

Modelado Espacio - Temporal y Proyección de los Cambios en el Humedal Lucre- Huacarpay ante el Cambio Climático y la Transformación del Uso de Suelo

Pedro Lavado Medina, Anahí Guerra Ñaupá

Resumen

El estudio aborda la transformación espacio-temporal del humedal altoandino Lucre-Huacarpay, en Cusco, Perú, ante presiones antropogénicas y el cambio climático, utilizando teledetección multitemporal y proyecciones con inteligencia artificial. Reconocido como sitio RAMSAR desde 2006, este ecosistema provee valiosos servicios ecosistémicos, siendo fundamental para las comunidades aledañas. No obstante, se ha observado una pérdida significativa de su cobertura, atribuida principalmente a la expansión agrícola, urbanización desordenada, contaminación y sobrepastoreo. El análisis multitemporal, mediante el uso de la colección del MapBiomás y la modificación con algoritmo Random Forest en Google Earth Engine, mostró que entre los años 2000 y 2020 el humedal conservado se redujo en un 48,52 %, mientras que el área degradada aumentó. La transición más relevante fue de humedal sano a humedal deteriorado (117,44 ha), lo que indica un proceso progresivo de deterioro vegetal. Asimismo, se evidenció que solo el 50,41 % del humedal se mantuvo sin cambios. Para proyectar la dinámica futura, se implementó una red neuronal artificial con arquitectura LSTM + Dense, estimando que para 2050 el humedal sano podría perder hasta el 65 % de su cobertura original, mientras que el humedal degradado crecería a 160 ha. Este trabajo pone en evidencia la necesidad urgente de estrategias de conservación efectivas, así como la integración de herramientas de monitoreo remoto en la gestión ambiental. Se destaca también la relevancia de las políticas nacionales para la protección de humedales, aunque su implementación ha sido insuficiente frente a las amenazas detectadas. El estudio plantea un marco aplicable para estudios similares en otros ecosistemas vulnerables.

Palabras clave: *Humedal altoandino, Lucre-Huacarpay, Teledetección, Uso y cobertura de suelo, MapBiomás, Random Forest, Red neuronal artificial, Índices espectrales, Ecosistemas vulnerables, RAMSAR, Deterioro vegetativo.*

Abstract

This study addresses the spatiotemporal transformation of the high Andean Lucre-Huacarpay wetland in Cusco, Peru, under anthropogenic pressures and climate change, using multi-temporal remote sensing and artificial intelligence projections. Recognized as a RAMSAR site since 2006, this ecosystem provides valuable ecosystem services and is critical to the surrounding communities. However, a significant loss of its cover has been observed, attributed mainly to agricultural expansion, urban sprawl, pollution, and overgrazing. The multi-temporal analysis, using the MapBiomás collection and modifying it with the Random Forest algorithm in Google Earth Engine, showed that between 2000 and 2020, the conserved wetland area decreased by 48.52%, while the degraded area increased. The most significant transition was from a healthy wetland to a deteriorated wetland (117.44 ha), indicating a progressive process of vegetation deterioration. Furthermore, it was found that only 50.41% of the wetland remained unchanged. To project future dynamics, an artificial neural network with an LSTM + Dense architecture was implemented, estimating that by 2050, the healthy wetland could lose up to 65% of its original cover, while the degraded wetland would grow to 160 ha.

This work highlights the urgent need for effective conservation strategies, as well as the integration of remote monitoring tools into environmental management. It also highlights the importance of national policies for wetland protection, although their implementation has been insufficient in the face of the threats detected. The study proposes a framework applicable to similar studies in other vulnerable ecosystems.

Key words: *High Andean wetland, Lucre-Huacarpay, Remote sensing, Land use and cover, MapBiomas, Random Forest, Artificial neural network, Spectral indices, Vulnerable ecosystems, RAMSAR, Vegetative deterioration.*

1. Introducción

Los humedales son áreas terrestres que logran concentrar agua dulce natural proveniente de cauces hídricos (Paira, 2021). A nivel global, este ecosistema abarca un área total aproximada de 1.2 mil millones de hectáreas (RAMSAR, 2021), trayendo consigo beneficios sociales, ambientales y económicos (MINAM, 2016). Estos son producidos mediante los servicios ecosistémicos que brindan los humedales a su entorno (Lopez & Cetzal, 2024) como la provisión de recursos naturales, la regulación de ciclos hidrológicos, aspectos culturales y apoyo como espacio vital para la supervivencia y desarrollo del ecosistema (Song et al., 2021).

A pesar de que los humedales presentan un papel irremplazable como ecosistemas productivos con características benéficas, estos se han convertido en uno de los entornos naturales con mayores amenazas del mundo a causa de intensificadas actividades antrópicas y el cambio climático (Li et al., 2024). La degradación ecosistémica por fuente humana es visto por diferentes acciones como la contaminación directa del entorno, la fragmentación de hábitats, el uso del área como zona recreativa, el relleno de zonas del humedal para el desarrollo urbano o la instalación industrial (Llanos, 2022); siendo todos estos factores del cambio de uso y cobertura del suelo que transforman y reducen el área del bioma junto a sus procesos físicos, químicos y biológicos de la superficie terrestre y agua presente (Zheng et al., 2021). Referente a otro factor de deterioro de los humedales es el cambio climático que se encuentra asociado a las alteraciones del clima y sus efectos sobre este bioma sensible, causando pérdidas irreversibles por fenómenos extremos relacionados con la variación de patrones climáticos (Vidal et al., 2020). Esta variación es basada en la tendencia de aumento de temperatura ambiental con efectos sobre la retención de vapor de agua y el ciclo hidrológico; y la modificación de frecuencia y patrones de precipitaciones que alteran disponibilidad de agua hacia zonas dependientes de este, haciéndolos más vulnerables (Villena, 2021).

Ante los beneficios y problemas que presentan los humedales, se crean los tratados intergubernamentales para preservación de ecosistemas como la conservación RAMSAR donde se designa a ciertos humedales con el nombre de sitio RAMSAR por su gran importancia relativa y que requieren de medidas de monitoreo continuo junto a una protección a través de políticas designadas por autoridades nacionales (RAMSAR, 2010). No obstante, el deterioro sigue incrementando por la falta de seguimiento del ecosistema y la mayor parte de reportes de peligro son recibidos en las zonas de América Latina y el Caribe donde sus humedales otorgan servicios ecosistémicos valorados en USD 2,48 x 10¹² (Aponte et al., 2020).

El Perú presenta humedales altoandinos los cuales vienen a ser ecosistemas que representan un patrimonio cultural, natural y económico invaluable para las comunidades indígenas y rurales que se encuentran en zonas aledañas (Wetlands international, 2019). Para las comunidades aledañas

altoandinas, estos ecosistemas sirven como fuente de forraje y de abastecimiento de agua dulce. Estos beneficios se ven comprometidos por amenazas provocadas por las poblaciones dependientes del humedal tales como la compactación del suelo por el sobrepastoreo, la reducción del área del ecosistema por cambio de uso y cobertura de suelo y la erosión por la quema de pastizales (Chamorro et al., 2021). A su vez, presentan vulnerabilidad ocasionadas por sequías, tormentas y cambios en la temperatura derivados del cambio climático lo cual resulta en una pérdida de cobertura vegetal, de humedad y de biodiversidad (Moya et al., 2005).

En el país existen leyes dirigidas a la protección estatal de los humedales tales como la Ley General del Ambiente (Ley N° 28611 - artículo 99) que indica que los humedales son considerados ecosistemas frágiles y por ende requieren de una protección especial para evitar su deterioro (Congreso de la República, 2017). Actualmente, se creó la Ley N° 32099 “Ley para la protección, conservación y uso sostenible de los humedales en el territorio nacional”, que tiene como finalidad establecer principios y disposición de protección, conservación, uso sostenible de recursos, prevención de deterioro y mitigación de los efectos del cambio climático sobre estos (El Peruano, 2024). Esta legislación es complementada con el Decreto Supremo N° 006-2021-MINAM sobre la gestión compartida y descentralizada de humedales por parte de entidades como el SERFOR y el ANA que desempeñan funciones específicas que aseguran su conservación y uso sostenible (MINAM, 2021). Sin embargo, a pesar de la normativa mencionada y la necesidad de una protección especial que requieren estos ecosistemas, el panorama nacional muestra que los humedales siguen siendo vulnerados por la población peruana (FAO, 2022).

Ante estas adversidades ambientales, sociales y legales, se origina susceptibilidad ligada al valor económico que representan los servicios ecosistémicos que brindan los humedales altoandinos. Este valor suele ser significativo como se presenta en el caso de la Bahía interior de Puno ubicada dentro del humedal Lago Titicaca para el cual se estimó un Valor Económico Total anual de S/ 909,479.34 (Quispe-Charca, 2022).

En Cusco se encuentra un humedal altoandino Lucre – Huacarpay el cual tiene importancia internacional al ser reconocido como sitio RAMSAR desde el año 2006 (Sinia, 2013). Esto debido al servicio del tipo cultural por su belleza paisajística (MINAM, 2016), a su relevancia ecológica al contener alta biodiversidad representada por alrededor de 70 especies de aves, entre las que se encuentran especies amenazadas y endémicas, y a su relevancia hidrológica. Existen poblaciones aledañas como el Poblado Menor de Huacarpay (664 habitantes), el Distrito de Lucre (3,804 habitantes), la comunidad campesina de Muyna (249 habitantes) y la comunidad Campesina de Huambituío (402 habitantes), que hacen uso de sus servicios ecosistémicos, en especial el de abastecimiento de recursos (RAMSAR, 2006)

Pese a la importancia que representa para la sociedad, se identificaron alteraciones de origen antropogénico como los incendios no controlados de totorales, la pesca de especies exóticas y la pesca accidental, el sobre pastoreo en las zonas cercanas de matorral que ocasionan eutrofización por los excrementos de los animales, la contaminación por aguas servidas que son depositadas en el humedal sin previo tratamiento, entre otras (MINAM, 2016).

Entre estas alteraciones destaca el uso de suelo para fines agrícolas, que afecta principalmente al régimen hídrico al drenar el humedal, ocasionando la pérdida de flora y hábitat de fauna nativa y migratoria (MINAM, 2016). Se estima que, en cuanto a la capacidad de uso mayor de tierras,

aproximadamente el 94,37% del área pertenece a tierras de protección asociadas con pastos y cultivos (Mallqui, 2016).

La urbanización también es una amenaza importante en la zona, los centros poblados circundantes han invadido parte del terreno de manera desordenada y se van acercando a la franja marginal y a las riberas de la laguna principal. El Ministerio de Agricultura contribuyó a la problemática con el Proyecto Especial de Titulación de Tierras y Catastro Rural (PETT) con el cual otorgó 170 títulos de propiedad a los pobladores de alrededor del 90% del territorio, a pesar de ser un sitio RAMSAR (RAMSAR, 2006).

En el departamento que contiene al humedal Lucre – Huacarpay se han presentado impactos de fuentes naturales debido a la ocurrencia de variaciones climáticas. En el período de 1968 a 2012 la temperatura aumentó entre 0,03 a 0,4C°, además, las precipitaciones aumentaron entre 0,75 a 6,32 mm/año (MINAM, 2011). demostrando así una variación en los patrones climáticos a lo largo de los años. Estas alteraciones son presenciadas por la población aledaña. Se realizó una serie de entrevistas a pobladores del lugar, la señora Emiliana Surca Pérez que habita cerca al lugar toda su vida, y considera que el área del humedal se ha reducido hasta en su tercera parte debido a las actividades agrícolas. Por su parte, el señor Roimeo, que es conductor en la zona, y que ha vivido 20 años en el lugar, alude que por una parte los cultivos han quitado gran parte del terreno al humedal, y por otra que las lluvias han reducido junto con el nivel del humedal el cual ha disminuido en aproximadamente la mitad, además del incremento en las temperaturas.

Actualmente, para evaluar la problemática en los humedales, existen tecnologías de monitoreo y seguimiento de los impactos en estos ecosistemas como la aplicación de la teledetección, una herramienta capaz de detectar y analizar cambios en la extensión de área, la vegetación y calidad del agua, proporcionando información necesaria para implementar medidas de gestión y conservación (Aslam, Shu, Tariq, et al., 2024). Esta herramienta fue utilizada en seguimientos de ecosistemas sensibles como el humedal de los Pantanos de Villa donde se evaluaron los cambios en la extensión de la cobertura vegetal del área (Flores et al., 2020); en el humedal Huacho – Hualmay - Carquín donde se obtuvo la tasa de cambio anual de la extensión del área (Hoyos Gonzales et al., 2022); y en el Área de Conservación Regional humedales de Ventanilla para determinar la pérdida o ganancia del humedal (Camas Guardamino & Mamani Sinche, 2022).

