

Changes in vegetation cover and water bodies due to artisanal mining in the Huancaray micro-watershed, Andahuaylas, Peru (2006–2024)

Aroni Arenas, Edilson¹ ; Roca Quicaño, Victor Sebastian² ; Llanto Verde, Julian³  y Arrascue Lino, Anita⁴ 

^{1,2,4} Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas

³ Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial, Perú

u20211C443@upc.edu.pe¹, u202116847@upc.edu.pe², jllanto@conida.gob.pe³, anita.arrascue@upc.pe⁴

Abstract– The expansion of artisanal and small-scale mining (ASGM) constitutes a growing pressure on fragile headwater ecosystems, as it causes alterations in land cover linked to water regulation and the provision of ecosystem services. In this context, the present study evaluated changes in vegetation cover and water bodies associated with the advance of ASGM in the headwaters of the Huancaray micro-watershed, located in Andahuaylas, Peru, during the period 2006–2024. For this purpose, a multitemporal analysis was conducted using Landsat and Sentinel satellite imagery, applying spectral indices (NDVI, MNDWI, NDBI, and NDSI) integrated into a supervised classification using the Support Vector Machine (SVM) algorithm. Model validation showed Kappa index values between 0.73 and 0.88, indicating good to very good agreement. The results show a sustained expansion of areas disturbed by ASGM, accompanied by a progressive reduction in vegetation cover and water bodies. Likewise, linear regression analysis indicated that mining expansion explains 75.3% of the observed variability in vegetation cover loss and 80.3% of the variability in the reduction of water bodies. These findings demonstrate a significant association between ASGM growth and the transformation of the high-Andean landscape and provide a replicable methodology for environmental monitoring in highly vulnerable areas, with implications for land-use planning, mining enforcement, and the conservation of strategic ecosystems.

Keywords– remote sensing, water bodies, vegetation cover, spectral indices, artisanal mining.

Cambios en la cobertura vegetal y cuerpos de agua por minería artesanal en la microcuenca Huancaray, Andahuaylas, Perú (2006–2024)

Aroni Arenas, Edilson¹ ; Roca Quicaño, Victor Sebastian² ; Llanto Verde, Julian³  y Arrascue Lino, Anita⁴ 

^{1,2,4} Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas

³ Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial, Perú

u20211C443@upc.edu.pe¹, u202116847@upc.edu.pe², jllanto@conida.gob.pe³, anita.arrascue@upc.pe⁴

Resumen— La expansión de la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) constituye una presión creciente sobre los ecosistemas frágiles de cabecera de cuenca, al generar alteraciones en la cobertura terrestre vinculada a la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos. En este contexto, el presente estudio evaluó los cambios en la cobertura vegetal y los cuerpos de agua asociados al avance de la MAPE en la cabecera de la microcuenca de Huancaray, ubicada en Andahuaylas, Perú, durante el periodo 2006–2024. Para ello, se desarrolló un análisis multitemporal mediante imágenes satelitales Landsat y Sentinel, empleando índices espectrales (NDVI, MNDWI, NDBI y NDSI) integrados en una clasificación supervisada con el algoritmo Support Vector Machine (SVM). La validación del modelo presentó valores del índice Kappa entre 0.73 y 0.88, evidenciando una concordancia de buena a muy buena. Los resultados muestran una expansión sostenida de las áreas intervenidas por la MAPE, acompañada de una reducción progresiva de la cobertura vegetal y de los cuerpos de agua. Asimismo, el análisis de regresión lineal indicó que la expansión minera explica el 75.3 % de la variabilidad observada en la pérdida de cobertura vegetal y el 80.3 % de la variabilidad en la disminución de los cuerpos de agua. Estos hallazgos evidencian una asociación significativa entre el crecimiento de la MAPE y la transformación del paisaje altoandino, y aportan una metodología replicable para el monitoreo ambiental en zonas de alta vulnerabilidad, con implicancias para el ordenamiento territorial, la fiscalización minera y la conservación de ecosistemas estratégicos.

Palabras clave— teledetección, cuerpos de agua, cobertura vegetal, índices espectrales, minería artesanal.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, entre 300 000 y 500 000 personas dependen de la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE); sin embargo, se estima que solo el 22 % ha logrado formalizarse, lo que evidencia la persistencia de altos niveles de informalidad y la limitada efectividad de los mecanismos de control de esta actividad económica [1]. Esta problemática ha incrementado la presión sobre los recursos hídricos altoandinos, donde aproximadamente el 70 % de las fuentes superficiales monitoreadas superan los límites permisibles de metales pesados [2]. Asimismo, más del 80 % de los proyectos mineros del país se concentra en zonas altoandinas, afectando cabeceras de cuenca y ecosistemas altamente sensibles [3].

La microcuenca de Huancaray, ubicada en la provincia de Andahuaylas, región Apurímac, constituye un territorio estratégico por su función como cabecera de cuenca y su importancia para la regulación hídrica y el desarrollo de la

actividad agrícola local. Desde finales de 2006, la cabecera de esta microcuenca registra una expansión progresiva de la minería artesanal e informal, impulsada por el incremento de los precios de los minerales, el ingreso de mineros externos y plantas procesadoras con permisos comunales, el retorno de población migrante y la limitada capacidad de fiscalización del Estado [4], [5]. Informes técnicos reportan la remoción de cobertura vegetal nativa, la afectación de cuerpos de agua y la presencia de captaciones hídricas no autorizadas de las mineras, refleja una creciente presión ambiental sobre los ecosistemas altoandinos de la zona [6], [7].

Estudios previos en la microcuenca identifican a la expansión de la minería y la actividad agrícola como factores principales de la pérdida de cobertura vegetal nativa, que influencia en la degradación del suelo [8]. A escala regional, análisis basados en teledetección evidencian pérdidas de cobertura natural y una expansión progresiva de áreas mineras, asociadas a la presión hídrica y al cambio climático en ecosistemas altoandinos [9].

