

Dynamics of Vegetation Cover by NDVI in the Condebamba Valley, Cajamarca, 2003 – 2024

Willy O. Barboza-Estela¹ , Verónica J. Rojas-Gonzales¹ , Gladys S. Licapa-Redolfo² , Edilberto Gastolomendo-Malimba¹ 

¹Universidad Privada del Norte, Perú. N00204528@upn.pe, N00231476@upn.pe, N00219829@upn.pe

²Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Abstract – This study aims to evaluate the dynamics of vegetation cover using NDVI in the Condebamba Valley, Cajamarca, between 2003 and 2024. The results record variations in vegetation cover; the maximum NDVI has increased, reflecting improvements in certain areas due to conservation strategies and vegetation regeneration. However, the minimum NDVI has decreased significantly, indicating greater soil degradation due to deforestation, urbanization, illegal mining, and the reduction of water resources as a result of climate change. The average NDVI increased from 0.245 in 2003 to 0.257 in 2024, evidencing vegetation loss. In 2024, the maximum NDVI reached 0.615, and the minimum was recorded in 2014 (-0.131), then decreasing to -0.102 in 2024, reflecting a fragmentation of the natural landscape with slow recovery of vegetation cover. Although some areas show signs of restoration, others continue to deteriorate. Urban expansion, land-use changes, illegal mining in the area, and climate change have all influenced this process. Strengthening conservation and reforestation strategies is recommended to mitigate these effects.

Keywords-NDVI, Remote sensing, Vegetation cover, Degradation.

Dinámica de la Cobertura Vegetal mediante NDVI en el Valle de Condebamba, Cajamarca, 2003 – 2024

Willy O. Barboza-Estela¹ , Verónica J. Rojas-Gonzales¹ , Gladys S. Licapa-Redolfo² , Edilberto Gastolomendo-Malimba¹ 

¹Universidad Privada del Norte, Perú. N00204528@upn.pe, N00231476@upn.pe, N00219829@upn.pe

²Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Resumen – El presente estudio tiene por finalidad evaluar la dinámica de la cobertura vegetal mediante NDVI en el Valle de Condebamba, Cajamarca, entre los años 2003 y 2024. Los resultados registran variaciones en la cobertura vegetal, el NDVI máximo ha aumentado, reflejando mejoras en ciertas áreas debido a estrategias de conservación y regeneración vegetal. Sin embargo, el NDVI mínimo ha disminuido significativamente, indicando una mayor degradación del suelo por deforestación, urbanización, minería ilegal y la reducción de los recursos hídricos a consecuencia del cambio climático. El NDVI promedio pasó de 0.245 en 2003 a 0.257 en 2024, evidenciando pérdida de vegetación. En 2024, el NDVI máximo alcanzó 0.615 y el mínimo se registró en el 2014 (-0,131) para luego descender a -0.102 en el 2024, reflejando una fragmentación del paisaje natural con lenta recuperación de cobertura vegetal. Aunque algunas zonas muestran signos de restauración, otras áreas siguen deteriorándose. La expansión urbana, el cambio en el uso del suelo, la existencia de minería ilegal en la zona y los cambios climáticos han influido en este proceso. Se recomienda fortalecer estrategias de conservación y reforestación para mitigar estos efectos.

Palabras clave-NDVI, Teledetección, Cobertura vegetal, Degradación.

I. INTRODUCCIÓN

La pérdida de la cobertura vegetal es un problema ambiental a nivel mundial, originada por el crecimiento demográfico, la deforestación, la expansión de las actividades mineras y la sequía inducida por el cambio climático. Estos procesos afectan negativamente a la biodiversidad, el ciclo del agua y el equilibrio de los ecosistemas, poniendo en riesgo el equilibrio ecológico del planeta [1]. La expansión demográfica ha elevado la necesidad de terrenos para la agricultura, la urbanización y la infraestructura, lo que ha llevado a la transformación de zonas forestales en áreas de cultivo y asentamientos humanos, este fenómeno ha sido particularmente notorio en zonas tropicales, donde el crecimiento agrícola ha disminuido considerablemente la extensión de bosques [2]. Por otro lado, la tala de árboles continúa siendo una de las mayores amenazas para los ecosistemas terrestres. En 2021 se perdieron 11,1 millones de hectáreas de bosque primario a nivel global, lo que favorece el incremento de las emisiones de carbono y la desaparición de hábitats para especies amenazadas [3]. Igualmente, el cambio climático ha intensificado la disminución de la cobertura vegetal mediante el aumento de las sequías y las olas de calor. Investigaciones actuales han evidenciado que las elevadas temperaturas y la reducción de las lluvias han provocado la desertificación de terrenos y el deterioro de ecosistemas boscosos, especialmente en África y Asia [4].

Actualmente, América Latina se encuentra ante una seria crisis medioambiental a causa de la rápida disminución de la cobertura vegetal, el aumento de la población y la expansión urbana han promovido la transformación de zonas forestales en terrenos de cultivo y áreas de vivienda [2]. Entre 1990 y 2020, América Latina y el Caribe experimentaron una pérdida de cerca de 66 millones de hectáreas de bosques, principalmente a causa de la agricultura intensiva y la urbanización, esta tendencia es más marcada en naciones como Brasil, Argentina y Paraguay [2]. La Amazonía, vista como el corazón del mundo, ha sufrido graves impactos debido a la deforestación ilegal, los incendios de bosques y la transformación de bosques en pastizales. Solo en 2021, más de 13.000 km² de bosque amazónico se perdieron, representando una de las cifras más elevadas en la década reciente [5]. La minería ilegal también ha provocado una devastación en los ecosistemas de los bosques, la obtención de oro, litio y otros minerales ha causado la tala de grandes zonas en naciones como Perú, Bolivia y Venezuela. Por otro lado, América Latina ha sufrido una reducción considerable de las precipitaciones, lo que ha impulsado la desertificación en regiones como el noreste de Brasil y el Gran Chaco en Argentina y Paraguay, la escasez de agua y las elevadas temperaturas han perjudicado la regeneración natural de los ecosistemas de vegetación y han aumentado la regularidad e intensidad de los incendios en las zonas forestales [4].