Para extraer las imágenes satelitales necesarias para aplicar teledetección se puede utilizar una gran variedad de plataformas, siendo Google Earth Engine (GEE) una plataforma ideal por su acceso gratuito para el uso de investigaciones (Demarquet et al., 2024) y por su capacidad de corrección de nubosidad en las imágenes (Farhan et al., 2024) (Aslam, Shu, Tariq, et al., 2024). Posterior a la extracción y corrección de imágenes satelitales, se pueden identificar alteraciones en la superficie derivada de los cambios en el uso y cobertura de suelo en diversos ecosistemas como en el caso de un humedal. Esto se desarrolla mediante la aplicación de clasificación supervisada en la plataforma GEE (Singh et al., 2024a). Entre los más utilizados se encuentra el algoritmo Support Vector Machine (SVM) (Farhan et al., 2024), el algoritmo Árbol de clasificación y regresión (CART) (Aslam, Shu, Tariq, et al., 2024) y el algoritmo Maximum Likelihood (ML) (Seyam et al., 2023). Sin embargo, el algoritmo Random Forest (RF) fue comparado por Singh et al (2024) y Demarquet et al (2024) con los algoritmos anteriormente mencionados, encontrando que este presentó mejores y más altos resultados de precisión de clasificación al ser evaluado con el coeficiente de validación Kappa.

Con el objetivo de facilitar la distinción de capas de la superficie en clasificación se usan índices espectrales. La mejora en la investigación, monitoreo y evaluación de cobertura vegetal de ecosistemas se logró gracias a categorización/agrupación de bandas que puede ser expresado a través de la elaboración y uso de índices espectrales (Muñoz, 2013).

En el caso de estudios asociados con ecosistemas con presencia de cobertura vegetal, los índices con mayor uso son los de vegetación como el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) que ayuda a medir la presencia de verdor de la vegetación en una imagen satelital (Aponte-Saravia & Ospina-Noreña, 2019).

Otro índice que sobresale para mejorar específicamente el análisis de humedales altoandinos a nivel de superficie es el Índice de humedad a nivel de superficie (LSWI) para evaluar el contenido de humedad en la vegetación (Aponte-Saravia & Ospina-Noreña, 2019). El índice es derivado de porciones de las bandas NIR y SWIR del espectro electromagnético en la evaluación del estrés hídrico; es decir, la interacción de las moléculas de agua con la radiación solar (Banerjee et al., 2025).

Los ecosistemas con presencia de cuerpos de agua necesitan de índices que ayuden con la reflectancia del agua y su separación de otras coberturas, siendo este el Índice de diferencia normalizada de agua (NDWI) el más destacado para delinear la presencia de agua (Aponte-Saravia & Ospina-Noreña, 2019). El NDWI tiene la capacidad de discriminar los cuerpos de agua presentes en las imágenes satelitales mediante el agregado de características espectrales del agua y suprimiendo de manera simultánea la vegetación y superficie del suelo, con ello los resultados positivos indican cuerpos de agua como lagunas, ríos o cuerpos de agua de poca profundidad, mientras que resultados cero o negativo indican áreas sin cobertura de agua (Mahmood et al., 2025).

Con el fin de seguir evaluando la cobertura presente de un ecosistema vegetal, como el caso de un humedal, y evaluar su composición de cobertura exterior, se tienen dos índices extras para este análisis. El primero es llamado Tasseled Cap Greenness (TCG) derivado del Tasseled Cap Transformation (TCT), pero donde solo se sobresale el verdor de la cobertura vegetal (Zhao et al., 2024) y los patrones dados progresivamente del crecimiento de cultivos (Kauth y Thomas, 1976). Siguiendo con la evaluación de la zona externa de un ecosistema específico, se tiene la presencia de áreas con infraestructura o construcción donde el Índice diferencial normalizado de construcciones (NDBI) ayuda a distinguir las zonas urbanizadas de las otras coberturas presentes (Farhan et al., 2024).

Las clasificaciones supervisadas requieren datos de entrenamiento, es así que diferentes proyectos se enfocan en realizar clasificaciones del uso de suelo, a nivel nacional el inventario de bofedales desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) presentó el inventario de bofedales y humedales altoandinos al 2023 (INAIGEM, 2023), sin embargo este proyecto solo recolecta información puntual respecto a bofedales y humedales altoandinos. Es por esa razón que se consideró trabajar con los datos de clasificación provistos por la colección 2 del proyecto Map Biomas, que realizó una extensa identificación de coberturas vegetales y de agua Map Biomas (2025) .

Los cambios identificados durante el periodo de estudio se pueden proyectar a futuro con la finalidad de conocer el grado de deterioro del ecosistema y así gestionar medidas de mitigación con el fin de evitar su pérdida. Para ello se utilizan diferentes tipos de modelos de predicción de aprendizaje automático tales como las redes neuronales artificiales (ANN) (Saha et al., 2021) (Roy & Rahman, 2023) (Sajan et al., 2022) (Khan et al., 2024) para la identificación de cambios de cobertura futuros en

el ecosistema. Referente a la implementación de inputs o data de entrada al modelo, se tuvieron la cantidad de hectáreas de las coberturas que se desea analizar.

Los años mayormente considerados en los estudios de proyección al futuro son el año 2030 y el 2050 debido a la existencia de tratados y acuerdos internacionales que los consideran como fechas límite para el cumplimiento de sus metas u objetivos. Entre los acuerdos mencionados se encuentra la Agenda 2030, que contempla 17 objetivos de desarrollo sostenible, incluido el efecto del cambio climático, considerando como fecha límite el año 2030 para el cumplimiento de estos (Naciones Unidas, n.d.). También, el Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming-Montreal considera 23 metas a cumplir para el 2030 con el objetivo de preservar y gestionar sosteniblemente la biodiversidad (FAO, 2024). Respecto al año 2050, se cuenta con el Acuerdo de París que centra su lucha contra el cambio climático con acciones que logren una neutralidad climática y así evitar que el calentamiento global sobrepase el valor de 1,5 C° en el futuro (Consejo de la Unión Europea, 2024). Por lo anterior mencionado, es que para múltiples investigaciones que abarcan proyecciones a futuro consideran evaluar estos años.

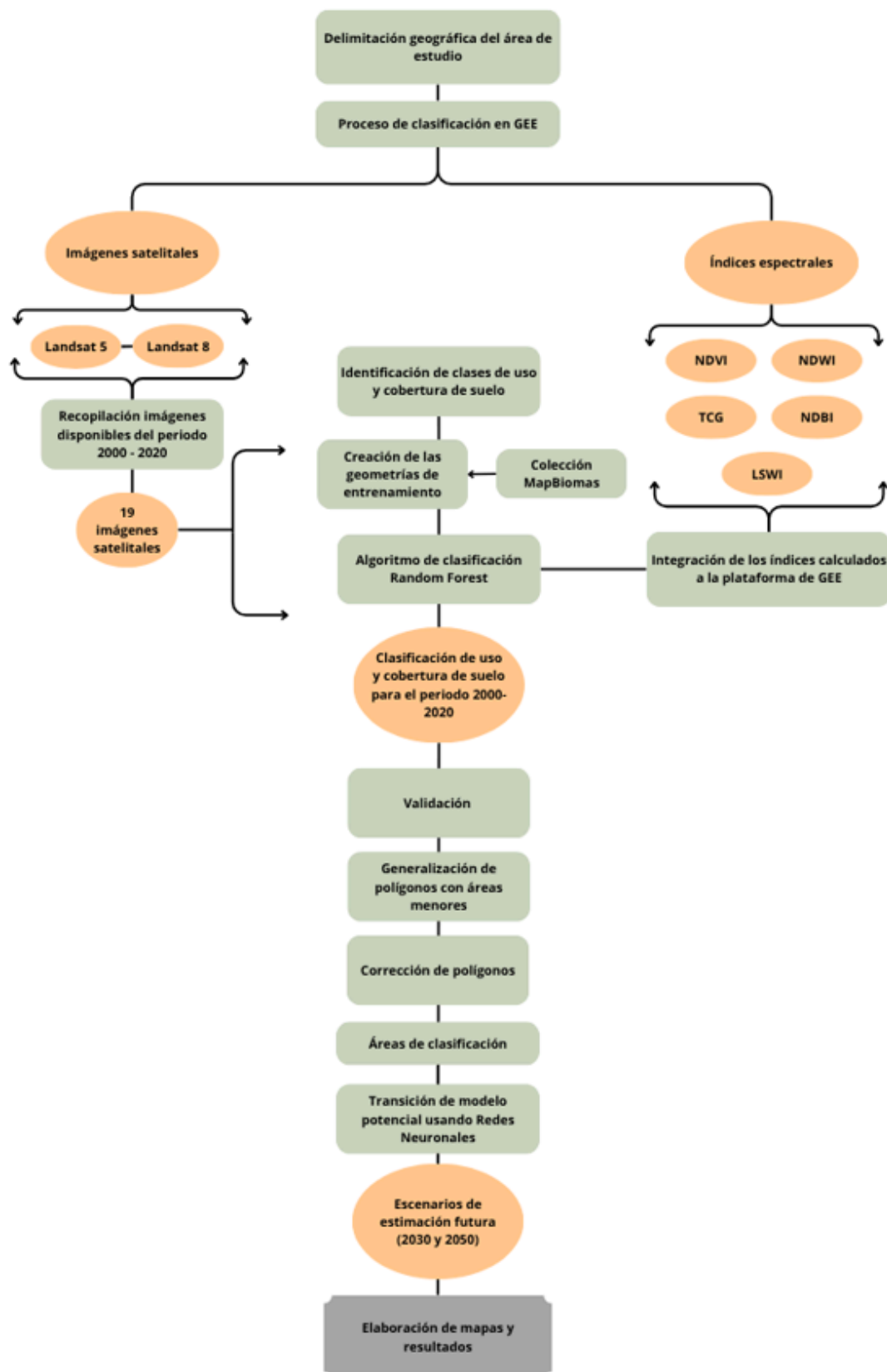
Para conocer la alteración en la extensión y el estado de conservación del humedal Lucre-Huacarpay será necesario utilizar la tecnología de seguimiento de teledetección multitemporal para poder implementar medidas de prevención o restauración para proteger las áreas débiles del ecosistema como un sistema de alerta temprana que evite la pérdida total del ecosistema (Palma et al., 2019). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar el cambio que ocurrió en el humedal Lucre – Huacarpay a causa de factores antropogénicos y climáticos durante el periodo del 2000 al 2020 y así realizar una proyección estimada de los posibles cambios que afectarán este ecosistema para los años 2030 y 2050. De esta manera, se espera influenciar en la toma de decisiones de las autoridades respectivas y contribuir en la conservación de este ecosistema vulnerable.

2. Materiales y metodología

El proceso tuvo como base la clasificación de acceso libre brindado por el MapBiomass, el cual se adaptó para el cumplimiento del objetivo de nuestro proyecto de estudio. Este inicia mediante la obtención de imágenes satelitales e índices espectrales para generar la clasificación de uso y cobertura de suelo del área previamente delimitada. Tanto las imágenes como índices fueron recolectadas de acuerdo con criterios de conveniencia para los objetivos que se van a desarrollar en el proyecto de investigación. Estas clasificaciones fueron posteriormente validadas para asegurar su fiabilidad. Dicho proceso se visualiza en términos generales en el siguiente esquema:

Figura 1

Esquema de proceso de la clasificación de uso y cobertura de suelo



2.1. Área de estudio

El estudio se realizó a base del ámbito o delimitación del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay (Figura 5 y Figura 6). Este se encuentra ubicado en Perú, exactamente, en el departamento de Cusco, provincia de Quispicanchi, distrito de Lucre con una altitud de 3,020 msnm y coordenadas geográficas 13°36'71" S 71°44'21" W. El humedal se encuentra en la ecorregión Puna Húmeda de los Andes Centrales y Yungas Peruanas con principales especies de flora con especies vegetales representativas del área como la totora (*Typha angustifolia*) que sirven como anidamiento y refugio de ornitofauna tanto nativa como migratoria (RAMSAR, 2006).

El clima se encuentra separado en dos periodos, siendo estos la temporada de lluvia con presencia en los meses de noviembre a marzo y la temporada de secas entre los meses de abril a octubre. Presenta una temperatura media anual de 12.3 °C y una precipitación anual de 477.7 mm. El clima en general es seco y templado (RAMSAR, 2006).