Diversos estudios desarrollados en cabeceras de cuenca altoandinas del Perú y otros países andinos han evidenciado que la expansión de la minería artesanal e informal genera alteraciones en la cobertura vegetal, la morfología del terreno y la dinámica de los cuerpos de agua superficiales, comprometiendo funciones ecosistémicas clave como la regulación hídrica y la provisión de servicios ambientales [10], [11]. En este contexto, el uso de técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) se ha consolidado como una herramienta versátil para el análisis multitemporal de cambios en la cobertura terrestre, permitiendo identificar procesos de deforestación, degradación vegetal y modificaciones en superficies hídricas mediante el uso de imágenes satelitales con índices espectrales como el NDVI y el MNDWI [12], [13].

No obstante, la mayoría de las investigaciones disponibles se ha centrado en la delimitación de áreas mineras o en el análisis aislado de la cobertura vegetal, sin integrar de manera conjunta la detección de la huella minera con los cambios en los cuerpos de agua y la vegetación en cabeceras de cuenca afectadas por minería artesanal de pequeña escala [14], [15]. Esta limitación resulta crítica en territorios como la microcuenca de Huancaray, donde la presión minera se

superpone a ecosistemas frágiles y en zonas estratégicas para la regulación hídrica local.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar los cambios en los cuerpos de agua y la cobertura vegetal asociados a la minería artesanal en la cabecera de la microcuenca de Huancaray, Andahuaylas, durante el periodo 2006–2024, mediante un análisis multitemporal basado en técnicas de teledetección. Los resultados buscan aportar evidencia técnica que contribuya al monitoreo ambiental, al ordenamiento territorial y a la formulación de estrategias orientadas a la gestión sostenible en ecosistemas altoandinos vulnerables.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la cabecera de la microcuenca de Huancaray, ubicada en el distrito de Jose María Arguedas, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac, Perú. La microcuenca presenta una superficie aproximada de 147 866 ha. y forma parte del sistema hidrográfico de la cuenca del río Pampas, constituyendo un área estratégica para la regulación hídrica a escala local y regional. La cabecera de la microcuenca se caracteriza por un rango altitudinal aproximado entre los 4000 y 4283 m.s.n.m., y alberga ecosistemas altoandinos como pajonales, bofedales y cuerpos de agua superficiales, los cuales presentan una alta sensibilidad frente a la intervención de la minería artesanal e informal (Fig.1).

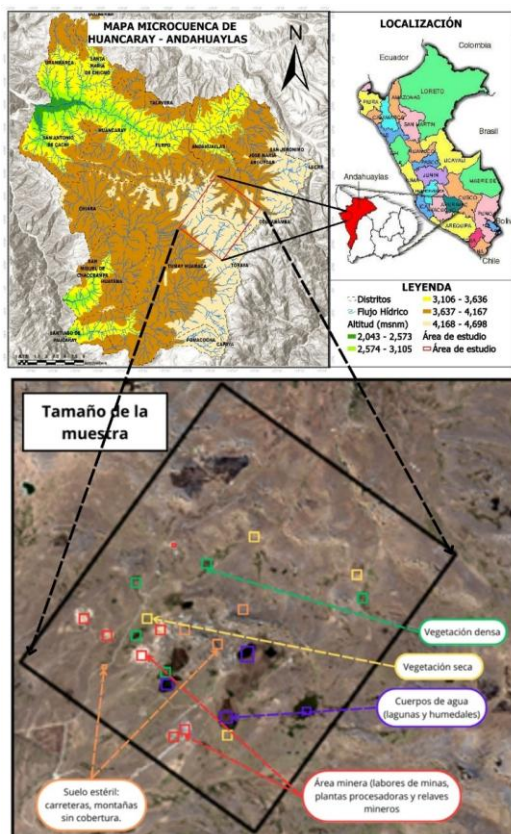


Fig. 1 Cabecera de microcuenca de Huancaray

El área de estudio se localiza en el sistema de coordenadas UTM, zona 18 Sur, bajo el WGS 84, con puntos representativos cercanos a los 671 134 m E y 8 461 917 m N, correspondientes a la cabecera de la microcuenca de Huancaray. Desde el punto de vista hidrológico, la microcuenca se encuentra delimitada aguas arriba por divisorias naturales de aguas altoandinas, que separan su drenaje de microcuencas adyacentes pertenecientes a la cuenca del río Pampas. Aguas abajo, la microcuenca se conecta con sus sectores medios, donde predominan actividades agropecuarias y asentamientos rurales, lo que incrementa progresivamente la demanda hídrica.

La unidad espacial de análisis comprende sectores con remoción de cobertura vegetal y alteraciones hídricas identificables en imágenes satelitales, asociadas a actividades extractivas y a la presencia de plantas procesadoras de mineral [12]. La delimitación del área se realizó priorizando zonas con evidencia de impacto comprobado, excluyendo áreas agrícolas y urbanizadas, con el fin de focalizar el análisis en los cambios vinculados a la actividad minera artesanal. Para el análisis multitemporal se utilizó una imagen satelital por año correspondiente al periodo 2006–2024, priorizando imágenes durante la estación seca y bajo condiciones de baja nubosidad, con el objetivo de asegurar consistencia espectral y precisión en la detección de variaciones paisajísticas [12]

III. MÉTODOS

A. Procesamiento de imágenes satelitales e índices espectrales

Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 TM (2006–2011), Landsat 8 OLI y Landsat 9 OLI-2 (2013–2024), así como Sentinel-2 MSI (2016–2024), con el propósito de asegurar la consistencia espacial y temporal del análisis. Las imágenes Landsat correspondieron a productos Level-2 (reflectancia de superficie), mientras que las imágenes Sentinel-2 fueron productos Level-2A, los cuales incluyen corrección atmosférica previa, permitiendo su uso directo en análisis multitemporal [16], [17].