Perú no es excepción de los impactos antes mencionados, el crecimiento de la población ha sido del 14% en los últimos diez años, lo que ha impulsado la transformación de bosques en áreas de cultivo y áreas urbanizadas [6]. La deforestación es otro de los factores más significativos en la disminución de la cobertura de vegetación en la nación, en 2021, Perú perdió cerca de 200.000 hectáreas de bosques, principalmente por causa de la tala ilegal y la agricultura de migración [7]. Otro elemento crucial en el deterioro de los ecosistemas es la minería ilegal, ya sea legal o no, la explotación minera de oro ha arrasado con vastas áreas de bosques, contaminando tierras y ríos con mercurio. El Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), indica que en Madre de Dios se han arrasado más de 100.000 hectáreas de bosques a causa de la minería ilegal [8]. Así mismo, el cambio climático ha agudizado las sequías en diversas zonas del país, impactando la regeneración natural de los bosques, la sierra y la Amazonía han registrado una reducción del 20% en las precipitaciones en años recientes, lo que ha aumentado la susceptibilidad de los ecosistemas a los incendios forestales y la desertificación [9].

A nivel regional, Cajamarca también es afectada por el crecimiento poblacional, la deforestación, la minería ilegal y las sequías agravadas por el cambio climático. Estos elementos inciden en la pérdida de biodiversidad y en los servicios ecosistémicos fundamentales, tales como la regulación del agua, la calidad del aire y la estabilidad del terreno. La desordenada urbanización y la explotación de recursos naturales es otro de los factores que impulsa la degradación del medio ambiente. Específicamente, la minería ilegal ha provocado la eliminación de extensas zonas verdes, mientras que las sequías restringen la regeneración natural de los ecosistemas [10].

El crecimiento de la minería ilegal en Cajamarca ha provocado conflictos en torno al manejo del suelo y el agua, recursos vitales para la conservación ambiental. La contaminación de fuentes de agua y la reducción del acceso al agua son desafíos constantes que impactan la sostenibilidad de los ecosistemas [11]. En este escenario, la puesta en marcha de estrategias sustentables y la aplicación de tecnologías actuales, como el NDVI, se han convertido en esenciales para fortalecer la resiliencia vegetal [12]. Investigaciones recientes han demostrado que el uso del NDVI en los ecosistemas peruanos permite evaluar la productividad y el impacto del estrés hídrico en regiones como la costa, los valles interandinos y la Amazonía [13].

A nivel local, el Valle de Condebamba ubicado en la provincia de Cajabamba, región Cajamarca se caracteriza por su alta productividad agrícola y la diversificación de cultivos, pero enfrenta desafíos relacionados con la minería ilegal, gestión del agua, la erosión del suelo y el acceso a tecnologías modernas [14]. La implementación del análisis NDVI en esta zona permite evaluar la cobertura vegetal, optimizar el uso del suelo y contribuir a la planificación sostenible. Este estudio busca analizar la dinámica agrícola en el valle a través del NDVI, proporcionando información

clave para la toma de decisiones y la implementación de estrategias que mejoren la productividad y sostenibilidad de la agricultura en la región [15].

Tras el análisis de esta situación, el objetivo de esta investigación es evaluar la dinámica de la cobertura vegetal en el Valle de Condebamba, Cajamarca, mediante el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

II. METODOLOGÍA

A. *Ámbito de estudio*

El Valle de Condebamba está situado en la región de Cajamarca, al norte del Perú, está ubicado en los distritos de Cachachi, Eduardo Villanueva, Condebamba y Cajabamba, pertenecientes a las provincias de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba, en la región de Cajamarca [16]. Este valle se distingue por su topografía privilegiada, con una elevación que varía entre 1.800 y 2.600 metros sobre el nivel del mar, lo que le proporciona un clima cálido y propicio para el crecimiento de distintas especies vegetales. Se encuentra atravesado por la Cordillera Occidental de los Andes, que lo resguarda parcialmente de los vientos fríos, y se irriga por el río Condebamba, un río esencial que provee agua al valle [17]. Sus terrenos aluviales son bastante fértiles, facilitando la producción de una extensa gama de productos agrícolas como la papa, el maíz, el trigo, la alfalfa, las frutas y las legumbres, elementos esenciales para la economía de la zona. Pese a que el río Condebamba es un recurso hídrico relevante, la presión creciente sobre los recursos acuáticos a causa del cambio climático, la expansión agrícola y el aprovechamiento extractivo ha originado dificultades en la disponibilidad y distribución del agua en determinadas épocas del año [18]. El área de estudio abarca una extensión de 8532.88 ha, su delimitación se observa en la Figura 1.

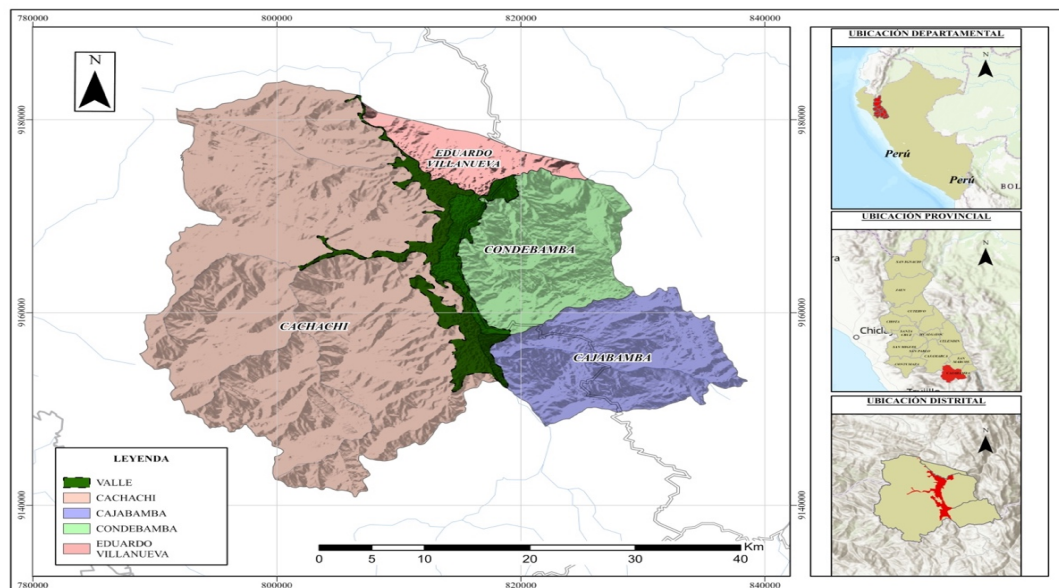


Fig. 1 Delimitación del Valle de Condebamba, Cajabamba – Cajamarca.