Asimismo, el humedal Lucre - Huacarpay presenta el servicio ecosistémico del tipo abastecimiento ya que la población aledaña hace uso del humedal para la extracción de agua para uso doméstico y regadíos, extracción de huevos, la extracción de bloques de adobe para la construcción y de materiales como la *Typha* que es utilizada para elaborar colchones, cestos y botes, con el fin de ser comercializados. Así también, dentro del territorio del humedal se desarrollan actividades como la pesca, la agricultura y la ganadería (RAMSAR, 2006)

Figura 2

Mapa base Humedal Lucre – Huacarpay

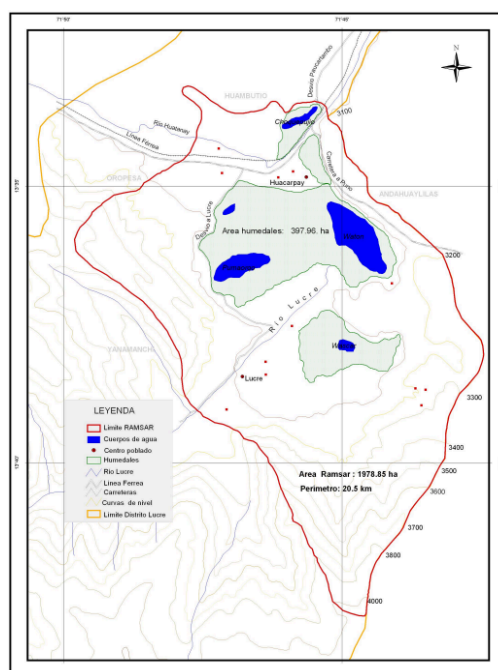
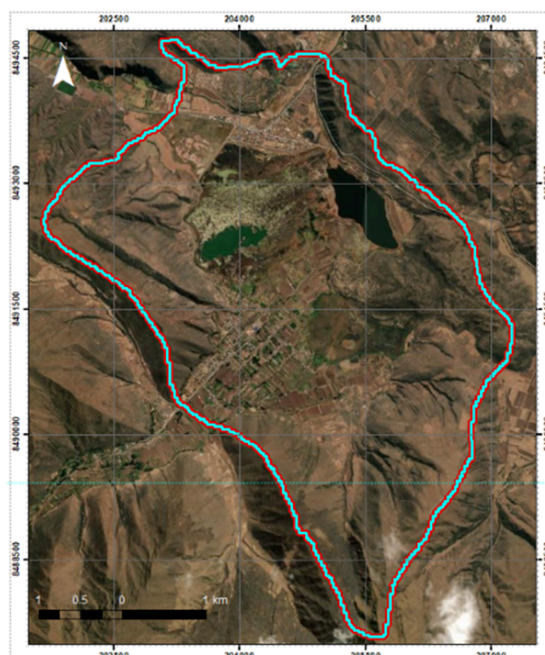


Figura 3

Delimitación del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay



2.2. Método de clasificación

El proceso de clasificación se realizó mediante la programación en el software Google Earth Engine (GEE) el cual se basa en un lenguaje de Java Script (Casco, 2018). Para el proceso de clasificación se realizan en la plataforma a través de los siguientes puntos:

- **Recopilación de datos geospaciales**

Las imágenes satelitales fueron adquiridas del satélite Landsat 5 para el periodo del 2000 al 2011 y Landsat 8 para el periodo del 2013 al 2020. La plataforma GEE presenta la disponibilidad de datos de estos satélites, teniendo como proveedor de los conjuntos de datos al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Dentro de su catálogo se escogieron los conjuntos de imágenes con reflectancia superficial ya que presentaban una corrección atmosférica. Para el objetivo de la investigación se requirió que las imágenes se encuentren dentro del periodo estacional seco, siendo este entre los meses de abril a octubre (RAMSAR, 2006). Además, las imágenes satelitales debían presentar una nubosidad recomendable menor al 35% (USGS, n.d.). El material recolectado sirvió como fuente básica de análisis para analizar el cambio de uso y cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay. Las especificaciones de las imágenes recopiladas se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 1*Características de la data geoespacial utilizadas*

Satélite	Sensor	Imagen satelital	Fecha registrada	Porcentaje de nubosidad
Landsat 5	TM	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20000623	23/06/2000	2%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20010813	13/08/2001	12%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20030819	19/08/2003	12%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20040805	05/08/2004	7%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20050723	23/07/2005	16%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20060827	27/08/2006	24%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20070814	14/08/2007	2%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20080901	01/09/2008	9%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20090819	19/08/2009	15%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20100806	06/08/2010	8%
		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/L T05_004069_20110622	22/06/2011	11%
Landsat 8	OLI	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/ LC08_004069_20130830	30/08/2013	3,66%
		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/ LC08_004069_20140817	17/08/2014	5,81%
		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/ LC08_004069_20150804	04/08/2015	13,4%
		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/ LC08_004069_20160721	21/07/2016	9,93%

		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/ LC08_004069_20170724	24/07/2017	2,14%
		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/ LC08_004069_20180828	28/08/2018	13,84%
		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/ LC08_004069_20190815	15/08/2019	12,23%
		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/ LC08_004069_20200817	17/08/2020	9,66%

Para los años 2002 y 2012 no se encontraron imágenes satelitales que se adecuarán a los criterios preestablecidos. En cuanto al año 2002 se encontraron 2 imágenes, la primera en el mes de enero con una nubosidad del 58% y la segunda imagen también es del mes de enero con una nubosidad del 80%. Por otro lado, para el año 2012 no se encontraron imágenes registradas en ningún mes del año.

- ***Determinación de la tipología de las categorías de clasificación***

Para iniciar con el proceso de clasificación fue necesario delimitar el área de interés la cual contendría la zona de estudio. Es así, que se optó por utilizar como base el área delimitada por el Ramsar para la creación de un polígono que posteriormente sería integrado a la plataforma de GEE. Los datos de entrenamiento fueron generados en base a la información de MapBiomias identificándose las siguientes clases:

Tabla 2

Clases identificadas proyecto Map Biomias Colección N°02

Clase	Código	Observación
Mosaico agropecuario	21	Sin modificaciones
Matorral y otras formaciones no boscosas	13	Estas clases por los objetivos del proyecto y escala cartográfica se agrupan en cobertura vegetal.
Pastizal/herbazal	12	
Bosque	3	
Plantación Forestal	9	
Otra área sin vegetación	25	Debido a la resolución y alcance del dataset esta clase parcialmente en el área de estudio se fotointerpreta y actualizó a humedal altoandino
Lago	33	Sin modificaciones
Infraestructura (urbana)	24	Sin modificaciones

Las clases encontradas en la colección de Map Biomas fueron adaptadas y corregidas a fin de tener datos de entrenamiento de calidad, cumpliendo con los criterios de coherencia y consistencia cartográfica.

Además, también se utilizó la plataforma de Google Earth Pro para garantizar la existencia de esos tipos de clase de uso y cobertura de suelo en el área de estudio mediante imágenes satelitales de alta resolución.

De igual manera, se emplearon diferentes combinaciones de bandas de Landsat 05 como SR_B3/SR_B2/SR_B1, SR_B5/SR_B4/SR_B3 y SR_B7/SR_B3/SR_B2 y de Landsat 08 como SR_B4/SR_B3/SR_B2, SR_B6/SR_B5/SR_B4 y SR_B7/SR_B4/SR_B3, para una mejor precisión de discriminación de cada clase de cobertura.

- ***Aplicación del algoritmo Random Forest***

Para la clasificación supervisada, se decidió optar por el algoritmo Random Forest en la plataforma de GEE, cuyo entrenamiento fue establecido con 100 árboles de decisiones y el complemento con índices espectrales como los índices de vegetación (NDVI y TCG) presencia de agua (NDWI y LSWI) y suelos con infraestructuras (NDBI) para una mayor distinción de las clases a evaluar durante el periodo establecido. Estos fueron calculados de manera automática mediante el código de programación

- ***Validación de la clasificación***

Se sometieron las clasificaciones a un proceso de validación a través de la plataforma de QGis para construir métricas de evaluación como una matriz de confusión. Para esto se determinó en el complemento de la plataforma llamado AcATaMa una muestra estratificada por categoría de 50 puntos aleatorios con distancia mínima de 30 metros y semilla aleatoria de 40. Para validar los resultados obtenidos se estableció como criterio mínimo aceptable una precisión global de la matriz de confusión del 80% (Fajardo & Fernandez, 2022). A partir de esta matriz se calculó otra medida de exactitud como el índice de coeficiente Kappa calculado a través de la siguiente ecuación (Cohen, 1960):

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c}$$

Donde:

P_0 : Proporción de acuerdo observado

P_c : Proporción de acuerdo esperado por azar

El valor obtenido nos indicó si la clasificación ha identificado correctamente las categorías y si lo ha realizado de mejor que si se hubiera asignado de forma aleatoria. Estos valores pueden ser asignados del 0 al 1 como se observan en la siguiente tabla:

Tabla 3*Fuerza de concordancia del índice Kappa de Cohen*

El índice Kappa de Cohen	Fuerza de concordancia
0	No hay concordancia
0.10 - 0.20	Muy poca concordancia
0.21 - 0.40	Poca concordancia
0.41 - 0.60	Concordancia moderada
0.61 - 0.80	Concordancia sustancial
0.81 - 1	Casi perfecta concordancia

Según la presente tabla de coeficiente Kappa, se esperó conseguir un rango superior o igual a la fuerza de concordancia sustancial (Landis & Koch, 1977) para garantizar la fiabilidad de la clasificación.

- ***Corrección cartográfica de la clasificación***

La primera corrección se realizó para eliminar el ruido presente en la clasificación el cual vendría a ser las áreas menores a 5000 m² (unidad mínima cartografiable). Posteriormente, también se realizó una segunda corrección destinada a aumentar la precisión del usuario de las clasificaciones que obtuvieron porcentaje de fiabilidad menor a 80% utilizando la fotointerpretación de las imágenes base recopiladas previamente por año. Ambas correcciones se realizaron en el programa de software ArcMap en la cual se transformaron los ráster en polígonos para ser editados.

- ***Elaboración de matriz de transición y mapas de clasificación durante el periodo 2000 – 2020***

Se utilizaron las clasificaciones corregidas y validadas para crear mapas de clasificación de uso y uso y cobertura de suelo para cada año estudiado. Además, para conocer mejor las clasificaciones que presentaron cambios en su área durante el periodo de estudio, se realizó una matriz de transición con el uso del software ArcMap. En este se optó por la codificación de las clases del año inicial y final para realizar una suma de códigos de clase con la herramienta de Raster Calculator del Map Algebra. Finalmente se obtuvo una tabla con las clases que presentaron cambios para su representación gráfica en mapa. Esto se realizó tanto para el Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay como para el humedal y las clases que interactuaron con este.

2.3. Método de proyección

La proyección consistió en la construcción de una red neuronal artificial (ANN), que permita pronosticar en una regresión la dinámica futura de los humedales altoandinos. La tecnología implementada corresponde a los métodos de aprendizaje de máquina. Hughes et al (2022) implementó el algoritmo de Random Forest (RF) para predecir a nivel de regresión la migración intermareal de un humedal en zonas costeras. Con los datos en áreas estimadas entre 2000 y 2020 se implementó una red neuronal artificial mixta que combina redes neuronales densas y redes recurrentes LSTM (Long short-term memory). Estas redes neuronales son comúnmente usadas en problemas de regresiones y permiten capturar la distribución y variabilidad de diferentes problemas de series de tiempo y distribuciones espaciales como la evaluación del NDVI en humedales altoandinos, sucesiones ecológicas y calidad de efluentes en bofedales (Wang et al, 2022; Tseng et al, 2024; Yang et al 2023).

La estructura de la red artificial implementada tiene la estructura LSTM + Dense + Dense + Dense. La capa LSTM contó con 600 neuronas y una aleatoriedad de inferencias (Dropout) de 0.01, seguidamente dos capas densas de 100 y 600 neuronas con un Dropout de 0.01 y una capa de salida con dos neuronas densas que realizan la inferencia.

```
# -----
inp = Input(shape=(window_size, 3))
x = LSTM(600, return_sequences=False, kernel_regularizer=l2(1e-4))(inp)
x = Dropout(0.01)(x)
x = Dense(100, activation="linear", kernel_regularizer=l2(1e-4))(x)
x = Dropout(0.01)(x)
x = Dense(600, activation="linear", kernel_regularizer=l2(1e-4))(x)

out = Dense(2, activation="linear")(x)

model = Model(inp, out)
model.compile(optimizer="adam", loss="mae")
model.summary()
```

Como optimizador se consideró “adam”, este optimizador calcula la media móvil de los momentos de primer y segundo orden para adaptar la tasa de aprendizaje, mientras que la función de pérdida penaliza el error absoluto medio (mae) con el objetivo de encontrar pesos que pronostiquen acertadamente el retroceso del humedal altoandino sano versus cobertura de humedal altoandino degradada.

3. Resultados

3.1. Análisis de clasificación supervisada

- *Categorías identificadas de uso y cobertura de suelo bajo la clasificación de Random Forest*

Del análisis de las imágenes satelitales con sus respectivas bandas espectrales empleadas en el trabajo de investigación, se identificaron 7 categorías de cobertura de suelo (Humedal, suelo desnudo, infraestructura, agricultura, laguna, cobertura vegetal y humedal degradado), las cuales fueron clasificadas del Nivel I, Nivel II y Nivel III de Corine Land Cover adaptada

para Perú (MINAM, 2014) y adaptada para Colombia por ausencia de la categoría de laguna (IDEAM, 2010). Estas categorías sirvieron para el análisis cuantitativo multitemporal en la presente zona de estudio. En la Tabla 4 se detallan las categorías.

Tabla 4

Categorías de uso y cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay

Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nombre de Clase
1. Áreas artificializadas	1.1. Áreas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo	Infraestructura
2. Áreas agrícolas	-	-	Agricultura
3. Bosques y áreas mayormente naturales	3.3. Área con vegetación herbácea y/o arbustivo	3.3.4. Vegetación arbustiva y/o herbácea	Cobertura vegetal
	3.4. Área sin o poca vegetación	3.4.3. Tierras desnudas	Suelo desnudo
4. Áreas húmedas	1.1. Áreas húmedas continentales	-	Humedal sano
			Humedal degradado
5. Superficies de agua	5.1. Aguas continentales	-	Laguna

→ **Infraestructura:**

Dentro de esta clasificación se consideraron los espacios con presencia de edificaciones y los espacios adyacentes de la infraestructura, las cuales llegan a cubrir más del 80% de la superficie del terreno. Es decir, incluyen las casas con individuales con presencia de jardín y áreas verdes, áreas cubiertas por asfalto o cemento, áreas de recreación y servicios públicos como escuelas, mercados, parqueaderos, hoteles; entre otros.

Figura 4

Infraestructura en el área de estudio



→ **Agricultura:**

La clase fue identificada como territorios agrícolas generalmente presentes en el área de estudio, los cuales están comprendidas principalmente a áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios y áreas agrícolas heterogéneas (mosaico de cultivos).