Para cada año del periodo de estudio se seleccionó al menos una imagen representativa priorizando escenas adquiridas durante el mes de julio correspondiente al a estación seca de la región andina, debido a que este periodo presenta menor cobertura nubosa, por lo tanto, menor interferencia atmosférica y menor variabilidad de la vegetación. Este criterio permitió mejorar la comparabilidad espectral entre los años analizado y reducir posibles sesgos asociados a cambios estacionales en la respuesta de las coberturas terrestres [11], [12].

Posteriormente, se seleccionaron las bandas espectrales Green, Red, NIR y SWIR, las cuales fueron empleadas para la generación de los índices espectrales NDVI (vegetación), NDSI (suelo desnudo), NDBI (superficies construidas y suelo expuesto) y MNDWI (cuerpos de agua), utilizando la herramienta *Raster Calculator* [16].

En conjunto, estos índices permitieron identificar patrones en el terreno asociados indirectamente a la MAPE, la cual se

manifiesta principalmente mediante procesos de remoción de cobertura vegetal, exposición de suelo y alteraciones en los de cuerpos de agua [11], [12].

Los índices espectrales fueron utilizados como variables de entrada en la Clasificación Supervisada mediante el algoritmo *Support Vector Machine* (SVM), ampliamente empleado en estudios de teledetección debido a su alta capacidad de generalización y su eficacia en la clasificación de datos espectrales multidimensionales [14], [15]. Este algoritmo fue seleccionado por su capacidad para maximizar la separación entre clases mediante patrones espaciales, reduciendo errores de clasificación en coberturas con firmas espectrales similares.

B. Validación de clasificación

La validación estadística de la clasificación se realizó mediante una matriz de confusión, la cual compara las clases asignadas por el modelo con datos de referencia obtenidos a partir de la interpretación visual de imágenes en alta resolución y punto de control aleatorios en el área de estudio, permitiendo evaluar el desempeño del clasificador a través de medidas de exactitud como la precisión global y la exactitud por clase [16], [17]. Este procedimiento es ampliamente utilizado en estudios de clasificación de coberturas terrestres y análisis de imágenes satelitales.

Para el proceso de clasificación supervisada se utilizaron cinco polígonos de entrenamiento por cada clase de cobertura analizada, los cuales fueron delimitados manualmente sobre las imágenes satelitales con el fin de representar adecuadamente la variabilidad espectral presente en el área de estudio y mejorar el control del procesamiento de clasificación.

La validación se realizó mediante puntos de control independientes distribuidos aleatoriamente en el área de estudio, permitiendo contrastar los resultados de la clasificación con información de referencia obtenida por interpretación visual. Asimismo, se calcularon los errores de comisión y omisión para cada clase, con el propósito de evaluar posibles sobreestimaciones o subestimaciones en la asignación de coberturas y fortalecer la consistencia estadística del modelo de clasificación.

Adicionalmente, se calculó el coeficiente Kappa como estadístico de concordancia, con el fin de cuantificar el grado de acuerdo entre la clasificación obtenida y los datos de referencia, corrigiendo el efecto del acuerdo esperado por azar. Este indicador permite una evaluación más robusta de la confiabilidad del modelo de clasificación y ha sido ampliamente empleado en aplicaciones de teledetección y análisis espacial [15].

No obstante, es importante considerar que la validación se basa principalmente en datos derivados de interpretación remota, lo cual puede introducir incertidumbre debido a la resolución espacial de las imágenes, la presencia de nubosidad residual y la similitud espectral entre ciertas coberturas, especialmente en ecosistemas altoandinos con alta heterogeneidad.

C. Cálculo de hectáreas de MAPE, cuerpos de agua y cobertura vegetal

Una vez validados los resultados de clasificación, las imágenes ráster fueron convertidas a formato vectorial mediante la herramienta *Raster to Polygon* de ArcGIS Pro, con el fin de cuantificar en hectáreas la extensión de los cuerpos de agua, la cobertura vegetal y las áreas asociadas a la actividad de la MAPE. Este análisis se realizó para cada año del periodo de estudio comprendido entre 2006 y 2024[13].

Previo al análisis de la relación entre la expansión de la MAPE y las variaciones de la cobertura vegetal y los cuerpos de agua, se evaluó la distribución de las variables mediante la prueba de Shapiro–Wilk, considerando el tamaño muestral reducido ($n < 50$). En función de los resultados obtenidos, se determinó la aplicación de pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas para el análisis de asociación y regresión. Para los casos en que se verificó el cumplimiento de los supuestos estadísticos, se aplicó un modelo de regresión lineal simple, estableciendo un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

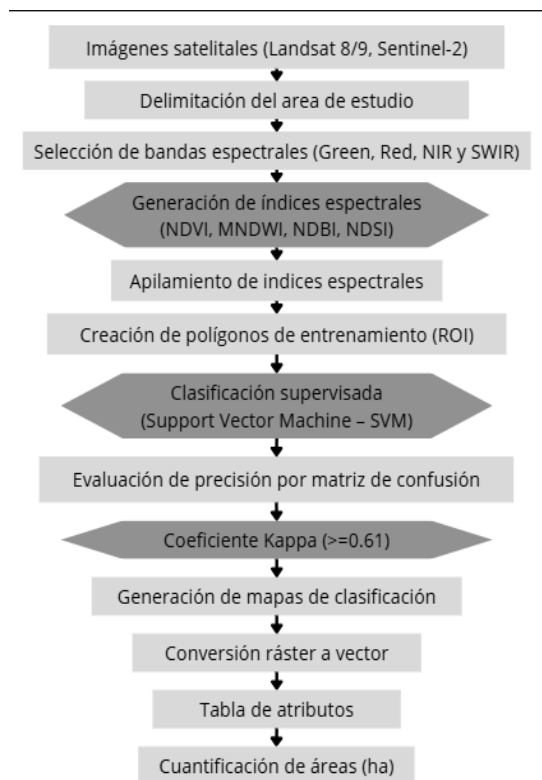


Fig. 2 Etapas de procesamiento de imágenes.