B. Selección y procesamiento de datos

Considerando el tipo de investigación, se optó por un método integrado que fusiona técnicas cuantitativas y cualitativas [19], puesto que el estudio fue realizado en base a datos de imágenes satelitales en distintas fechas y analizando la poca presencia de nubes. Para el estudio se eligió seis imágenes representativas, una por cada año de investigación. En este estudio se describe el procedimiento y metodología para calcular el NDVI de la dinámica agrícola del Valle de Condebamba, utilizando imágenes de los satélites LANDSAT 5 y 8, descargadas desde el portal del Servicio Geológico de Estados Unidos USGS [20]. El procedimiento empleado para el estudio del NDVI se realiza de la siguiente manera: Las imágenes satelitales se descargaron del portal EarthExplorer de USGS, seleccionamos la región y la zona de estudio mediante coordenadas geográficas y apoyándonos del área en el mapa interactivo. Luego, elegimos la colección de imágenes LANDSAT correspondiente (LANDSAT 5 TM y LANDSAT 8 OLI/TIRS) Tabla I. Secuencialmente definimos el rango de fechas de adquisición de las imágenes para los años 2003, 2007, 2011, 2014, 2019 y 2024.

Finalmente, se descargó las imágenes en formato GeoTIFF, asegurándose de incluir las bandas necesarias para el cálculo del NDVI. Para mejorar la calidad de los datos el procesamiento de Imágenes se inició convirtiendo los valores de digital number (DN) a reflectancia utilizando la ecuación proporcionada en los metadatos de la imagen, aplicamos correcciones atmosféricas y recortamos la imagen al área de estudio.

TABLA I.
IMÁGENES SATELITALES LANDSAT UTILIZADAS

PATH/ROW	SATÉLITE	SENSOR	AÑOS	ZONA UTM	DATUM
9/65	Landsat 5	*TM	2003	17 S	WGS84
9/65	Landsat 5	*TM	2007	17 S	WGS84
9/65	Landsat 5	*TM	2011	17 S	WGS84
9/65	Landsat 8	**OLI	2014	17 S	WGS84
9/65	Landsat 8	**OLI	2019	17 S	WGS84
9/65	Landsat 8	**OLI	2024	17 S	WGS84

*TM: Thematic Mapper.

**OLI: Operational Land Imager

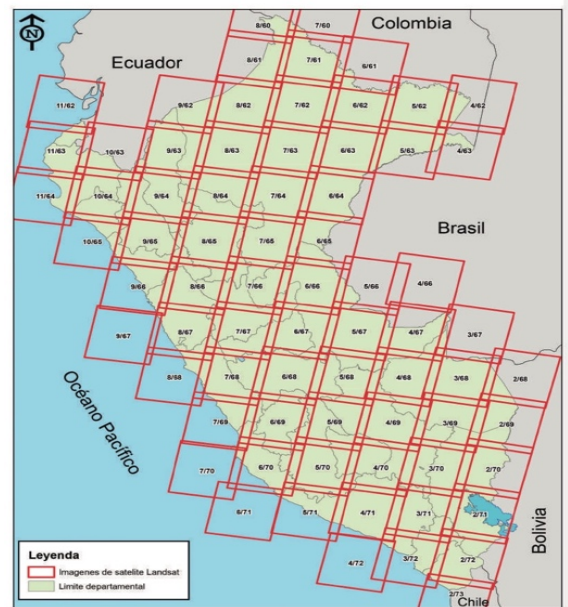


Fig. 2 Mapa de ubicación Path Row de la zona de estudio [21].

C. Metodología del NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es un indicador muy empleado para valorar la salud vegetal a través del tratamiento de imágenes satelitales. El NDVI se determina a partir de las bandas del espectro electromagnético relacionadas con el rojo y el infrarrojo próximo (NIR) [22]. El NDVI se calcula a partir de imágenes de satélite y de acuerdo con la ecuación (1) utilizando software SIG ArcGIS.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots (1)$$

Donde:

NIR: es la reflectancia en el infrarrojo cercano.

RED: es la reflectancia en la banda del rojo.

Las bandas espectrales utilizadas para cada satélite son:

LANDSAT 5 (TM): NIR (Banda 4), Rojo (Banda 3)

LANDSAT 8 (OLI/TIRS): NIR (Banda 5), Rojo (Banda 4)

D. Análisis y validación

Se tomó en cuenta para el análisis e interpretación de los resultados que este índice se distingue por valores que varían entre -1.0 y 1.0, donde los valores negativos están principalmente compuestos por nubes, agua y nieve, mientras que los valores negativos cercanos a cero corresponden principalmente a superficies de roca y suelo desnudo. Los valores de la función NDVI muy bajos (0,1 o menos) se asocian a zonas sin rocas, arena o nieve. Los valores moderados (entre 0,2 y 0,3) simbolizan arbustos y terrenos de cultivo, en cambio, los valores elevados (entre 0,6 y 0,8) señalan bosques tropicales y templados [22].