Figura 5

Agricultura en el área de estudio



→ **Cobertura vegetal:**

Esta categoría comprende los grupos de cobertura natural densa cuyo crecimiento se basa en crecimiento arbustivo y herbáceo sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales que no llegan a tener mucha intervención antrópica.

Figura 6

Cobertura vegetal en el área de estudio



→ **Suelo desnudo:**

Dentro de esta clasificación se consideraron las superficies de terreno con escasa o nula vegetación. Esta característica puede deberse al estado natural de la zona (superficie montañosa) o como consecuencia de condiciones climáticas extremas y/o alteraciones antropogénicas.

Figura 7

Suelo desnudo en el área de estudio



→ **Humedal:**

Dentro de esta clasificación se consideraron las superficies anegadizas, es decir terreno inundable con presencia de cuerpos de agua como lagunas permanentes, intermitentes y estacionales, además de presencia de vegetación en la mayor parte del área.

Figura 8

Humedal en el área de estudio



→ **Laguna:**

Dentro de esta clasificación se consideraron los cuerpos de agua dentro del área del humedal, pueden ser del tipo estacional, intermitente o permanente.

Figura 9

Laguna en el área de estudio



→ **Humedal deteriorado:**

Dentro de esta clasificación se consideraron las áreas con vegetación con baja vigorosidad por efecto del estrés hídrico probablemente ocasionado por factores climáticos y/o antropogénicos. Además, este terreno presentó reducción en la saturación del suelo por disminución de la humedad y alteraciones del ecosistema.

Figura 10

Humedal deteriorado en el área de estudio



- **Análisis de cambio de uso y cobertura de suelo ocurridos en el periodo 2000 al 2020**

Luego del previo análisis de las imágenes satelitales, se generaron mapas de cobertura y uso de suelo para cada año analizado dentro del periodo antes mencionado, estos mapas se encuentran presentados en Anexo 3 y 4. Para evaluar los cambios en el área de estudio se eligieron principalmente el año inicial (2000) y el año final (2020) del periodo de estudio los cuales se describen a continuación:

- **Uso y cobertura de tierra del Sitio Ramsar Humedal Lucre-Huacarpay año 2000**

→ **Matriz de confusión de la clasificación de coberturas del 2000**

Para el año 2000 se obtuvo una matriz de confusión donde se detalla la fiabilidad del productor y del usuario, así como también la precisión global. Esto se muestra en la Tabla 12:

Tabla 5

Matriz de confusión del año 2000

Categorías	Hu med al	Suel o desn udo	Infr aest ruct ura	Agri cult ura	Lag una	Cobe rtura veget al	Hume dal deteri orado	Tot al	Fiabilidad del usuario (%)
Humedal	48	0	0	2	0	0	0	50	96,00
Suelo desnudo	0	47	0	3	0	0	0	50	94,00
Infraestructura	0	10	36	4	0	0	0	50	72,00
Agricultura	3	14	1	29	0	3	0	50	58,00
Laguna	0	0	0	0	50	0	0	50	100
Cobertura vegetal	1	2	0	4	0	42	1	50	84,00
Humedal deteriorado	23	0	0	1	0	3	23	50	46,00
Total	75	73	37	43	50	48	24	350	Fiabilidad global
Fiabilidad del productor	72,36	80,92	61,39	74,12	100	92,00	78,00		81.46

En la presente tabla # se tiene la fiabilidad tanto del usuario, productor y global a base de 50 puntos por categoría. En la primera fila se indica que para la categoría de humedal se clasificaron correctamente 48 puntos y que los dos puntos restantes fueron falsos positivos ya que pertenecían a la clasificación de agricultura, obteniendo una fiabilidad de usuario o clase del 96%. En cuanto al suelo desnudo 47 puntos fueron clasificados correctamente y 3 pertenecían a la clase de agricultura, consiguiendo una fiabilidad del 94%. En cuanto a la infraestructura 36 puntos fueron clasificados correctamente mientras que 10 pertenecían a la clase de suelo desnudo y 4 a la clase de agricultura, consiguiendo así una fiabilidad del 72%. En el caso de la clase de agricultura, 29 puntos fueron clasificados de forma correcta con errores de 3 puntos que pertenecían a la clase de humedal, 14 puntos a suelo desnudo, 1 a infraestructura y 3 a cobertura vegetal, obteniendo una fiabilidad del 58%. Respecto a la clase de laguna, los 50 puntos fueron clasificados correctamente con una fiabilidad del usuario del 100%. Referente a la clase de cobertura vegetal, 42 puntos tuvieron una clasificación correcta, mientras 1 punto pertenecía a humedal, 2 a suelo desnudo, 4 a agricultura y 1 a humedal deteriorado, obteniendo una fiabilidad del 84%. Para el humedal degradado 23 puntos fueron clasificados correctamente mientras que 23 puntos pertenecían a humedal, 1 a agricultura y 3 a cobertura vegetal, consiguiendo así una fiabilidad del 46%. Además, se obtuvo un porcentaje de fiabilidad global del 81,46%, estando dentro del rango aceptable de clasificación. Al obtener porcentajes bajos que no cumplan con el mínimo del 80% para las categorías de humedal degradado, agricultura e infraestructura, se optó por realizar una corrección manual de dichas categorías basadas principalmente en la fotointerpretación de las imágenes satelitales base. De esta manera, se aseguró incrementar la fiabilidad de cada clase en particular.

→ Índice de coeficiente Kappa

Para conocer mejor la validez de precisión se evaluó la índice kappa a base de los resultados de la matriz de confusión en las siguientes ecuaciones:

$$P_0 = \frac{(48+47+36+29+50+42+23)}{350}$$

$$P_0 = 0,79$$

$$P_e = \frac{((75 \times 50) + (73 \times 50) + (37 \times 50) + (43 \times 50) + (50 \times 50) + (48 \times 50) + (24 \times 50))}{(350 \times 350)}$$

$$P_e = 0,14$$

$$K = \frac{0,79 - 0,14}{1 - 0,14}$$

$$K = 0,75$$

Con estos resultados se puede observar que la clasificación del 2000 un índice Kappa de 0,75 o 75%, lo cual indica que a base de la fuerza de concordancia este se encuentra en un estado sustancial y aceptable.

→ **Categorías de clasificación encontradas en el año 2000**

En cuanto a la identificación establecida de categorías en el año 2000 del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay (Figura #), específicamente en el análisis del humedal, se obtuvo que este abarcaba 293,7 ha del área de estudio, representando un 14,7% de superficie de las 1994,7 ha totales. Asimismo, la categoría de humedal deteriorado abarcó 13,1 ha lo cual representa un 0,7% del área total de estudio. Estos resultados, junto a las demás clases se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 6

Matriz de confusión del año 2000

Categoría	Área (ha)	Porcentaje (%)
Humedal	293,7	14,7
Suelo desnudo	760,0	38,1
Infraestructura	29,2	1,5
Agricultura	358,4	18,0
Laguna	48,9	2,5
Cobertura vegetal	491,4	24,6
Humedal deteriorado	13,1	0,7
Total	1994,7	100

Figura 11

Distribución porcentual de cobertura del 2000

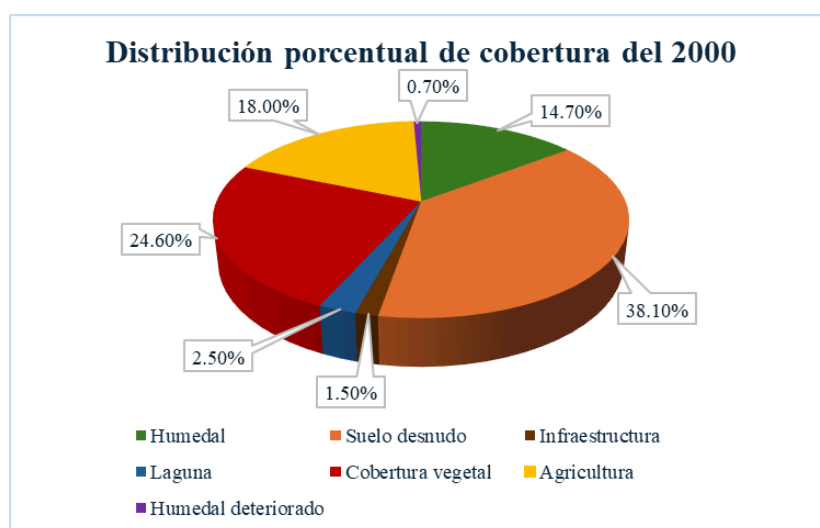
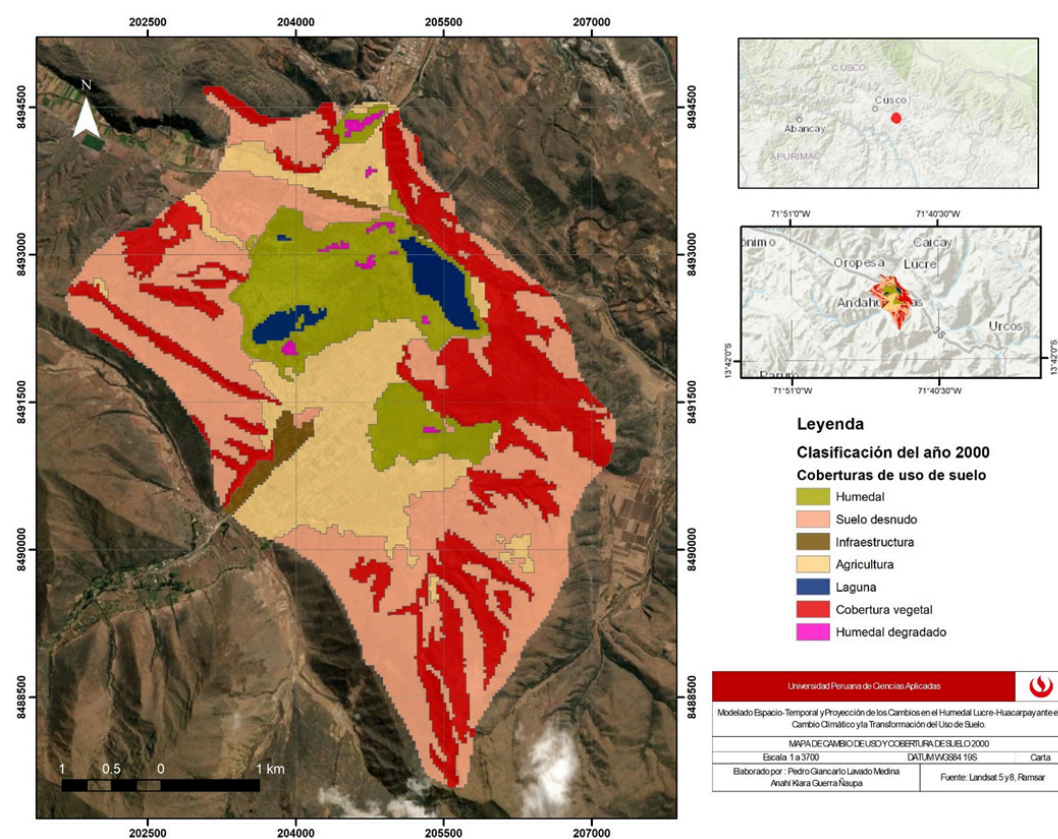


Figura 12

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2000



• **Uso y cobertura de tierra del Sitio Ramsar Humedal Lucre-Huacarpay año 2020**

→ **Matriz de confusión de la clasificación de coberturas del 2020**

Para el año 2020 se obtuvo una matriz de confusión donde se detalla la fiabilidad del productor y del usuario, así como también la precisión global. Esto se muestra en la Tabla 14:

Tabla 7

Matriz de confusión del año 2020

Categorías	Humedal	Suelo desnudo	Infraestructura	Agricultura	Laguna	Cobertura vegetal	Humedal deteriorado	Total	Fiabilidad del usuario (%)
Humedal	39	0	0	3	0	1	7	50	78,00
Suelo desnudo	0	45	0	4	0	1	0	50	90,00

Infraestructura	0	5	38	6	0	0	1	50	76,00
Agricultura	0	3	1	45	0	1	0	50	90,00
Laguna	0	0	0	0	50	0	0	50	100
Cobertura vegetal	2	2	1	4	0	39	2	50	78,00
Humedal deteriorado	4	1	0	1	0	0	44	50	88,00
Total	45	56	40	63	50	42	54	350	Fiabilidad global
Fiabilidad del productor	81,44	93,17	63,67	74,70	100	93,88	66,677		85.833

En la presente tabla # se tiene la fiabilidad tanto del usuario, productor y global a base de 50 puntos por categoría. En la primera fila se indica que para la categoría de humedal se clasificaron correctamente 39 puntos, sin embargo, 3 puntos pertenecían a la clase de agricultura, 1 a la clase de cobertura vegetal y 7 a la clase de humedal deteriorado, obteniendo una fiabilidad de usuario o clase del 78%. En cuanto al suelo desnudo 45 puntos fueron clasificados correctamente, 4 pertenecían a la clase de agricultura y 1 punto pertenecía a la clase de cobertura vegetal, consiguiendo una fiabilidad del 90%. En cuanto a la infraestructura 38 puntos fueron clasificados correctamente mientras que 5 pertenecían a la clase de suelo desnudo, 6 a la clase de agricultura y 1 a la clase de humedal deteriorado, consiguiendo así una fiabilidad del 76%. En el caso de la clase de agricultura, 45 puntos fueron clasificados de forma correcta con errores de 3 puntos que pertenecían a la clase de suelo desnudo, 1 punto a la clase de infraestructura y 1 punto a la cobertura vegetal, obteniendo una fiabilidad del 90%. Respecto a la clase de laguna, los 50 puntos fueron clasificados correctamente con una fiabilidad del usuario del 100%. Referente a la clase de cobertura vegetal, 39 puntos tuvieron una clasificación correcta, mientras que 2 puntos pertenecían a la clase de humedal, 2 a suelo desnudo, 1 punto a infraestructura, 4 puntos a agricultura y 2 puntos a humedal deteriorado, obteniendo una fiabilidad del 78%. Para el humedal degradado 44 puntos fueron clasificados correctamente mientras que 4 puntos pertenecían a humedal, 1 a suelo desnudo y 3 a agricultura, consiguiendo así una fiabilidad del 88%. Además, se obtuvo un porcentaje de fiabilidad global del 85,83%, estando dentro del rango aceptable de clasificación. Al obtener porcentajes bajos que no cumplan con el mínimo del 80% para las categorías de humedal, infraestructura y cobertura vegetal, se optó por realizar una corrección manual de dichas categorías basadas principalmente en la fotointerpretación de las imágenes satelitales base. De esta manera, se aseguró incrementar la fiabilidad de cada clase en particular.

