm. 57, pp. 125–144, 2024, doi: 10.18387/polibotanica.57.7.
- [17] “Procesamiento de Imágenes Satelitales para analizar el impacto de incendios forestales en el distrito de Ocongate, Quispicanchi, Cusco, Perú”, Ingenia Web. Consultado: el 14 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ingeniaweb.up.edu.pe/proyecto/proyecto-estudiante/>
- [18] E. Alcaras, D. Costantino, F. Guastaferro, C. Parente, y M. Pepe, “Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery”, *Remote Sens.*, vol. 14, núm. 7, Art. núm. 7, ene. 2022, doi: 10.3390/rs14071727.
- [19] “Índice Normalizado de Área Quemada (NBR) | UN-SPIDER Knowledge Portal”. Consultado: el 15 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://un-spider.org/es/node/10959>
- [20] “¿Cómo interpretar la escala de colores del índice NDVI?”, Auravant. Consultado: el 15 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.auravant.com/ayuda-es/preguntas-frecuentes/3609172-como-interpretar-la-escala-de-colores-del-indice-ndvi/>
- [21] “Función NDVI a color—ArcGIS Pro | Documentación”. Consultado: el 15 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-colored-function.htm>
- [22] “Regeneración post incendio | Theodore Payne Foundation”. Consultado: el 15 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://theodorepayne.org/regeneracion-post-incendio/>
- [23] P. I. Becerra, C. Figueroa, A. Meza, P. I. Becerra, C. Figueroa, y A. Meza, “Dinámica post-incendio de la vegetación en la localidad de Rastrojos, Chile central”, *Gayana Botánica*, vol. 79, núm. 1, pp. 10–26, jun. 2022, doi: 10.4067/S0717-66432022000100010.
- [24] A. R. López García, “Estudio de la severidad y regeneración de la vegetación por el incendio de 2012 en el Bosque La Primavera (México) mediante imágenes LANDSAT 7”, *Rev. Cartográfica*, núm. 101, pp. 35–50, jun. 2020, doi: 10.35424/rcarto.i101.420.
- [25] J. A. Cubas Sanchez, “Evaluación de la severidad y recuperación vegetal postincendio utilizando imágenes de satélite en la región Cajamarca”, *Univ. Nac. Jaén Repositorio Inst. - UNJ*, oct. 2023, Consultado: el 16 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unj.edu.pe/jspui/handle/UNJ/579>
- [26] “Resiliencia ecológica: cómo los ecosistemas se adaptan a los cambios”. Consultado: el 16 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.enel.com/es/nuestra-compania/historias/articulos/2023/03/resiliencia-ecologica>
- [27] “Un paseo por la resiliencia - Blog CREAM”. Consultado: el 16 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.cream.cat/es/conocimiento/un-paseo-por-la-resiliencia/>
- [28] “Sobre resiliencia y biodiversidad - Blog CREAM”. Consultado: el 16 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.cream.cat/es/conocimiento/sobre-resiliencia-y-biodiversidad/>