Asimismo, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson para estimar el grado de asociación entre el área impactada por la MAPE y las variaciones observadas en la cobertura vegetal y los cuerpos de agua [15]. Este análisis permitió cuantificar la intensidad y dirección de las relaciones espaciales y temporales asociadas a la transformación del paisaje altoandino vinculada a la actividad minera.

IV. RESULTADOS

El análisis multitemporal permitió generar mapas de clasificación anual para el periodo 2006–2024 en el área de estudio correspondiente a la cabecera de la microcuenca de Huancaray (Fig. 4). La validación de la clasificación mostró valores del coeficiente Kappa comprendidos entre 0.73 y 0.88 (Fig. 3), lo que indica una concordancia de buena a muy buena y respalda la confiabilidad de las estimaciones de áreas de MAPE, cuerpos de agua y cobertura vegetal.

El análisis consideró 11 imágenes Landsat para el periodo 2006–2016 y 9 imágenes Sentinel-2 para el periodo 2016–2024, permitiendo una evaluación multitemporal continua de las variaciones de cobertura en el área de estudio. Asimismo, la clasificación supervisada mediante SVM mostró una adecuada separación espectral entre clases a partir del apilamiento de índices espectrales, obteniéndose resultados consistentes en la delimitación de áreas de MAPE, cobertura vegetal y cuerpos de agua.

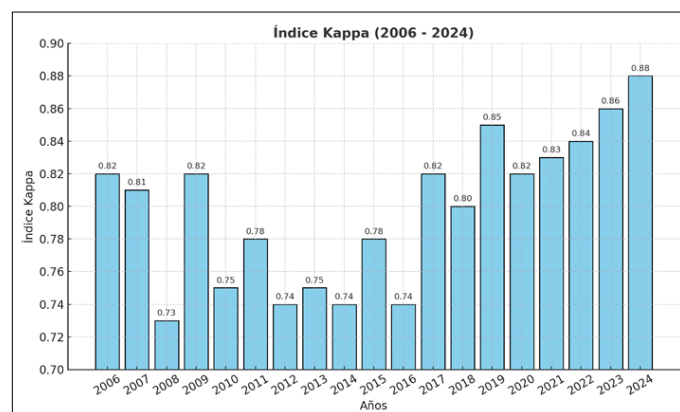


Fig. 3 Valores de índice kappa desde 2006 – 2024

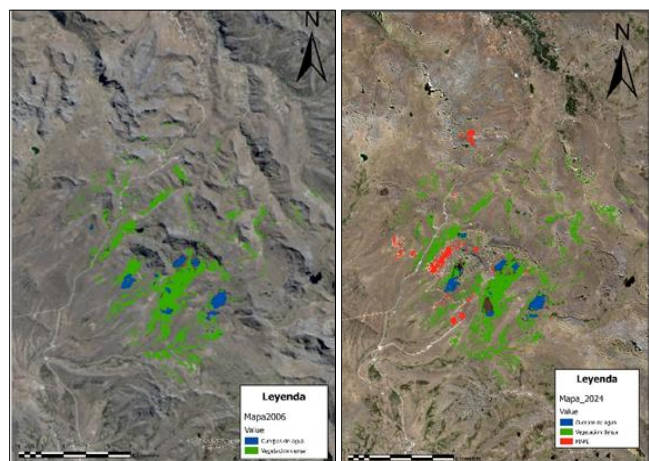


Fig. 4 Mapas de variación de cabecera de la microcuenca de Huancaray del 2006 y 2024

Los resultados evidencian una expansión progresiva de las áreas clasificadas como MAPE a lo largo del periodo de análisis. En el año 2006 no se identificaron superficies con actividad minera dentro del área de estudio; sin embargo, esta se inició en 2007 y mostró un crecimiento progresivo, intensificándose a partir del 2016 y alcanzando su máximo extensión en 2024 con un total de 149 ha intervenidas (Fig 5).

En contraste, los cuerpos de agua superficiales mostraron una tendencia decreciente moderada durante el periodo de estudio. La superficie hídrica se redujo de 115.76 ha en 2006 a 109.8 ha en 2024, lo que representa una pérdida total de 5.96 ha, equivalente a una reducción del 5.15 % respecto al valor inicial. De manera similar, la cobertura vegetal disminuyó de 1412.8 ha en 2006 a 1095.7 ha en 2024, con una pérdida acumulada de 317.1 ha, correspondiente a una reducción del 22.4 % asociados a la intervención antrópica (Fig 5).

El análisis descriptivo evidenció que los cuerpos de agua presentaron un promedio de 112.75 ± 1.77 ha durante el periodo evaluado, mientras que la cobertura vegetal registró un promedio de 1262.8 ± 105.4 ha. Por su parte, las áreas asociadas a la MAPE alcanzaron un promedio de 71.7 ± 45.7 ha, reflejando una mayor variabilidad temporal relacionada con la expansión progresiva de la actividad minera.

En conjunto, la variación temporal de las variables analizadas evidencia una relación inversa entre la expansión de las áreas asociadas a la MAPE y la reducción de los cuerpos de agua y la cobertura vegetal, reflejando una transformación progresiva del paisaje en la microcuenca de Huancaray (Fig 5).

Previo al análisis de asociación, la prueba de Shapiro–Wilk indicó que las variables analizadas no rechazaron la hipótesis nula ($p > 0.05$), por lo que se procedió con la aplicación de pruebas estadísticas paramétricas. En este contexto, el análisis de regresión lineal mostró una relación inversa significativa entre la expansión de la MAPE y la disminución tanto de los cuerpos de agua como de la cobertura vegetal en la microcuenca de Huancaray (Figs. 6 y 7).