→ **Índice de coeficiente Kappa**

Para conocer mejor la validez de precisión se evaluó la índice kappa a base de los resultados de la matriz de confusión en las siguientes ecuaciones:

$$P_0 = \frac{(39+45+38+45+50+39+44)}{350}$$

$$P_0 = 0,86$$

$$P_e = \frac{((45 \times 50) + (56 \times 50) + (40 \times 50) + (63 \times 50) + (50 \times 50) + (42 \times 50) + (54 \times 50))}{(350 \times 350)}$$

$$P_e = 0,14$$

$$K = \frac{0,86 - 0,14}{1 - 0,14}$$

$$K = 0,83$$

Con estos resultados se puede observar que la clasificación del 2020 un índice Kappa de 0,83 o 83%, lo cual indica que a base de la fuerza de concordancia este se encuentra en un estado casi perfecto.

→ **Categorías de clasificación encontradas en el año 2020**

En cuanto a la identificación establecida de categorías en el año 2000 del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay, específicamente en el análisis del humedal, se obtuvo que este abarcaba 154 ha del área de estudio, representando un 7,7 % de superficie de las 1994,7 ha totales. Asimismo, la categoría de humedal deteriorado abarcó 128,7 ha lo cual representa un 6,5 % del área total de estudio. Los resultados de estas y las demás categorías se presentan en la siguiente tabla # y Figura #:

Tabla 8

Matriz de confusión del año 2020

Categoría	Área (ha)	Porcentaje (%)
Humedal	154	7,7
Suelo desnudo	781,5	39,2
Infraestructura	56,3	2,8
Agricultura	436,3	21,9
Laguna	50	2,5
Cobertura vegetal	388	19,5
Humedal deteriorado	128,7	6,5

Total	1994,7	100
-------	--------	-----

Figura 13

Distribución porcentual de cobertura del 2020

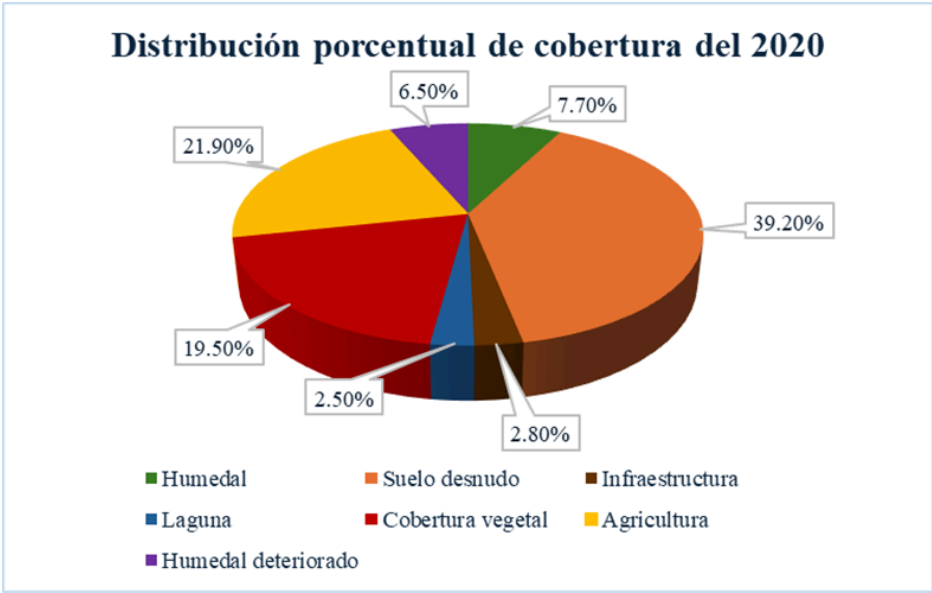
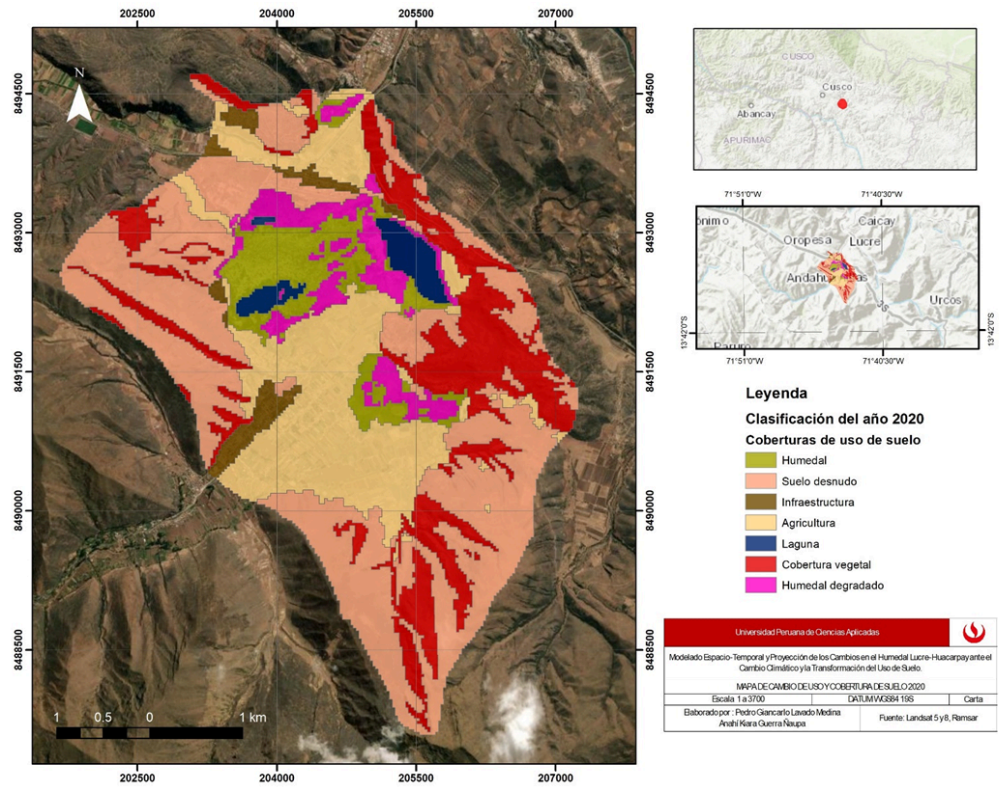


Figura 14

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2020



- ***Análisis de transición de uso y cobertura de suelo para el periodo 2000 a 2020***

El análisis se centró en identificar los cambios de uso y cobertura de suelo para el año inicial y su transición para el año final del periodo de estudio. Se discriminaron las coberturas según su estado de cambio y no cambio. Los resultados se presentan basándose de la matriz de transición:

Tabla 9

Matriz de transición de coberturas del 2000 al 2020

Matriz de transición	Cobertura (2020)	Humedal	Suelo desnudo	Infraestructura	Agrícola	Laguna	Cobertura vegetal	Humedal deteriorado
Cobertura (2000)	Código	10	20	30	40	50	60	70
Humedal	1	11	21	31	41	51	61	71
Suelo desnudo	2	12	22	32	42	52	62	72
Infraestructura	3	13	23	33	43	53	63	73
Agrícola	4	14	24	34	44	54	64	74
Laguna	5	15	25	35	45	55	65	75
Cobertura vegetal	6	16	26	36	46	56	66	76
Humedal deteriorado	7	17	27	37	47	57	67	77

En la presente tabla # se muestran las coberturas del año inicial (2000) y año final (2020) donde se le asignaron códigos propios a cada cobertura (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 para el año 2000 y 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 para el año 2020). Esto con el objetivo de conocer los cambios ocurridos mediante combinaciones numéricas. Las combinaciones resaltadas de color verde significan que no ocurrió ningún cambio en la cobertura asignada; mientras que los no resaltados son aquellos que si presentaron transición de una categoría a otra. Por ejemplo, la combinación numérica 21 es interpretada como una transición del código 1 al código 20; es decir, de la categoría humedal a la categoría suelo desnudo. Con ello se obtuvieron los siguientes resultados de transición:

➔ ***Análisis de cambio de uso y cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay***

Para el área del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay, que abarca las 7 categorías clasificadas, se obtuvieron los siguientes cambios:

Tabla 10*Transición de cambio del Sitio Ramsar Humedal Lucre - Huacarpay*

Códigos	Representación 2000	Representación 2020	Área (ha)	%
15	Laguna	Humedal	1,39	0,07%
17	Humedal deteriorado	Humedal	1,83	0,09%
21	Humedal	Suelo desnudo	4,97	0,25%
24	Agricultura	Suelo desnudo	11,23	0,56%
26	Cobertura vegetal	Suelo desnudo	95,43	4,78%
32	Suelo desnudo	Infraestructura	15,87	0,80%
34	Agricultura	Infraestructura	6,70	0,34%
36	Cobertura vegetal	Infraestructura	3,65	0,18%
41	Humedal	Agricultura	17,24	0,86%
42	Suelo desnudo	Agricultura	62,67	3,14%
46	Cobertura vegetal	Agricultura	15,25	0,76%
47	Humedal deteriorado	Agricultura	0,70	0,03%
51	Humedal	Laguna	2,70	0,14%
62	Suelo desnudo	Cobertura vegetal	9,85	0,49%
71	Humedal	Humedal deteriorado	117,44	5,89%
72	Suelo desnudo	Humedal deteriorado	1,83	0,09%
75	Laguna	Humedal deteriorado	0,26	0,01%
Sin cambio			1.625,66	81,50%
Total			1.994,7	100,00%

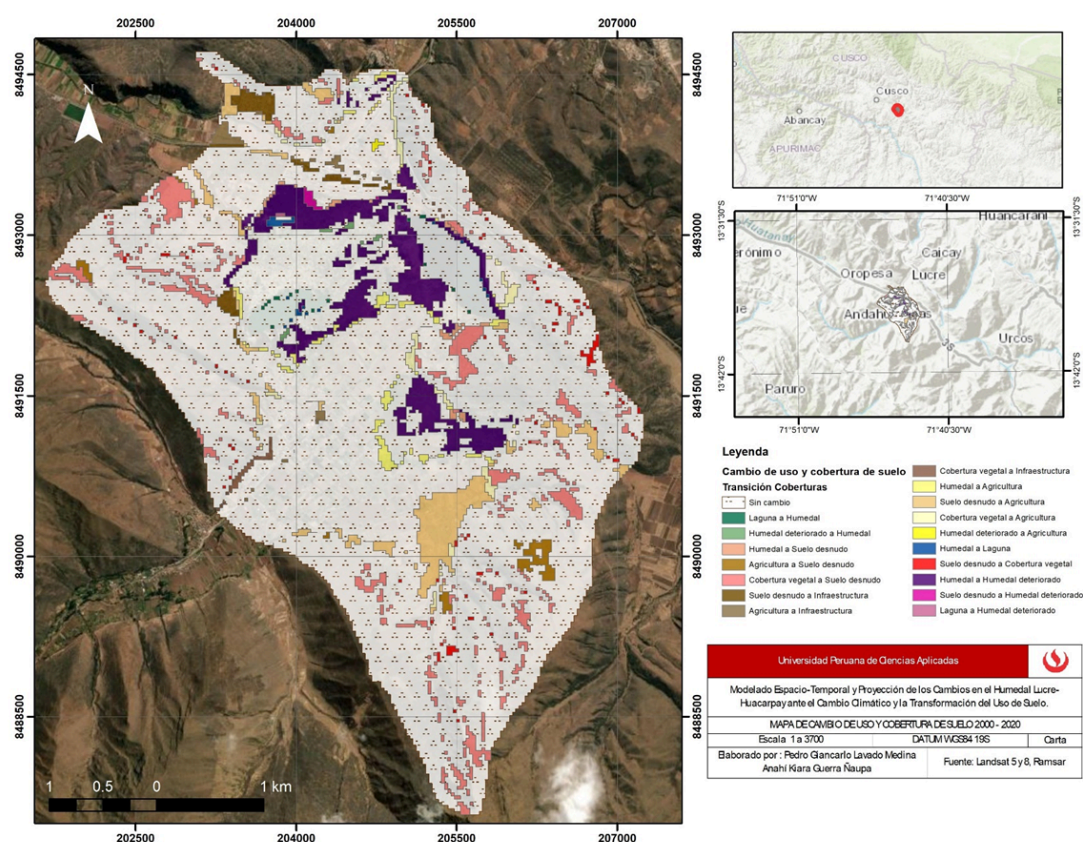
De la presente tabla # de cambios se destacó que 1,625,66 ha o el 81,50% del área total no presentó cambios en el periodo de estudio. Por otro lado, se observó el cambio de cobertura vegetal a suelo desnudo (95,43 ha), la transición de suelo desnudo a agrícola de (62,67 ha) y

la categoría de humedal que transaccionó a humedal degradado en un (117,44) que fue el mayor cambio sucedido en el periodo de estudio.