III. RESULTADOS

A. Dinámica Temporal del NDVI

Es crucial el estudio temporal del NDVI para entender cómo la vegetación ha progresado en respuesta a elementos como sucesos climáticos, contaminación y aumento de la población. El Valle de Condebamba ha experimentado un cambio en los valores máximos y mínimos del NDVI desde 2003 hasta 2024. Basándonos en estos datos, en la Tabla 2, se registra un aumento gradual en el NDVI máximo y mínimo. Los valores NDVI más bajos indican zonas con menor cobertura de vegetación, terrenos expuestos, degradados y ríos. El rango NDVI evalúa la diferencia entre el valor más alto y el más bajo, lo que señala la variabilidad en la cobertura de las plantas. Un rango más elevado indica una mayor diversidad en el paisaje. El valor promedio del NDVI ofrece una perspectiva global sobre la condición de la vegetación en el valle. En 2003, este valor se situaba en 0,245, pero ha experimentado una reducción gradual hasta alcanzar 0,257 en 2024. Esto señala una leve recuperación en la cobertura vegetal media de la zona. La desviación estándar del NDVI máximo (0,043) señala la diversidad en las zonas con mayor vegetación. Un valor bajo indica que el NDVI máximo ha permanecido bastante constante a través del tiempo, presentando fluctuaciones menores en la cobertura más densamente poblada. Por otro lado, el NDVI mínimo (0.050) presenta una desviación estándar superior a la del NDVI máximo, lo que indica variaciones más marcadas en las áreas degradadas. Esto señala que la disminución de la vegetación ha sido más persistente, con periodos de mayor efecto en el medio ambiente.

TABLA II.
RESULTADOS DEL NDVI DEL VALLE DE CONDEBAMBA.

AÑO	NDVI MÁX.	NDVI MÍN.	RANGO	MEDIA DEL NDVI	DES. ESTANDAR NDVI MÁX.	DES. ESTANDAR NDVI MÍN.
2003	0.515	-0.025	0.541	0.245	0.043	0.050
2007	0.487	-0.024	0.511	0.232		
2011	0.522	-0.022	0.543	0.250		
2014	0.543	-0.131	0.674	0.206		
2019	0.543	-0.106	0.650	0.219		
2024	0.615	-0.102	0.717	0.257		

En la Figura 3 se presenta la evolución del NDVI máximo en el Valle de Condebamba desde 2003 hasta 2024. Se nota una tendencia general de aumento, lo que señala un avance gradual de la vegetación en algunas zonas. El NDVI máximo entre 2003 y 2011 se incrementó de 0,515 a 0,615, presentando una reducción en 2007 a (0,487). Entre los años 2011 - 2019 La tendencia ascendente persiste, llegando a 0.543 en 2019. En el año 2024 se registra el valor más elevado de la serie (0.615), lo que podría estar relacionado con programas de conservación, regeneración natural o modificaciones en la utilización del suelo.

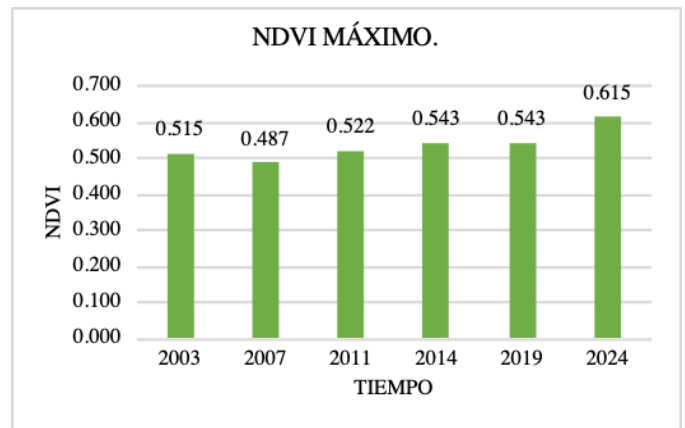


Fig. 3 NDVI máximo en el valle de Condebamba 2003 – 2024.

La Figura 4 del NDVI mínimo en el valle de Condebamba muestra variaciones en la cobertura vegetal a través del tiempo. Durante 2003 al 2011, los valores permanecen estables, lo que señala una vegetación mínima constante y la existencia de cuerpos de agua. Sin embargo, en 2014, se produce un descenso brusco (-0,131), lo que indica una considerable disminución de vegetación a causa de elementos como el desarrollo urbano, la minería ilegal, la modificación en la utilización del suelo y fenómenos climáticos extremos. Desde 2019, se nota una recuperación parcial, con cifras de -0.106 en 2019 y -0.102 en 2024, probablemente a causa de iniciativas de revegetación y modificaciones en las actividades humanas, aunque sin llegar a los niveles de 2014.

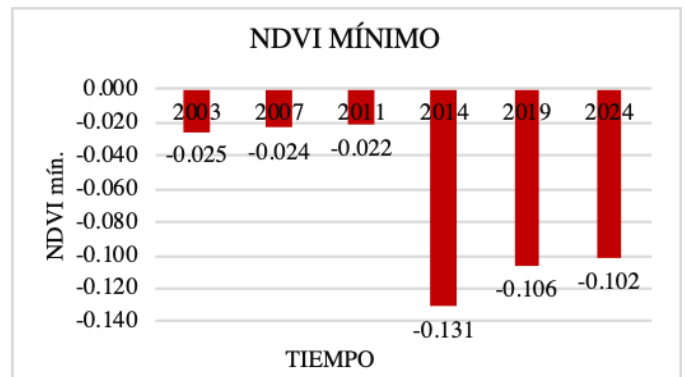


Fig. 4 NDVI mínimo en el valle de Condebamba 2003 – 2024.

La Tabla 3 muestra los resultados del NDVI correspondiente al año 2003, representando la distribución y densidad de la vegetación en el Valle de Condebamba. Entre sus características principales del análisis se obtuvo un Máximo de 0.515, este resultado está asociado a vegetación vigorosa, bosques densos y cultivos bien desarrollados y, un Mínimo de -0.025, resultado que corresponde a áreas con vegetación más dispersa, suelos desnudos, tierras en proceso de degradación y los cuerpos de agua existentes. Las áreas cercanas al cuerpo de agua central muestran un gradiente de

densidad vegetal, probablemente debido a la disponibilidad de agua del río Condebamba. Presenta un rango de 0.541 y un valor promedio de 0.245.

TABLA III.
ANÁLISIS NDVI DEL VALLE DE CONDEBAMBA 2003.