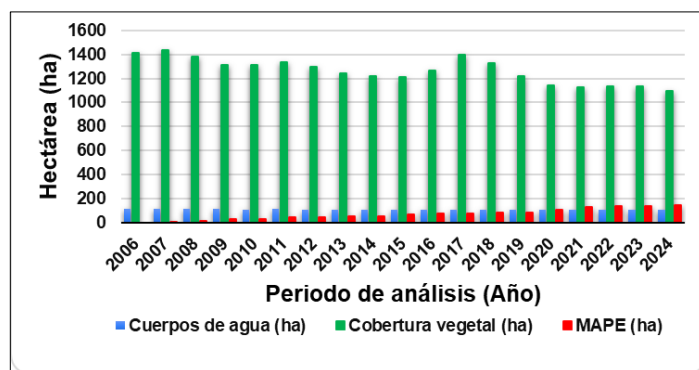


Fig. 5 Variación de las variables desde el 2006 – 2024

En el caso de los cuerpos de agua, el modelo presentó un mayor nivel de explicación ($R^2 = 80.3\%$), lo que indica una asociación más intensa entre la expansión de la actividad minera y la reducción de la superficie hídrica. Por su parte, la

cobertura vegetal también mostró una relación negativa relevante con la MAPE ($R^2 = 75.3\%$), aunque con menor magnitud en comparación con los cuerpos de agua. Estos resultados sugieren que, dentro del área de estudio, la expansión de la MAPE se encuentra más estrechamente asociada con la reducción de los recursos hídricos superficiales que con la pérdida de cobertura vegetal.

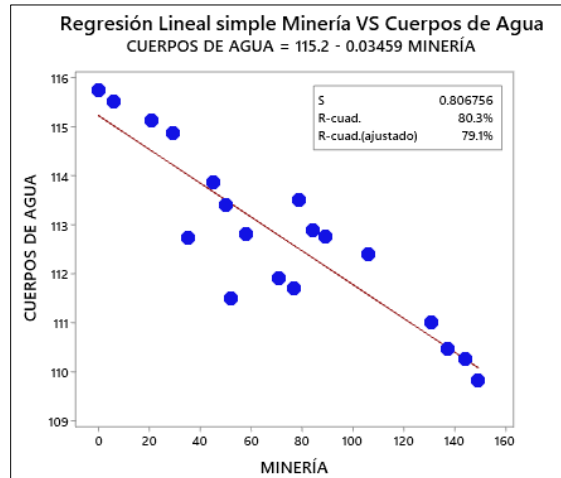


Fig. 6 Regresión lineal de MAPE vs Cuerpos de agua.

Los avances en sensores satelitales han incrementado de manera significativa la resolución espacial y espectral, así como la disponibilidad de imágenes multiespectrales, consolidando la teledetección como una herramienta fundamental para el análisis de cambios en la superficie terrestre [16]. En este contexto, el análisis multitemporal desarrollado en el estudio permitió caracterizar la evolución del paisaje en la cabecera de la microcuenca de Huancaray durante el periodo 2006- 2024, identificando patrones espaciales asociados a la expansión de la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) y a las variaciones observadas en la cobertura vegetal y los cuerpos de agua.

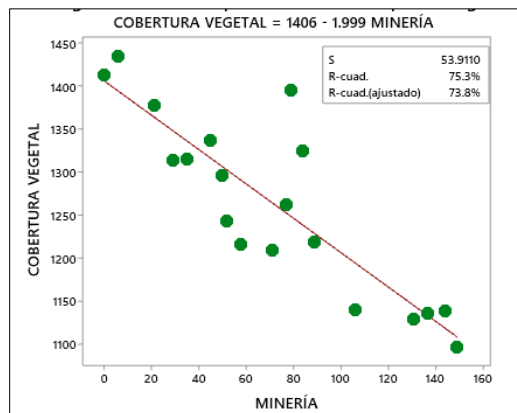


Fig. 7 Regresión lineal de MAPE vs Cobertura vegetal

V. DISCUSIÓN

Durante el periodo de estudio se registró una expansión creciente de las áreas asociadas a la MAPE, acompañada de una disminución progresiva de la cobertura vegetal y de los cuerpos de agua, en un contexto caracterizado por altos niveles de informalidad minera y una limitada fiscalización ambiental [3]. Estos resultados son consistentes con estudios regionales que documentan transformaciones aceleradas del paisaje vinculadas a la minería de pequeña escala [17], [18]. En este sentido, el aporte del presente estudio radica en el análisis de ecosistemas de alta montaña, altamente frágiles y poco representados en la literatura científica, particularmente en relación con procesos extractivos de carácter artesanal.

La disminución de la cobertura vegetal en el área de estudio se alinea con estudios, que la expansión de la MAPE genera el desplazamiento de actividades agropecuarias y afecta a bofedales y a la vegetación nativa altoandina [4], [5]. A diferencia de los estudios realizados en valles interandinos, donde predomina la deforestación arbórea [19]. En las cabeceras de cuenca altoandinas el impacto se manifiesta principalmente sobre formaciones vegetales de alta montaña y ecosistemas hidrófilos, con implicancias relevantes para la regulación hídrica. Esto establece una relación con la reducción de los cuerpos de agua, monitoreada mediante teledetección investigado en otros contextos mineros[2].

La variación de la cobertura vegetal y de los cuerpos de agua no responde únicamente a la actividad minera, sino también a factores climáticos, productivos y socioeconómicos. En particular, eventos asociados al ENSO generan anomalías en la precipitación que influyen en la dinámica de los ecosistemas altoandinos [20], [21]. Durante el evento 2017, se registraron precipitaciones superiores al 120 % de lo normal en zonas como Andahuaylas, lo que favoreció una recuperación temporal de la vegetación y de los cuerpos de agua [23]. Sin embargo, estos efectos son temporales y no logran revertir las tendencias de degradación observadas a lo largo del periodo de estudio.