Asimismo, respecto a la pérdida del humedal, se destaca la transición de la categoría de humedal a suelo desnudo (4,97 ha) del área total, la transición de humedal a agrícola de (17,24 ha) y el cambio de humedal a laguna de (2,70 ha). Con ello se establece que la pérdida del humedal por influencia del cambio de uso y cobertura de suelo a escala del Sitio Ramsar fue del 24,91 ha o un 7,14% del área total.

Figura 15

Mapa de cambio de uso y cobertura de suelo 2000 - 2020



→ *Análisis de cambio de uso y cobertura de suelo del humedal Lucre - Huacarpay*

Para el área del Humedal Lucre – Huacarpay, que abarca principalmente la categoría de humedal y las categorías que presentaron interacción de cambio con estas, se obtuvieron los siguientes cambios:

Tabla 11*Transición de cambio del Humedal Lucre - Huacarpay*

Códigos	Representación 2000	Representación 2020	Área (ha)	%
11	Humedal		150,807	47,95%
15	Laguna	Humedal	1,392	0,44%
17	Humedal deteriorado	Humedal	1,831	0,58%
21	Humedal	Suelo desnudo	4,971	1,58%
41	Humedal	Agricultura	17,242	5,48%
47	Humedal deteriorado	Agricultura	0,698	0,22%
51	Humedal	Laguna	2,701	0,86%
55	Laguna		4,728	1,50%
71	Humedal	Humedal deteriorado	117,443	37,34%
72	Suelo desnudo	Humedal deteriorado	1,833	0,58%
75	Laguna	Humedal deteriorado	0,263	0,08%
77	Humedal deteriorado		10,609	3,37%
Total			314,5	100,00%

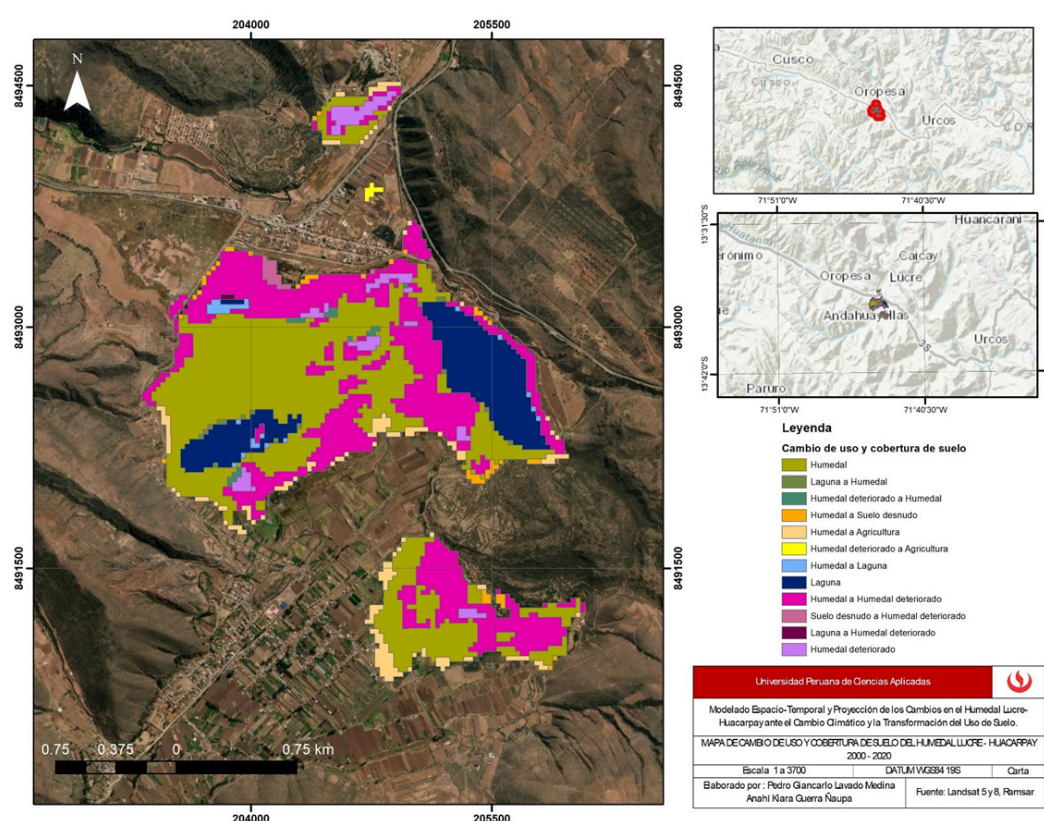
Tabla 12*Estado de cambio del Humedal Lucre – Huacarpay del 2000 al 2020*

Estado del humedal	Área (ha)	%
Se mantuvo humedal	150,807	50,41%
Hubo pérdida	145,151	48,52%
Hubo ganancia	3,223	1,08%
Total	299,182	100,00%

De las anteriores tablas se identificó que el área del humedal que no presentó cambios fue un aproximado del 50,88% del área total del humedal. Así también, se observó que se obtuvo un porcentaje de pérdida del humedal de un 48,52% debido a principalmente la transición de humedal a suelo desnudo (4,971 ha), humedal a agricultura (17,94 ha), humedal la laguna (2,701 ha) y humedal a humedal deteriorado (119,539 ha). De igual forma, estos pueden observarse gráficamente en la figura 16.

Figura 16

Mapa de cambio de uso y cobertura de suelo del Humedal Lucre – Huacarpay 2000 - 2020



Además de lo presentado, se realizó un análisis de la tendencia del humedal degradado y el humedal conservado para todo el periodo de estudio. De los datos estudiados se determinó que el humedal degradado, a pesar de haber mostrado caídas en los años 2005, 2008, 2011, 2014 y 2018, mostró una tendencia de aumento. Por otra parte, el humedal conservado presentó una tendencia de reducción desde el año 2000 hasta el año 2020. Los resultados detallados se muestran en las siguientes gráficas:

Figura 17

Tendencia de cambio del humedal conservado 2000 - 2020

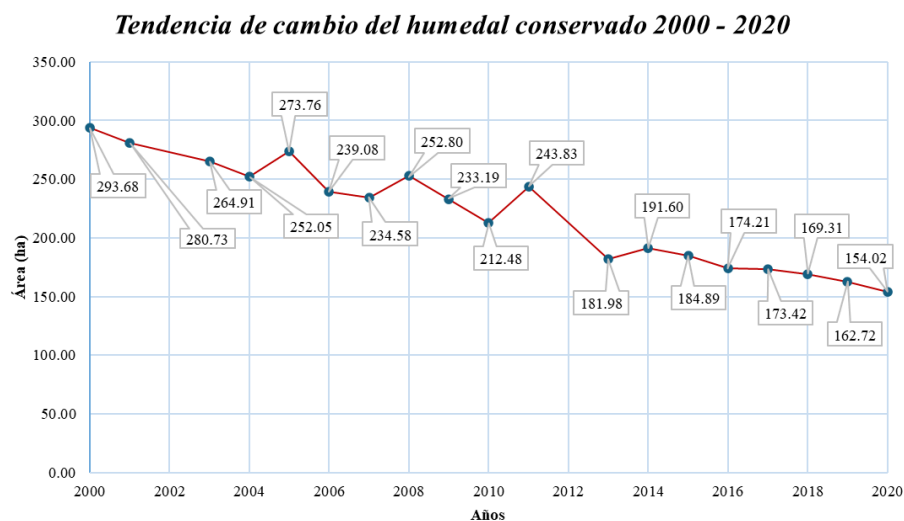
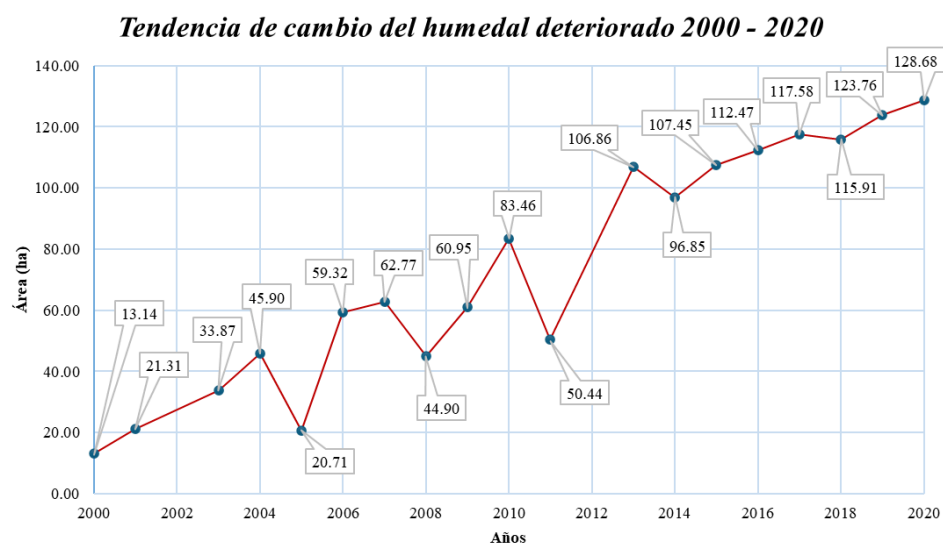


Figura 18

Tendencia de cambio del humedal deteriorado 2000 - 2020



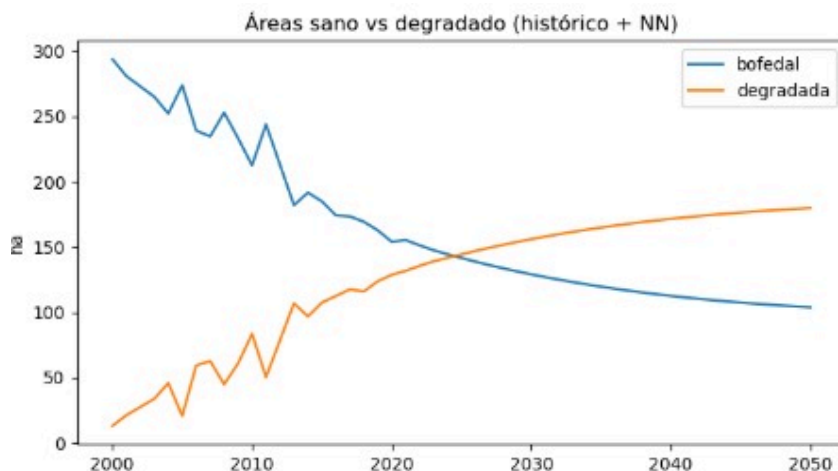
3.2. *Análisis de proyección futura*

Tal como nos presentan las figuras xx y xx donde se evalúa la tendencia respecto a las clases humedal deteriorado (degradado) versus el humedal conservado, ambas líneas siguen una tendencia inversamente proporcional donde las zonas degradadas le quitan espacios al humedal conservado, la aplicación del modelo de inteligencia artificial (IA) permitió estimar que para el 2021 las curvas de pérdida y ganancias se intersectan ocasionando que la cobertura de humedal altoandino conservado (sano) decrece hasta las 100 hectáreas, lo que representa una pérdida estimada del 35% al 2050. Por lo contrario el humedal degradado presenta un aumento equivalente hasta los 160 Ha, que corresponde a 24.50% respecto al área actual. Es

así que para finales del 2050 se espera que bajó la tasa de pérdida anual actual el humedal altoandino pierda el 65% respecto a su cobertura a inicios del siglo.

Figura 19

Proyección de humedal degradado y conservado



4. Discusión

El humedal Lucre - Huacarpay presentó una pérdida del 48,52% de su cobertura. Este comportamiento está relacionado a factores locales como el cambio de uso y cobertura de suelo que genera pérdida en la extensión o afecta la condición del ecosistema haciéndolo más vulnerable.

La pérdida de la cobertura de suelo propia de un humedal, en su mayoría a causa antrópica, es aproximadamente de 0,85% a 1,6% por año (RAMSAR, 2018), por lo que en un periodo de 21 años este equivaldría a una pérdida aproximada del 17,85% a 33,6% de pérdida del total. En cuanto al resultado obtenido en el periodo de estudio, un valor de 5,70% de pérdida se vió representada a causa de la expansión agrícola, donde se demuestra que este no supera el rango mínimo mencionado por el RAMSAR. Este valor atípico se debe a los seguimientos realizados por el RAMSAR, se limita la expansión agrícola para amparar la conservación de este tipo de ecosistemas a través de la Ley General de Aguas promulgada por Decreto Ley No. 17752 (RAMSAR, 2006). Por lo tanto, se puede deducir que la pérdida del humedal no está representada mediante la reducción de su extensión relacionado a la transición de coberturas externas de influencia humana.