AÑO	NDVI MÁX.	NDVI MÍN.	RANGO	MEDIA DEL NDVI
2003	0.515	-0.025	0.541	0.245

La Tabla 4, presenta los hallazgos de los análisis correspondientes al año 2007 con un intervalo de valores NDVI que varía entre -0.024 y 0.487. Los valores negativos y próximos a 0 señalan zonas con poca o nula vegetación, tales como terrenos desérticos, zonas urbanizadas y cuerpos de agua. Los valores positivos elevados indican zonas con gran densidad de vegetación, tales como bosques, cultivos robustos y zonas con una buena cobertura de vegetación. La densidad de la cobertura vegetal (altos valores de NDVI) se concentra a lo largo del río Condebamba. Esto indica que la presencia de agua es un elemento crucial para la flora en esta zona. En el 2007 se obtuvo un Rango de 0.511 y un promedio de 0.232.

TABLA IV.
ANÁLISIS NDVI DEL VALLE DE CONDEBAMBA 2007.

AÑO	NDVI MÁX.	NDVI MÍN.	RANGO	MEDIA DEL NDVI
2007	0.487	-0.024	0.511	0.232

Los resultados del NDVI en la Tabla 4 muestran la condición y densidad de la vegetación en el Valle de Condebamba durante el año 2011. La escala cromática oscila entre 0,522 y -0,022. El valor positivo indica zonas con vegetación abundante, probablemente bosques o cultivos bien conservados. El valor menor a cero indica la existencia de vegetación menos compacta o en una condición intermedia, como pastizales o cultivos en distintas etapas de desarrollo. Además, en estos valores se agrupan los caminos, ríos y áreas de asentamiento, lo que señala zonas escasas de vegetación o severamente deterioradas. El Rango evaluado fue de 0.543 y una media o promedio de 0.250.

TABLA V.
ANÁLISIS NDVI DEL VALLE DE CONDEBAMBA 2011.

AÑO	NDVI MÁX.	NDVI MÍN.	RANGO	MEDIA DEL NDVI
2011	0.522	-0.022	0.543	0.250

La Tabla 6 presenta los resultados del NDVI en el Valle de Condebamba en el año 2014. El NDVI más alto (0,543) señala la existencia de zonas con gran densidad vegetal, tales como bosques o cultivos en óptimas condiciones. Por otro lado, el NDVI más bajo (-0.131) indica la presencia de áreas deterioradas con una cobertura vegetal limitada o nula, probablemente impactadas por la deforestación o la erosión. La variabilidad del NDVI (0.674) muestra una gran diversidad en la vegetación del valle, con zonas de gran

vegetación en conjunto con áreas de escasa vegetación o en estado de deterioro. Finalmente, la media del NDVI (0.206) señala un nivel general de cobertura vegetal moderado, con áreas intermedias y otras con una densidad vegetal más baja.

TABLA VI.
ANÁLISIS NDVI DEL VALLE DE CONDEBAMBA 2014.

AÑO	NDVI MÁX.	NDVI MÍN.	RANGO	MEDIA DEL NDVI
2014	0.543	-0.131	0.674	0.206

En el año 2019, el Valle de Condebamba registró los valores del NDVI, como se muestra en la Tabla 7. El NDVI más alto (0.543) señala la existencia de zonas con alta cobertura de vegetación, similares a las registradas en 2014, lo que indica una estabilidad en las áreas con mayor cobertura de vegetación. El NDVI más bajo (-0.106) indica una ligera mejoría respecto a 2014, lo que podría estar vinculado con iniciativas de reforestación o regeneración natural. El rango (0.650) muestra una variabilidad en la cobertura de vegetación en el valle, con áreas con alta densidad de vegetación y otras con cobertura reducida. Finalmente, la media del NDVI (0.219) indica un nivel de incremento en la cobertura total de vegetación en relación a 2014, lo que señala condiciones ambientales más propicias o modificaciones en la utilización del suelo.

TABLA VII.
ANÁLISIS NDVI DEL VALLE DE CONDEBAMBA 2019.

AÑO	NDVI MÁX.	NDVI MÍN.	RANGO	MEDIA DEL NDVI
2019	0.543	-0.106	0.650	0.219

La tabla 8 del análisis NDVI de 2024 evidencia una relación diversa entre la cobertura vegetal, de acuerdo con los datos de NDVI. El NDVI más alto llegó a 0.615, lo que indica zonas con vegetación de densidad moderada y saludable. No obstante, el valor NDVI más bajo de -0.102 indica la existencia de áreas sin vegetación, tales como zonas desérticas o urbanizadas. El rango de 0.717 muestra una variación notable en la cobertura de vegetación entre las diferentes áreas del valle, mostrando áreas densamente revestidas y otras con poca o ninguna vegetación. Con un promedio de 0.257, se puede considerar que el nivel de vegetación general es moderado, con zonas más frondosas y otras zonas en etapa de deterioro. A pesar de presentar una reducción de los valores negativos en comparación de años anteriores, todavía no alcanza niveles registrados en el 2014.

TABLA VIII.
ANÁLISIS NDVI DEL VALLE DE CONDEBAMBA 2024.

AÑO	NDVI MÁX.	NDVI MÍN.	RANGO	MEDIA DEL NDVI
2024	0.615	-0.102	0.717	0.257

B. Dispersión del NDVI máximo NDVI mínimo.

La Figura 5 ilustra la variación de los valores máximos del NDVI en el Valle de Condebamba a través del tiempo. Se nota una tendencia ascendente en los valores máximos de NDVI desde cerca del año 2002 hasta 2025. Esto señala un

avance en la vegetación de la zona analizada. Los puntos evidencian una dispersión relativamente reducida alrededor de la línea de tendencia, lo que indica que la variabilidad interanual no es extrema y que la conducta del NDVI más alto sigue un patrón relativamente regular. Si la tendencia persiste, se proyecta un posible incremento de los valores máximos de NDVI en los próximos años, lo que indica un panorama propicio para la vegetación.

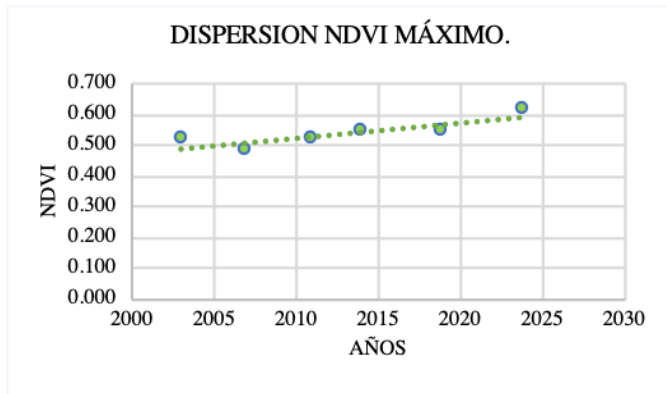


Fig. 5 Dispersión del NDVI máximo en el valle de Condebamba 2003 – 2024.