En paralelo, factores socioeconómicos como el incremento del precio de los minerales, la migración de retorno durante la pandemia y la limitada fiscalización han impulsado la expansión de la minería artesanal, aumentando la presión sobre los recursos naturales [4], [24], [25]. Asimismo, la expansión agrícola y el uso intensivo del suelo contribuyen a la pérdida de cobertura vegetal, generando un efecto acumulativo sobre el territorio [8]. Esta combinación de factores intensifica la transformación del paisaje y explica la persistencia de procesos de degradación en la microcuenca.

En este contexto, la interpretación de los resultados no solo evidencia cambios en la cobertura del suelo, sino también un deterioro progresivo del entorno ecológico. En línea con estudios que emplean indicadores integrados de calidad ambiental, como el Índice Ecológico de Teledetección (RSEI), se reconoce que la disminución de la cobertura vegetal, la reducción de cuerpos de agua y el aumento de áreas intervenidas reflejan una pérdida del equilibrio ecológico [21]. En la microcuenca de Huancaray, la reducción simultánea de

estos componentes sugiere una tendencia sostenida de degradación ambiental, asociada principalmente a la expansión de la minería artesanal.

A diferencia de los efectos climáticos, que son variables y temporales, la presión minera actúa de manera continua sobre el territorio, consolidándose como el principal factor de cambio. Esto se evidencia en la relación significativa entre la expansión minera y la pérdida de cobertura vegetal y recursos hídricos. En conjunto, los resultados muestran que la transformación del paisaje no es solo un cambio en el uso del suelo, sino una manifestación de deterioro de la calidad ambiental, con implicancias directas sobre la disponibilidad de agua, la estabilidad del ecosistema y el bienestar de la población local.

El análisis de regresión lineal mostró que la expansión de la MAPE se asocia con el 75.3 % de la variación en la cobertura vegetal y el 80.3 % de la variación en los cuerpos de agua. Estudios internacionales desarrollados en contextos mineros de África occidental, como el realizado en Ghana, donde se registró la intervención de aproximadamente 47,000 ha de vegetación entre 2005 y 2019 [26]. En África occidental, donde se reportó una reducción del 11.47 % de la cobertura boscosa en áreas con actividad minera [20]. Este enfoque cuantitativo contribuye a reducir vacíos metodológicos previamente señalados para ecosistemas altoandinos [14].

Los valores del índice Kappa (0.73–0.88) evidencian una precisión de buena a muy buena en la clasificación supervisada mediante el algoritmo Support Vector Machine (SVM), lo que respalda la confiabilidad de los resultados en la identificación de coberturas terrestres [15]. La clasificación fue realizada en ArcGIS Pro utilizando el algoritmo SVM con parámetros predefinidos por el software. Para el entrenamiento, se seleccionaron cinco puntos por cada tipo de cobertura, lo que permitió definir adecuadamente las firmas espectrales de cada clase. Estos resultados son consistentes con estudios en ecosistemas altoandinos del Perú, como en la región Junín (Kappa $\approx$ 0.81) [14]. Sin embargo, los valores obtenidos son ligeramente menores a los reportados en zonas de menor complejidad topográfica, como en Sudáfrica (0.80–0.98) [16], lo cual se explica por la heterogeneidad del relieve y la fragmentación de la cobertura vegetal en ecosistemas altoandinos.

Desde una perspectiva cuantitativa, la pérdida de cobertura vegetal (317.1 ha; 22.4 % respecto a 2006) y la reducción de los cuerpos de agua (5.96 ha; 5.15 %) durante el periodo 2006–2024, evidencian una disminución sostenida de ambos componentes clave del paisaje en la cabecera de la microcuenca de Huancaray. Estos resultados se alinean con investigaciones que identifican a la minería artesanal y de pequeña escala como un factor asociado a los cambios en el uso del suelo en regiones altoandinas, con efectos sobre la biodiversidad, la disponibilidad hídrica y la degradación ambiental [26].

En contraste, la recuperación parcial observada en el año 2017 puede asociarse a condiciones climáticas excepcionales vinculadas al Fenómeno El Niño Costero [23]. Sin embargo, tal como ha sido documentado en otros estudios post-mineros,

estos efectos tienden a ser temporales y no logran revertir las tendencias de degradación de largo plazo asociadas a la persistencia de actividades extractivas [27], [28].

El avance de la MAPE en la microcuenca también responde a factores socioeconómicos como el alza del precio de los minerales, el retorno migratorio durante la pandemia por COVID-19 y la limitada fiscalización estatal, condiciones que favorecieron una expansión acelerada de la minería informal en Andahuaylas y otras zonas del Perú [4], [24], [25]. Asimismo, los bajos niveles de formalización y las prórrogas sucesivas del REINFO han contribuido a mantener la informalidad del sector [4].

Este contexto coincide con estudios que reportan un aumento de la conflictividad socioambiental entre minería y agricultura por el uso del agua y la superposición de concesiones sobre tierras agrícolas y fuentes hídricas [3], [29], [30]. De igual forma, se ha señalado que la flexibilidad estatal y los acuerdos comunales incrementaron los conflictos y los costos agrícolas, incentivando la migración laboral hacia la minería [31].

En términos metodológicos, la integración de índices multispectrales (NDVI, NDWI, NDSI y NDBI) permitió una evaluación más amplia del territorio respecto de enfoques basados en indicadores únicos, además de demostrar la utilidad del monitoreo satelital para relacionar dinámica minera y cambios ecológicos [21]. Ello constituye una herramienta replicable para gestión territorial y fiscalización ambiental en otras microcuencas altoandinas.

Entre las principales limitaciones del estudio, la resolución espacial de Landsat (30 m) redujo el detalle de análisis frente a Sentinel-2 (10 m). Asimismo, la nubosidad frecuente y la topografía accidentada de alta montaña afectaron la calidad de imágenes y la precisión de clasificación.

Si bien la teledetección es una herramienta confiable para el monitoreo espaciotemporal, no reemplaza evaluaciones de campo sobre calidad de agua o biodiversidad. Por ello, futuras investigaciones deberían integrar análisis satelital con monitoreo hidrológico y biológico in situ.