La pérdida mayor está subestimada a impactos relacionados con una transición o reducción espacial de coberturas internas del humedal a causa del deterioro de la salud vegetativa, posiblemente por la alteración significativa en patrones climáticos que afecta al ciclo hídrico del humedal por el cambio climático. La cobertura vegetal puede transicionar de vigorosa a no vigorosa a lo largo de los años en épocas de sequía (Silva, 2019). Además, se evidencia en la alteración de los Humedales de Importancia Internacional con presencia de pérdida neta de superficie a consecuencia de la desecación (Xi et al. 2021) y sus múltiples impactos sobre la biodiversidad y servicios ecosistémicos (Harrison et al. 2018). En el caso del humedal Lucre - Huacarpay, este se encuentra en una zona que presenta riesgo de sequía extrema del tipo medio y alto (CENEPRED, 2023) lo cual podría ser la causa principal del deterioro vegetativo. Según el presente estudio el humedal se demostró su deterioro mediante el estado en la vegetación cuya área afectada fue incrementando durante el periodo de estudio, logrando afectar a un 38,01% del humedal. Sin embargo, si no se encuentra correlación con

las variaciones climáticas, es posible que dicho deterioro se deba a los factores antropogénicos como la contaminación por lavado de ropa, el pastoreo dentro del humedal, la quema de totora y la contaminación por desechos ganaderos (RAMSAR, 2006).

La proyección mediante redes neuronales, permite cuantificar y pronosticar el deterioro del área humedal conservado, esta cuantificación puede ser integrada en planes locales como el plan de desarrollo local concertado, plan de adaptación y gestión de riesgos y plan de adaptación y mitigación al cambio climático. La estimación realizada tiene un error medio absoluto de (0.1350) lo que significa que presenta un error del 13.50 %, esta estimación puede mejorar al incluir variables meteorológicas que permitan una mejor cuantificación de la variabilidad espacial.

5. Conclusiones

- El análisis multitemporal del humedal Lucre–Huacarpay reveló una pérdida acumulada del 48,52 % de su cobertura conservada entre los años 2000 y 2020, resultado de la conversión de ecosistema sano en áreas degradadas, agrícolas, de infraestructura y suelos desnudos. Este proceso de transformación evidencia una presión creciente sobre el ecosistema, generada principalmente por actividades antrópicas como la agricultura intensiva, el sobrepastoreo, la urbanización informal y la contaminación por aguas servidas.
- La simulación de escenarios futuros mediante redes neuronales artificiales (modelo LSTM + Dense) mostró que, de mantenerse las tendencias actuales, para el año 2050 el humedal sano se reduciría a aproximadamente 100 hectáreas, lo que implicaría una pérdida del 65 % respecto a su cobertura inicial. En paralelo, se proyecta un aumento del humedal degradado a 160 hectáreas, confirmando una dinámica de reemplazo ecológico preocupante.
- La principal transformación observada fue la transición del humedal conservado a humedal deteriorado, atribuida a factores como el estrés hídrico, el cambio en la frecuencia de precipitaciones, el aumento de temperatura, y las malas prácticas locales, lo que refleja una pérdida de funcionalidad ecosistémica progresiva.
- A pesar de la existencia de instrumentos legales de protección, como la Ley General del Ambiente (Ley N.º 28611) y la Ley N.º 32099 sobre humedales, su aplicación no ha sido suficiente para frenar la degradación. Las debilidades institucionales, la falta de seguimiento técnico y el bajo nivel de conciencia ambiental han impedido una gestión eficaz del sitio RAMSAR Lucre–Huacarpay.
- Se propone la incorporación permanente de sistemas de monitoreo remoto para detectar alertas tempranas de deterioro, así como el fortalecimiento de capacidades locales en el uso de tecnologías geoespaciales. Igualmente, se recomienda articular políticas de conservación con estrategias de desarrollo rural sostenible que tomen en cuenta el valor ecológico, cultural y económico del humedal.
- En conclusión, el estudio demuestra que el uso de tecnologías de teledetección y modelado predictivo puede ser una herramienta fundamental para la planificación territorial y la toma de decisiones informadas. Sin acciones concretas e integrales, el humedal Lucre–Huacarpay corre el riesgo de desaparecer como ecosistema funcional.

Referencias bibliográficas

- Aponte, H., Gonzales, S., & Gomez, A. (2020). Drivers of change in the wetlands of Latin America: The case of the coastal wetlands of Lima. *South Sustainability*, e023. <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-023>
- Aponte-Saravia, J., & Ospina-Noreña, J. E. (2019). Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales altoandinos. *Revista de Teledetección*, 53, 59. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.10580>
- Aslam, R. W., Shu, H., Tariq, A., Naz, I., Ahmad, M. N., Quddoos, A., Javid, K., Mustafa, F., & Aeman, H. (2024a). Monitoring landuse change in Uchhali and Khabeki wetland lakes, Pakistan using remote sensing data. *Gondwana Research*, 129, 252–267. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.12.015>
- Banerjee, S., Pal, O., Ahmad, T., Kanga, S., Singh, S. K., & Sajan, B. (2025). Spatial Variability Assessment on Staple Crop Yields in Hisar District of Haryana, India Using GIS and Remote Sensing. *Revue Internationale de Géomatique*, 34(1), 71–88. <https://doi.org/10.32604/riig.2025.057963>
- Camas Guardamino, D. J., & Mamani Sinche, M. S. (2022). Evaluación de la vegetación y saturación del suelo en el Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla mediante teledetección en Perú, 2006-2021. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 54–74. <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.3>
- Casco F. (2018). Introducción a Java Script para Google Earth Engine (GEE). Ficha técnica #1
- CENEPRED. (2023). *ESCENARIOS DE RIESGO ANTE SEQUÍA DE LA REGIÓN CUSCO*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/16597>
- Chamorro, A., Salcedo, D., Flores, M., & Gonnet, J. (2021). *Manual de buenas prácticas en manejo y restauración de bofedales en Marcapomacocha*.
- Cohen, J. (1960). Un coeficiente de concordancia para escalas nominales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Congreso de la República. (2017). *Ley N.º 28611*.
- Consejo de la Unión Europea. (2024). *Acuerdo de París sobre el cambio climático*.
- Demarquet, Q., Rapinel, S., Gore, O., Dufour, S., & Hubert-Moy, L. (2024). Continuous change detection outperforms traditional post-classification change detection for long-term monitoring of wetlands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 133, 104142. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104142>
- Fajardo, B., & Fernandez, J. (2022). Thematic accuracy in two glacier cover identification methods: manual and semi-automated. *Las Montañas Nuestro Futuro*.
- Farhan, M., Wu, T., Amin, M., Tariq, A., Guluzade, R., & Alzahrani, H. (2024a). Monitoring and prediction of the LULC change dynamics using time series remote sensing data with Google

- Earth Engine. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 136, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103689>
- FAO. (2022). *Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente*.
- FAO. (2024). *Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming-Montreal*.
- Farhan, M., Wu, T., Amin, M., Tariq, A., Guluzade, R., & Alzahrani, H. (2024). Monitoring and prediction of the LULC change dynamics using time series remote sensing data with Google Earth Engine. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 136, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103689>
- Flores, N., Castro, I., & Aponte, H. (2020). Evaluación de las unidades de vegetación en Los Pantanos De Villa (Lima, Perú) mediante Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. *Arnaldoa*, 27, 176–185.
- Hoyos Gonzales, A. I., Quinteros Camacho, N. L., & Crisólogo Rodríguez, M. E. (2022). Evaluación multitemporal de la superficie del Humedal Huacho-Hualmay-Carquín entre los años 1986 y 2019. *South Sustainability*, e053. <https://doi.org/10.21142/SS-0301-2022-e053>
- IDEAM. (2010). *LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA*.
- Khan, M. F., Islam, M. K., & Chowdhury, M. A. (2024). Spatio-temporal assessment and prediction of wetlands: Examining the changes in ecosystem service value of RAJUK DAP area using Artificial Neural Network and Geospatial Techniques. *Heliyon*, 10(14), e34327. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34327>
- Kauth, R., & Thomas, G. (1976). The Tasselled Cap -- A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. *LARS Symposia*, 159.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, 159–174.
- Li, B., Wan, R., Yang, G., Yang, S., Dong, L., Cui, J., & Zhang, T. (2024). Centennial loss of lake wetlands in the Yangtze Plain, China: Impacts of land use changes accompanied by hydrological connectivity loss. *Water Research*, 256, 121578. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121578>
- Llanos, C. (2022). *Evaluación de condiciones ecosistémicas de los humedales urbanos en Quilicura - Lampa ante el cambio climático y la influencia antrópica durante el periodo 1985-2020*. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Lopez, H., & Cetzal, W. (2024). Los humedales y su flora, una interacción de importancia para la conservación de la avifauna. *Desde El Herbario CICY*, 16, 17–23
- Mahmood, M. R., Abrahem, B. I., Jumaah, H. J., Alalwan, H. A., & Mohammed, M. M. (2025). Drought monitoring of large lakes in Iraq using remote sensing images and normalized difference water index (NDWI). *Results in Engineering*, 25, 103854. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103854>

- Mallqui, S. (2016). *Valoración ecológica - económica del recurso hídrico en el humedal Lucre – Huacarpay, Cusco*. UNSAAC.
- MINAM. (2011). IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CULTIVOS ANUALES DE LAS REGIONES DE CUSCO Y APURÍMAC. *Programa de Adaptación al Cambio Climático-PACC*.
- MINAM. (2014). *Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Cobertura Andina* (Primera edición).
- MINAM. (2016). *Experiencias sobre la aplicación de los instrumentos metodológicos del SNIP, incorporando la GdR en un contexto de Cambio Climático*
- MINAM. (2021). *Decreto Supremo N.º 006-2021-MINAM*.
- MapBiomias - Colección 2.0 de la Serie anual de 2000 a 2020 de Mapas de Cobertura y Uso del suelo de Perú, consultada el 13 de enero a través del enlace: <https://peru.mapbiomas.org/colecciones-de-mapbiomas-peru/>
- Moya, B., Hernández, A., & Elizalde, H. (2005). LOS HUMEDALES ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Investigaciones Geográficas*, 37, 127–132.
- Naciones Unidas. (n.d.). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*.
- Paira, M. (2021). *LA IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES Y EL DERECHO A UN MEDIO AMBIENTE SANO*. Universidad Siglo 21.
- Palma, M., Torres, J., Cisneros, H., Caliri, M., Ordoñez, M., & Gorla, N. (2019). Aportes de la teledetección para la caracterización de amenazas para la conservación del sitio Ramsar humedal Llacanelo, Malargüe, Argentina. *Boletín De Estudios Geográficos*, 112, 83–113.
- Quispe-Charca, A. A. (2022). Valoración económica de los servicios ecosistémicos de la bahía interior de Puno, 2020. *Semestre Económico*, 11(2), 35–48. <https://doi.org/10.26867/se.2022.v11i2.136>
- RAMSAR. (2006). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR).
- RAMSAR. (2010). Políticas Nacionales de Humedales. *Manuales Ramsar Para El Uso Racional de Los Humedales*, 4ª Edición, 2.
- RAMSAR. (2018). *PERSPECTIVA MUNDIAL SOBRE LOS HUMEDALES*
- RAMSAR. (2021). *Perspectiva mundial sobre los humedales : Edición especial de 2021*.
- Roy, B., & Rahman, M. Z. (2023). Spatio-temporal analysis and cellular automata-based simulations of biophysical indicators under the scenario of climate change and urbanization using artificial neural network. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 31, 100992. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100992>

- Saha, T. K., Pal, S., & Sarkar, R. (2021). Prediction of wetland area and depth using linear regression model and artificial neural network based cellular automata. *Ecological Informatics*, 62, 101272. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101272>
- Sajan, B., Mishra, V. N., Kanga, S., Meraj, G., Singh, S. K., & Kumar, P. (2022). Cellular Automata-Based Artificial Neural Network Model for Assessing Past, Present, and Future Land Use/Land Cover Dynamics. *Agronomy*, 12(11), 2772. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112772>
- Senamhi. (2016). *Análisis del riesgo de sequías en el sur del Perú*.
- Seyam, M. M. H., Haque, M. R., & Rahman, M. M. (2023). Identifying the land use land cover (LULC) changes using remote sensing and GIS approach: A case study at Bhaluka in Mymensingh, Bangladesh. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100293. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100293>
- Sinia. (2013). *Humedal Lucre de Huacarpay*.
- Singh, R., Saritha, V., & Pande, C. B. (2024). Dynamics of LULC changes, LST, vegetation health and climate interactions in Wetland buffer zone: A remote sensing perspective. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 135, 103660. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103660>
- Silva, G. (2019). *Vigor de la hierba pepinillo en un pantano salado de California: un estudio de teledetección*. Universidad Estatal de California, Departamento de Antropología, Geografía y Estudios Étnicos.
- Song, F., Su, F., Mi, C., & Sun, D. (2021). Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: A case in Northeast China. *Science of The Total Environment*, 751, 141778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141778>
- Vidal, C., Serna, C., Pacheco, C., Flóres, G., & Valdez, J. (2020). Estado del arte del marco jurídico de protección de los humedales frente al cambio climático. *Revista Jurídicas*, 17(2), 321–336.
- Villena, P. (2021). *Análisis Temporal de los Años Hidrológicos de la Cuenca del Río Santa, debido a la incidencia del Cambio Climático*. Universidad César Vallejo.
- Wetlands International. (2019). *Programa Conservando los Humedales Altoandinos para la Gente y la Naturaleza*. Wetlands International. Recuperado de <https://www.weadapt.org/wp-content/uploads/2023/05/programa-conservando-los-humedales-altandinos2019-.pdf>
- Zheng, Q.-H., Chen, W., Li, S.-L., Yu, L., Zhang, X., Liu, L.-F., Singh, R. P., & Liu, C.-Q. (2021). Accuracy comparison and driving factor analysis of LULC changes using multi-source time-series remote sensing data in a coastal area. *Ecological Informatics*, 66, 101457. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101457>

Anexos

Anexo 1: Declaración jurada de autores

Declaración jurada de autor

	MAPBIOMAS PERU	 INSTITUTO DEL BIEN COMÚN	 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
---	--------------------------	---	--

ANEXO I

Declaración jurada de autores

Yo, Pedro Giancarlo Lavado Medina, con DNI 72723846 y domicilio en Cnel. Lorenzo Iglesias Pino H2DB LT. 17, Surco

Declaro:

- Ser autor/a Principal (principal/secundario) del trabajo titulado "Modelado Espacio - Temporal y Proyección de los cambios en el Humedal Lurte-Huacarpay ante el cambio climático y Transformación de uso del suelo" presentado a la Segunda Edición del Premio MapBiomass Perú.
- Estar de acuerdo con las bases y condiciones de la postulación a este premio.
- La publicación y presentación de esta investigación está bajo mi entera responsabilidad.