En la Figura 6 se observa la variabilidad de los valores mínimos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el Valle de Condebamba durante el periodo 2003 - 2024. Basándonos en la tendencia detectada, se evidencia una reducción continua en los valores mínimos del NDVI desde el año 2002 hasta el 2024. Esto señala que las zonas con menor cobertura de vegetación están sufriendo una degradación más intensa con el paso del tiempo. Un NDVI inferior generalmente se asocia con una disminución en la cobertura de vegetación, un incremento en la degradación del suelo o condiciones meteorológicas desfavorables. Esto podría indicar que algunas zonas del Valle de Condebamba están perdiendo vegetación o lidiando con dificultades ambientales. Además, se nota un descenso significativo en los valores más bajos en años recientes, lo que indica que las condiciones adversas están mejorando. Estas variaciones podrían estar vinculadas con modificaciones en la utilización del suelo, crecimiento agrícola, urbanización, minería ilegal o cambios en los patrones climáticos. Si esta tendencia adversa persiste, podría impactar la productividad agrícola y la biodiversidad del valle.

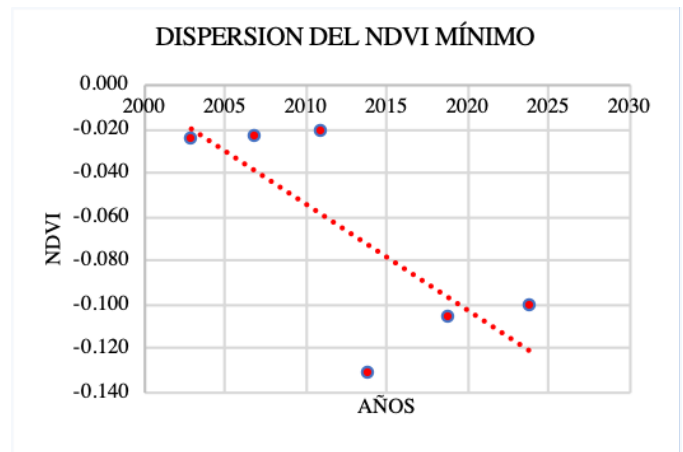


Fig. 6 Dispersión del NDVI mínimo en el valle de Condebamba 2003 – 2024.

El estudio del NDVI en el Valle de Condebamba durante los años 2003 y 2024 muestra variaciones importantes en la cobertura de vegetación Figura 7, mostrando tanto períodos de recuperación de la cobertura vegetal como de deterioro ambiental. Con el paso del tiempo, se nota un aumento gradual en el NDVI máximo, desde 0.515 en 2003 hasta 0.615 en 2024, lo que señala una mejora en algunas zonas del valle, probablemente a causa de estrategias de conservación y modificaciones en la utilización del suelo. No obstante, el NDVI mínimo ha experimentado unas variaciones significativas, llegando a su valor más bajo en 2014 (-0.131), lo que indica un incremento en la degradación del suelo, posiblemente provocada por deforestación, erosión, crecimiento urbano o actividades de agricultura y minería ilegal intensiva. El progreso del índice indica que en 2003 al 2011 la vegetación estaba moderada, presentando valores bastante equilibrados. Se observa una ligera disminución del NDVI mínimo en 2019 y 2024 esta recuperación en la cobertura vegetal podría estar vinculado con iniciativas de reforestación o condiciones meteorológicas propicias. A pesar de que el NDVI máximo sigue en aumento, el NDVI mínimo aún no recupera su normalidad del 2003.