En conjunto, la minería artesanal sigue creciendo junto con factores como el cambio climático, la expansión agrícola y el limitado control del Estado, por lo que la degradación ambiental podría intensificarse. Esto podría generar menor disponibilidad de agua, pérdida de vegetación y mayores conflictos entre las comunidades por el uso de los recursos. En este contexto, es necesario implementar medidas como el fortalecimiento de la fiscalización ambiental, el control efectivo de la actividad minera informal, la promoción de procesos reales de formalización, y la protección de las cabeceras de cuenca mediante ordenamiento territorial. Asimismo, se recomienda el uso de monitoreo satelital continuo y la recuperación de áreas degradadas. En conjunto, estos resultados muestran que la microcuenca de Huancaray enfrenta una situación de riesgo que podría afectar el ambiente y la calidad de vida de la población si no se toman acciones oportunas.

VI. CONCLUSIÓN

Los resultados del presente estudio indican que la expansión de la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) durante el periodo 2006 – 2024 se encuentra asociada a una disminución progresiva de la cobertura vegetal y de los cuerpos de agua en la cabecera de la microcuenca de Huancaray, evidenciando transformaciones relevantes en el paisaje altoandino. Estos cambios ocurren en un contexto de alta presión extractiva sobre ecosistemas de cabecera de cuenca, los cuales se caracterizan por su elevada fragilidad ambiental y su relevancia para la regulación hídrica y el sustento de comunidades locales ante sus denuncias ambientales.

El análisis multitemporal basado en técnicas de teledetección permitió cuantificar de manera objetiva la magnitud de estas variaciones espaciales, demostrando la utilidad de los índices espectrales como una metodología eficaz y replicable para el monitoreo ambiental en regiones altoandinas donde la información de campo es limitada.

No obstante, es importante señalar que, estos cambios también pueden estar influenciados por otros factores como la variabilidad climática, las dinámicas naturales de estos ecosistemas y el algoritmo de calificación supervisada más avanzados, lo que sugiere la necesidad de un enfoque multifactorial en futuros estudios.

Este enfoque aporta evidencia técnica que contribuye a comprender la relación entre la dinámica de la actividad minera artesanal y la degradación de componentes ambientales clave para el funcionamiento de los ecosistemas de cabecera.

Desde una perspectiva aplicada, los hallazgos resaltan la importancia de fortalecer los procesos de ordenamiento territorial y los mecanismos de fiscalización ambiental, en un contexto donde la informalidad minera y la limitada capacidad institucional incremental la presión sobre los ecosistemas altoandinos. La incorporación de sistemas de monitoreo satelital se presenta como una herramienta para la gestión sostenible de las cabeceras de cuenca.

Finalmente, si bien el estudio se centra en la microcuenca de Huancaray, la metodología propuesta puede ser replicada en otros contextos similares, contribuyendo al análisis y monitoreo de la dinámica de la minería artesanal en ecosistemas frágiles. En conjunto, el estudio proporciona insumos técnicos relevantes para la planificación territorial y la formulación de políticas públicas orientadas a la conservación de los servicios ecosistémicos y la reducción de la vulnerabilidad ambiental.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó con el apoyo de la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA), cuya información satelital y metodología de procesamiento fue esencial para llevar a cabo el análisis espacial y dar sustento técnico a nuestra investigación. Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra asesora, Anita Arrascue Lino, por su constante guía, paciencia y compromiso durante todo el proceso, inspirándonos a mejorar

cada etapa del trabajo. Finalmente, queremos dedicar un especial agradecimiento a nuestras familias y compañeros, por su apoyo incondicional, comprensión y aliento, que nos motivaron a seguir adelante y hacer posible la culminación de este proyecto.

VIII. REFERENCIAS

- [1] COMEXPERU, “22 AÑOS DE ‘LUCHA’ CONTRA LA MINERÍA ILEGAL: UN FRACASO ABSOLUTO.” Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.comexperu.org.pe/articulo/22-anos-de-%E2%80%9C9C%9D-clucha%E2%80%9D9D-contra-la-mineria-ilegal-un-fracaso-absoluto>
- [2] S. K. Montes Bujaico, E. E. Belito Huamani, M. Montes Bujaico, C. Ventura Deyvid, W. M. Montañez Artica, and J. Quispe Taipe, “Evaluación del Impacto de la Actividad Minera en los Recursos Hídricos Andinos y Formulación de Estrategias para una Gestión Ambiental Sostenible,” *FitoVida*, vol. 3, no. 2, pp. 02–13, Dec. 2024, doi: 10.56275/FITOVIDA.V3I2.39.
- [3] Ro. Orihuela, “El agua desprotegida de los Andes peruanos.” Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: <https://convoca.pe/investigacion/el-agua-desprotegida-de-los-andes-peruanos>
- [4] C. A. Castro and E. Cárdenas, “Minería artesanal y de pequeña escala en Cusco y Apurímac. Impactos en las dinámicas locales,” 2023. [Online]. Available: www.propuestaciudadana.org.pe
- [5] Tito. Vega, “Agricultura, minería y conflicto social en el distrito José María Arguedas, provincia de Andahuaylas, región Apurímac,” 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12918/9936>
- [6] ANA, “Reporte de supervisión de recursos hídricos en las zonas de Huancabamba y Pampachiri, áreas en la que se realizan actividades mineras,” 2024. [Online]. Available: <https://sisged.ana.gob.pe/consultas>
- [7] SERFOR, “Afectación Ambiental que se estaría generando a la flora y fauna en el sector de Morccose de la comunidad campesina de Umamarca, del distrito de Tumay Huaraca,” Sep. 2024. [Online]. Available: www.gob.pe/serfor
- [8] J. Quispe, “Desarrollo de modelos ráster y vectorial para el análisis geoespacial de la microcuenca del río Huancaray, Apurímac, Perú | Mastergis,” Accessed: Jan. 30, 2026. [Online]. Available: <https://mastergis.com/proyecto/desarrollo-de-modelos-raster-y-vectorial-para-el-analisis-geoespacial-de-la-microcuenca-del-rio-huancaray-apurimac-peru>
- [9] N. Guzman, “Evaluación de pérdida de bofedales vinculados a la actividad minera en la cuenca del río Santa mediante técnicas de teledetección, años 2017 – 2022,” 2025. Accessed: Jan. 30, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.usil.edu.pe/bitstreams/84a4c520-5263-4e0f-bda0-e5798334ba6e/download>
- [10] U. Giraldo and P. Vaquez, “Evaluación y medición de la expansión territorial de la minería informal en la cuenca alta del Ramis, Puno, Perú, usando imágenes satelitales,” *Espacio y Desarrollo*, no. 34, pp. 5–32, Feb. 2019, doi: 10.18800/espaciodydesarrollo.201902.001.
- [11] L. Quispe, “Modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales para la detección de superficies degradadas por actividad minera ilegal e informal – Madre de Dios,” 2021. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.13084/5097>
- [12] U. Giraldo, “Cambio de uso del suelo por la minería aurífera aluvial en la Amazonía sur del Perú, 2002 – 2021,” 2023. Accessed: Oct. 10, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/20259>
- [13] A. O. Owolabi, K. Amujo, and I. E. Olorunfemi, “Spatiotemporal changes on land surface temperature, land and water resources of host communities due to artisanal mining,” *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-12512-w/Published.