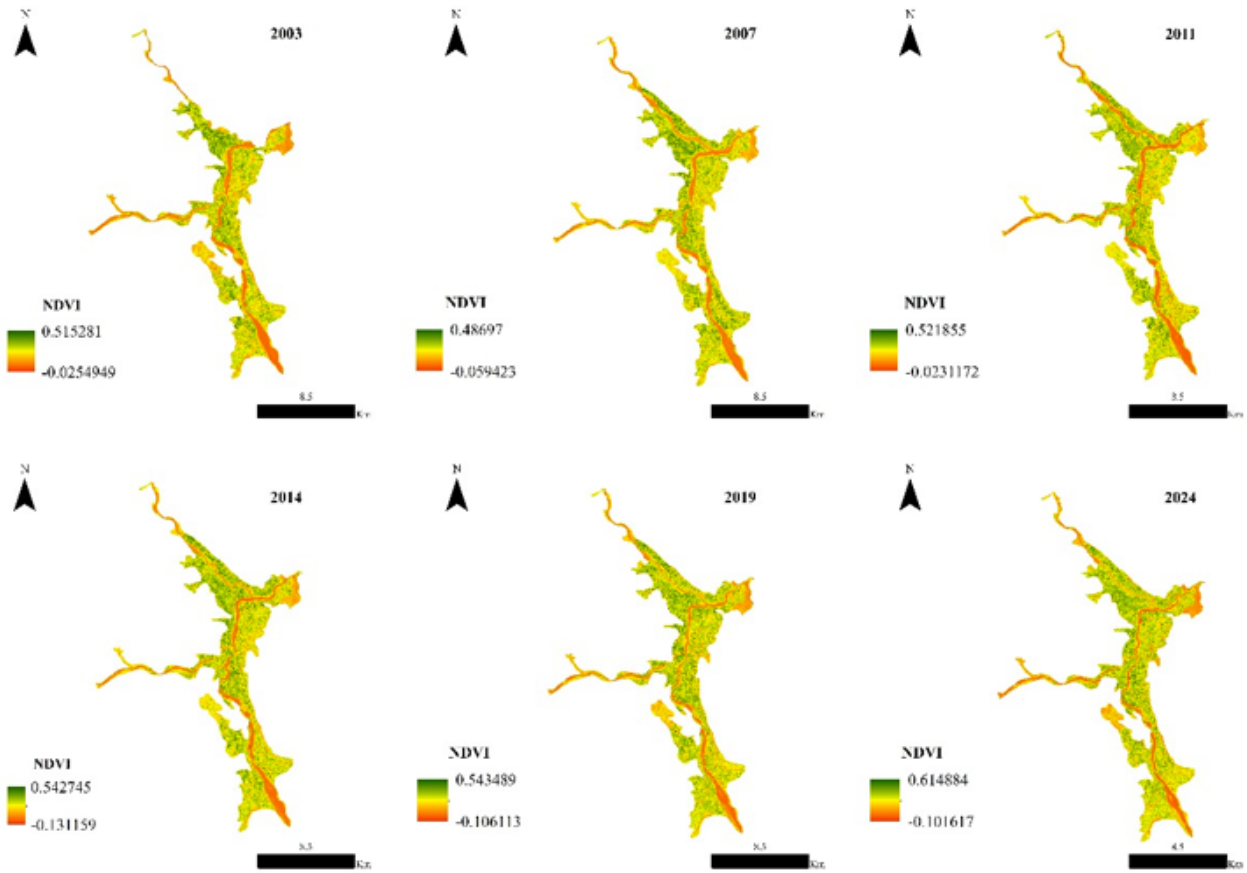


Fig. 7 Resultados del NDVI del Valle de Condebamba 2003 – 2024.

IV. DISCUSIÓN

El estudio del NDVI en el Valle de Condebamba durante los años 2003 y 2024 muestra una tendencia dual en la cobertura de plantas. Aunque los valores más altos del NDVI han demostrado un aumento gradual, los valores más bajos han experimentado una reducción significativa, lo que señala un proceso de fragmentación del paisaje. Estas modificaciones pueden estar vinculadas a elementos como la deforestación, el crecimiento urbano y las actividades agropecuarias y mineras, factores que han sido reconocidos en investigaciones anteriores como factores cruciales en el deterioro ambiental[23].

El incremento del NDVI máximo indica la existencia de áreas con una regeneración vegetal o la puesta en marcha de tácticas de conservación Figura 8. Este fenómeno podría deberse a acciones de reforestación, restauración de terrenos degradados y modificaciones en la utilización de la tierra, tal como se ha registrado en estudios sobre la restauración de ecosistemas impactados por presiones humanas[15]. Sin embargo, el deterioro gradual reflejado en el NDVI mínimo

señala que, a pesar de los intentos de recuperación, aún existen procesos de degradación ambiental en algunas zonas del valle. Se ha identificado la expansión urbana y la intensificación de la agricultura como las principales razones de la pérdida de vegetación en varios ecosistemas.



Fig. 8 Regeneración vegetal y la puesta en marcha de tácticas de conservación [24].

El río Condebamba, que discurre por el próspero valle agrícola de Condebamba, juega un papel fundamental en los

elevados valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Su suministro de agua es esencial para el crecimiento y la productividad de las zonas de cultivo, que florecen debido a su caudal. En el área, son evidentes los terrenos de cultivo, asociados con zonas de flora natural, mientras que en el horizonte se elevan imponentes montañas. La existencia de este río no solo respalda el trabajo agrícola, sino que también aporta de manera considerable a la salud y vitalidad de la vegetación en el valle Figura 9.



Fig. 9 Río Condebamba, fuente de agua para el valle.

La variabilidad del NDVI, manifestada en el incremento del intervalo entre los valores máximos y mínimos señala una creciente diversidad en la cobertura de vegetación del Valle de Condebamba. Este modelo se ajusta a la fragmentación del paisaje provocada por las acciones humanas y la variación en la utilización del suelo Figura 10. La desviación estándar del NDVI mínimo, superior a la del NDVI máximo, indica que las zonas degradadas han experimentado una mayor inestabilidad a través del tiempo, probablemente a causa de episodios de sequías, incendios forestales, técnicas inadecuadas de tala, cambios de uso de suelo en la siembra de productos alternos en el Valle de Condebamba.



Fig. 10 Cambio de uso de suelo para siembra de productos alternos en el valle de Condebamba [25]

El valor del NDVI mínimo se registró en 2024 (-0.304), lo que evidencia un aumento considerable de zonas diseñadas para la expansión urbana (Figura 11). La fotografía representa un área semiurbana en el valle de Condebamba, en la que conviven edificaciones, hoteles campestres, vías de

acceso a restaurantes turísticos, grifos y amaneces de la mina con zonas de cultivo. Por otro lado, en los alrededores de la zona urbanizada, predominan amplias zonas de cultivo y vegetación natural, lo que refleja la actividad agrícola en el valle. Las áreas agrícolas representan valores altos en el NDVI, en cambio, las zonas urbanizadas representan valores negativos o bajos a causa de la reducción de la cobertura de vegetación y el aumento de superficies artificiales, como el hormigón y asfalto.



Fig. 11 Urbanización en el valle de Condebamba [26].

V. CONCLUSIONES

Los datos del NDVI en el Valle de Condebamba demuestran una dinámica contradictoria: mientras que el NDVI máximo ha demostrado una tendencia ascendente durante el período estudiado (2003-2024), el NDVI mínimo ha experimentado una reducción significativa. Esto indica que, a pesar de que hay zonas que han experimentado una regeneración y consolidación vegetal, otras han sufrido un descenso considerable a causa de elementos como el crecimiento urbano, la deforestación, la erosión del suelo, las sequías y la minería ilegal.

La degradación del medio ambiente en algunas áreas del valle está fuertemente relacionada con la intensificación de las actividades humanas, tales como la agricultura, la minería ilegal y el desarrollo urbano. Específicamente, la disminución significativa del NDVI mínimo en 2024 (-0.304) señala un incremento en las zonas sin vegetación, lo que podría ocasionar problemas adicionales como la disminución de la biodiversidad y el avance de procesos de erosión.

El progreso del NDVI pone de relieve la importancia de implementar estrategias de preservación y recuperación ecológica en el Valle Condebamba. El aumento del NDVI máximo indica que ciertas acciones de gestión ambiental podrían estar generando un efecto beneficioso en la regeneración de las plantas. No obstante, la caída en el NDVI mínimo resalta la necesidad de fortalecer las políticas de aprovechamiento sostenible del suelo, reforestación y regulación de actividades de extracción para asegurar la estabilidad ecológica del valle a largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] CEPLAN, «Observatorio Nacional de Prospectiva». Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://observatorio.ceplan.gob.pe>
- [2] FAO, «El estado de los bosques del mundo 2022». Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/cb9360es/online/cb9360es.html>
- [3] M. WEISSE, GOLDMAN Y CARTER LIZ Y. SARAH, «Empeoró La Pérdida De Bosques Tropicales Primarios en 2022 | GFW Blog», Global Forest Watch Content. Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.globalforestwatch.org/blog/es/forest-insights/empeoro-la-perdida-de-bosques-tropicales-primarios-en-2022>
- [4] K. Calvin *et al.*, «IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.», Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), jul. 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [5] INPE, «PRODES - Taxa consolidada de desmatamento na Amazônia em 2022/2023 é de 9.064 km²», Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/taxa-consolidada-de-desmatamento-na-amazonia-em-2022-2023-e-de-9-064-km2>
- [6] INEI, «Perú: Estado de la población en el año del Bicentenario, 2021», 2021.
- [7] MINAM, «Reporte Cobertura y Pérdida de Bosque Húmedo Amazónico 2021.pdf». Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/descargas_geobosque/perdida/documentos/Reporte_Cobertura_y_Perdida_de_Bosque_Humedo_Amazonico_2021.pdf
- [8] CENTRO DE INNOVACIÓN CIENTÍFICA AMAZÓNICA, «IMPACTOS AMBIENTALES PREVISTOS ACTIVIDAD MINERA ILEGAL EN CUERPOS DE AGUA DE LA AMAZONÍA PERUANA.pdf». Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://cincia.wfu.edu/wp-content/uploads/2022.03.14_-DSC-1_IMPACTOS-AMBIENTALES-PREVISTOS-ACTIVIDAD-MINERA-ILEGAL-EN-CUERPOS-DE-AGUA-DE-LA-AMAZONIA-C3%8DA-PERUANA.pdf
- [9] MINAM, «INFORME TÉCNICO SEQUIAS.pdf». Accedido: 8 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4516275/INFORME%20T%C3%89CNICO%20SEQUIAS.pdf>
- [10] PUCP, «Atlas de Cajamarca - Principales cultivos». Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.atlascajamarca.pe/provincial/cajamarca/llacanora/index8e79.html>
- [11] SIAR CAJAMARCA, «libro_renama_2019_-2022.pdf». Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://siar.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/libro_renama_2019_-2022.pdf
- [12] PERUMIN, «Cajamarca: 92% de la agricultura es de subsistencia y no tiene acceso a financiamiento ni tecnología - PERUMIN». Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://perumin.com/perumin35/public/es/noticia/cajamarca-92-de-la-agricultura-es-de-subsistencia-y-no-tiene-acceso-a-financiamiento-ni-tecnologia>
- [13] G. D. P. Torriani, «Estudio prospectivo sobre el estrés hídrico y la inseguridad alimentaria en el Perú».
- [14] Gobierno Regional Cajamarca, «ESTUDIO DE SUELOS Y CAPACIDAD DE USO MAYOR DEL DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA».
- [15] R. Roque, «NDVI trend in the Angostura Faical Regional Conservation Area of Tumbes, Peru, 1999-2019», *Manglar*, vol. 19, n.º 3, pp. 233-237, sep. 2022, doi: 10.17268/manglar.2022.029.
- [16] A. C. Carpio, J. C. Arrunátegui, S. Castro y R. Zevallos, «El Valle de Condebamba en Cajamarca: situación, desafíos y perspectivas», CISEPA | Centro de Investigaciones Sociológicas, Económicas, Políticas y Antropológicas – Pontificia Universidad Católica del Perú. Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cisepa.pucp.edu.pe/publicaciones/libros/el-valle-de-condebamba-en-cajamarca-situacion-desafios-y-perspectivas/>
- [17] P. Paredes Diez Canseco, «UN VALLE Y DOS MINERAS | Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina». Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ocmal.org/3853/>
- [18] ANA, «Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Crisnejas.pdf». Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/38/ANA000047_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [19] E. Gastolomendo Malimba, H. Diaz Rimarachin, y G. S. Licapa-Redolfo, «Reconstructing Ecosystems: Analysis of the Recolonization of Flora After the 2022 Fires in Pampa Caballero, Granja Porcon, Cajamarca», en *Proceedings of the 4th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2024): «Creating solutions for a sustainable future: technology-based entrepreneurship»*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024. doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.736.
- [20] USGS, «Explorador de la Tierra». Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [21] POF TARAPACÁ ARICA, «CAPÍTULO I - CARACTERIZACIÓN GENERAL.pdf». Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://visionamazonia.minambiente.gov.co/content/uploads/2023/08/POF_TARAPACA_ARICA.pdf
- [22] EOS DATA ANALYTICS, «NDVI: Fórmula Y Uso Del Índice De Vegetación Na Agricultura». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>
- [23] D. J. Rodríguez Mauricio, «Análisis temporal del NDVI del humedal de Purumpampa en Huamachuco y su relación con la expansión urbana», *Rev. Geográfica América Cent.*, vol. 1, n.º 70, pp. 429-448, nov. 2022, doi: 10.15359/rgac.70-1.16.
- [24] Wikiloc, «De Cajamarca al Valle de Condebamba por todo lo alto!!», Wikiloc | Rutas del Mundo. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gl.wikiloc.com/rutas-bicicleta-de-montana/de-cajamarca-al-valle-de-condebamba-por-todo-lo-alto-48011411>
- [25] AGROPERU, «Cajamarca: Pan American Silver Shahuindo promueve proyecto de palta en el Valle de Condebamba», AGROPERU Informa. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.agroperu.pe/cajamarca-pan-american-silver-shahuindo-promueve-proyecto-de-palta-en-el-valle-de-condebamba/>
- [26] T. de la Cruz, «Malcas - Condebamba». Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.asiescajabamba.com/2023/11/malcas-condebamba.html>