- [14] S. E. Pizarro, N. G. Pricope, D. Vargas-Machuca, O. Huanca, and J. Ñaupari, "Mapping Land Cover Types for Highland Andean Ecosystems in Peru Using Google Earth Engine," *Remote Sens. (Basel)*, vol. 14, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/rs14071562.
- [15] M. F. Blanche *et al.*, "Assessment of land cover degradation due to mining activities using remote sensing and digital photogrammetry," *Environmental Systems Research*, vol. 13, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1186/s40068-024-00372-5.
- [16] A. Madasa, I. R. Orimoloye, and O. O. Ololade, "Application of geospatial indices for mapping land cover/use change detection in a mining area," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 175, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104108.
- [17] Y. Tarazona and M. Miyasiro-López, "Monitoring tropical forest degradation using remote sensing. Challenges and opportunities in the Madre de Dios region, Peru," *Remote Sens. Appl.*, vol. 19, p. 100337, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.RSASE.2020.100337.
- [18] J. W. , Jr. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," *NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A*, 1974.
- [19] A. Ghasemi and S. Zahediasl, "Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians," *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, vol. 10, no. 2, pp. 486–489, 2012, doi: 10.5812/ijem.3505.
- [20] D. D. Gbedzi *et al.*, "Impact of mining on land use land cover change and water quality in the Asutifi North District of Ghana, West Africa," *Environmental Challenges*, vol. 6, p. 100441, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ENV.2022.100441.
- [21] J. ; ; Fang *et al.*, "Impact of Land Cover Change on a Typical Mining Region and Its Ecological Environment Quality Evaluation Using Remote Sensing Based Ecological Index (RSEI)," *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 12694, vol. 14, no. 19, p. 12694, Oct. 2022, doi: 10.3390/SU141912694.
- [22] H. I. Carbajal-Morán and F. I. Onofre-Enriquez, "Determinación con imágenes satelitales del índice de vegetación de diferencia normalizada del valle de Pampas-Tayacaja Determination with satellite images of the normalized difference vegetation index of the Pampas-Tayacaja valley Determinação com imagens de satélite do índice de vegetação de diferença normalizada do vale Pampas-Tayacaja Ciencias técnica y aplicada Artículo de investigación," vol. 5, no. 1, pp. 228–245, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i1.1893.
- [23] SENAMHI, "El Niño Costero 2017 Condiciones Termo-Pluviométricas a Nivel Nacional," Aug. 2017.
- [24] U. Giraldo, "MINERÍA INFORMAL EN LA CUENCA ALTA DEL RAMIS: IMPACTOS EN EL PAISAJE Y EVOLUCIÓN DEL CONFLICTO SOCIO AMBIENTAL," 2017.
- [25] J. De Echave, "La minería informal e ilegal de hoy en día," <https://cooperaccion.org.pe/opinion/la-mineria-informal-e-ilegal-de-hoy-en-dia/>. Accessed: Oct. 10, 2024. [Online]. Available: <https://cooperaccion.org.pe/opinion/la-mineria-informal-e-ilegal-de-hoy-en-dia/>
- [26] A. Barenblitt *et al.*, "The large footprint of small-scale artisanal gold mining in Ghana," *Science of the Total Environment*, vol. 781, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146644.
- [27] A. Buczyńska, J. Blachowski, and N. Bugajska-Jędraszek, "Analysis of Post-Mining Vegetation Development Using Remote Sensing and Spatial Regression Approach: A Case Study of Former Babina Mine (Western Poland)," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/rs15030719.
- [28] C. Mestanza-Ramón *et al.*, "Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM): Management and Socioenvironmental Impacts in the Northern Amazon of Ecuador," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 11, 2022, doi: 10.3390/su14116854.
- [29] D. Blume and M. Gonzáles, "Minera Las Bambas: comuneros alertan sobre contaminación ." Accessed: Sep. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.infobae.com/peru/2024/06/01/represion-policial-deja-varios-heridos-en-las-comunidades-huancuire-y-pumamarca-por-conflicto-de-tierra-y-agua/>
- [30] F. Gonzales, P. Herrera, C. Gallardo, and V. Fuentes, "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESPUESTA GUBERNAMENTAL A LA MINERÍA ILEGAL E INFORMAL EN AMÉRICA DEL SUR," Jul. 2024. Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: www.snmpe.org.pe
- [31] F. R. Valle Díaz *et al.*, "Sustainability of Informal Artisanal Mining in the Peruvian Andean Region," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 21, Nov. 2023, doi: 10.3390/su152115586.