Firma 

Nombre Pedro Lavado

Fecha 30 de mayo del 2025

Declaración jurada de autor



MAPBIOMAS
PERU



ANEXO I

Declaración jurada de autores

Yo, Anahí Keora Guerra Toruza, con DNI
60891056 y domicilio en Mz. A 8 Lt. 30 Moriscad Cáceres

Declaro:

- Ser autor/a principal (principal/secundario) del trabajo titulado
" Modelado Espacio-Temporal y Proyección de los cambios en el humedal Lucie-
Huacuray ante el cambio climático y transformación de uso de suelo "
presentado a la Segunda Edición del Premio MapBiomass Perú.
- Estar de acuerdo con las bases y condiciones de la postulación a este premio.
- La publicación y presentación de esta investigación está bajo mi entera responsabilidad.

Firma

Nombre

Anahí Guerra

Fecha

30 de mayo del 2025

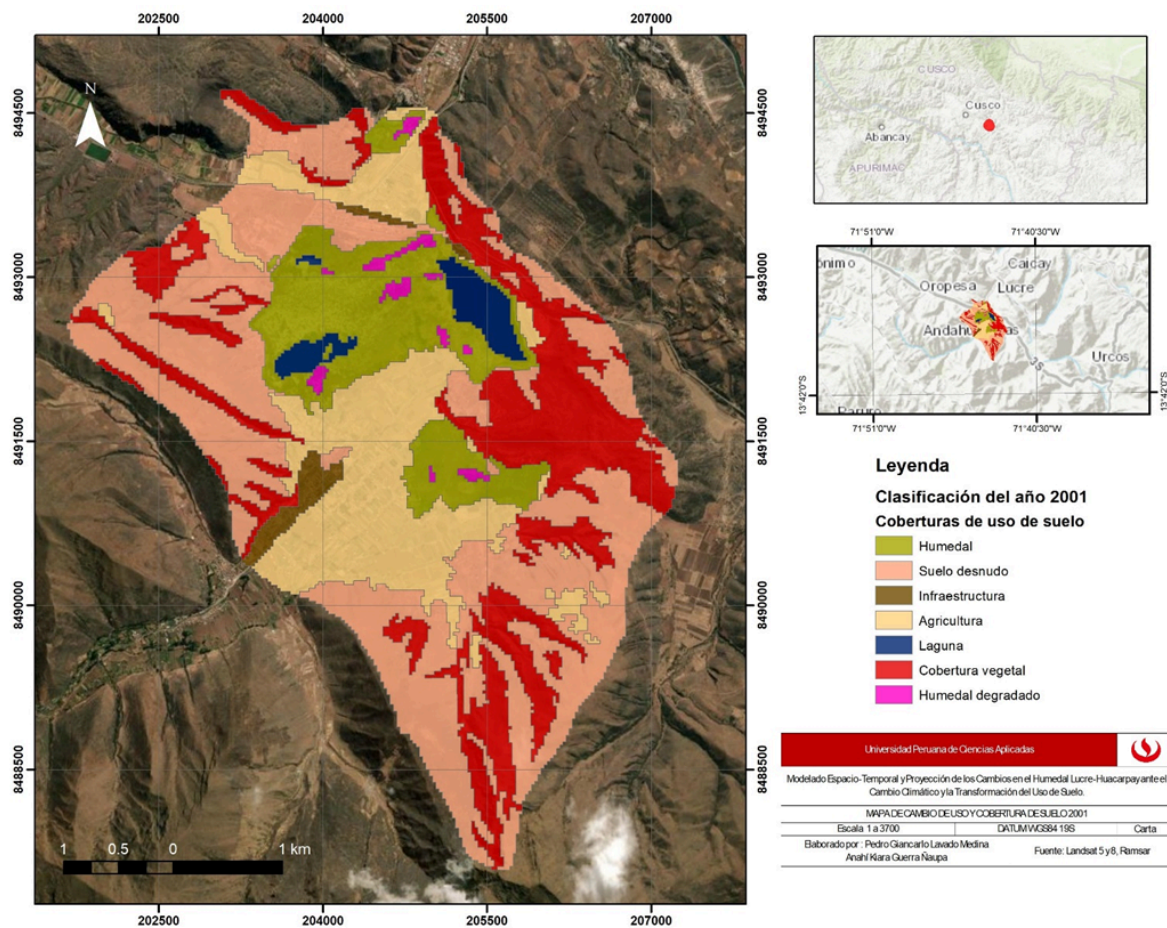
Anexo 2: Códigos de programación

Contenido	Link de acceso
Repositorio del editor de código de GEE	https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/pedrolavado5/LucreHuacarpayMapBiomass
Código de proyección futura	https://drive.google.com/drive/folders/1wm7TvSeAZg2VzINqld8YKdKOIAPOp2a?usp=sharing

Anexo 3: Mapas de cambio de uso y cobertura de suelo

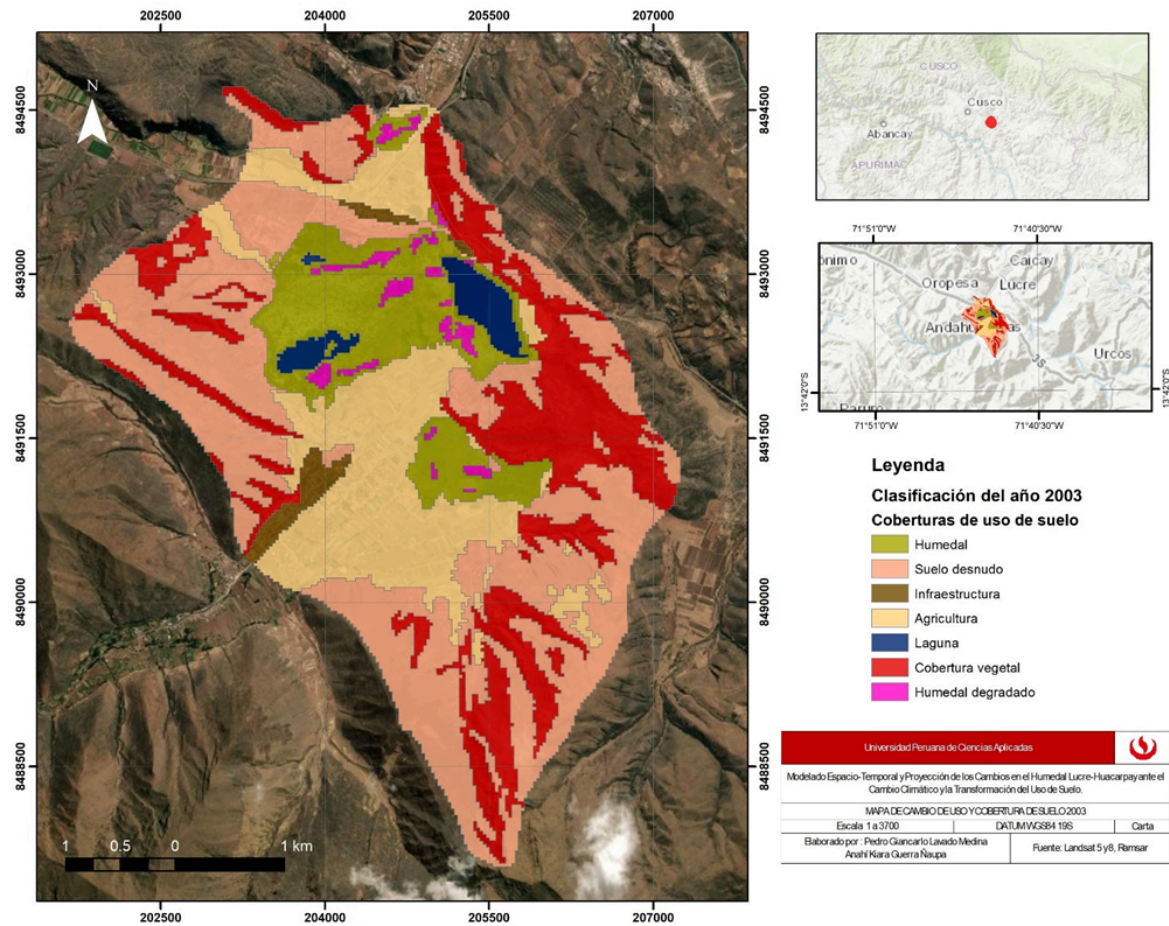
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2001



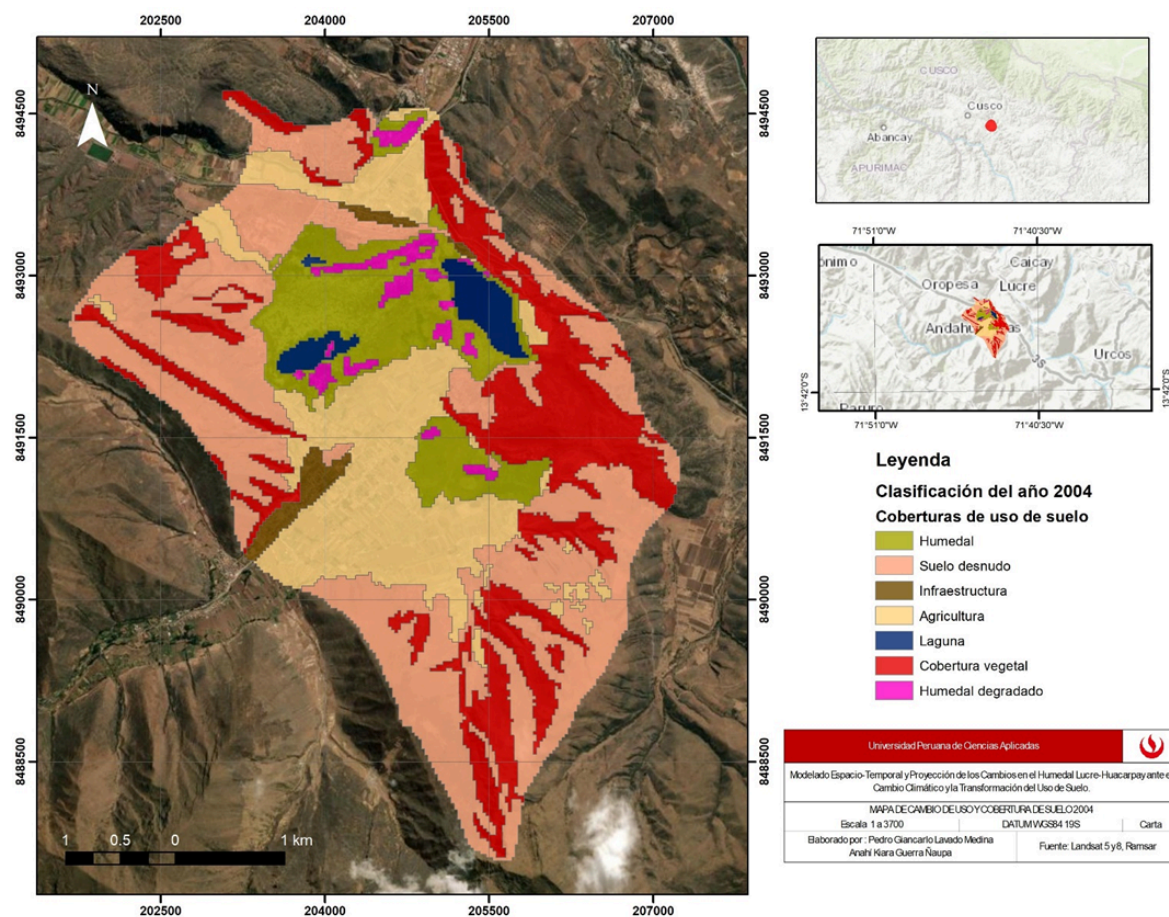
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2003



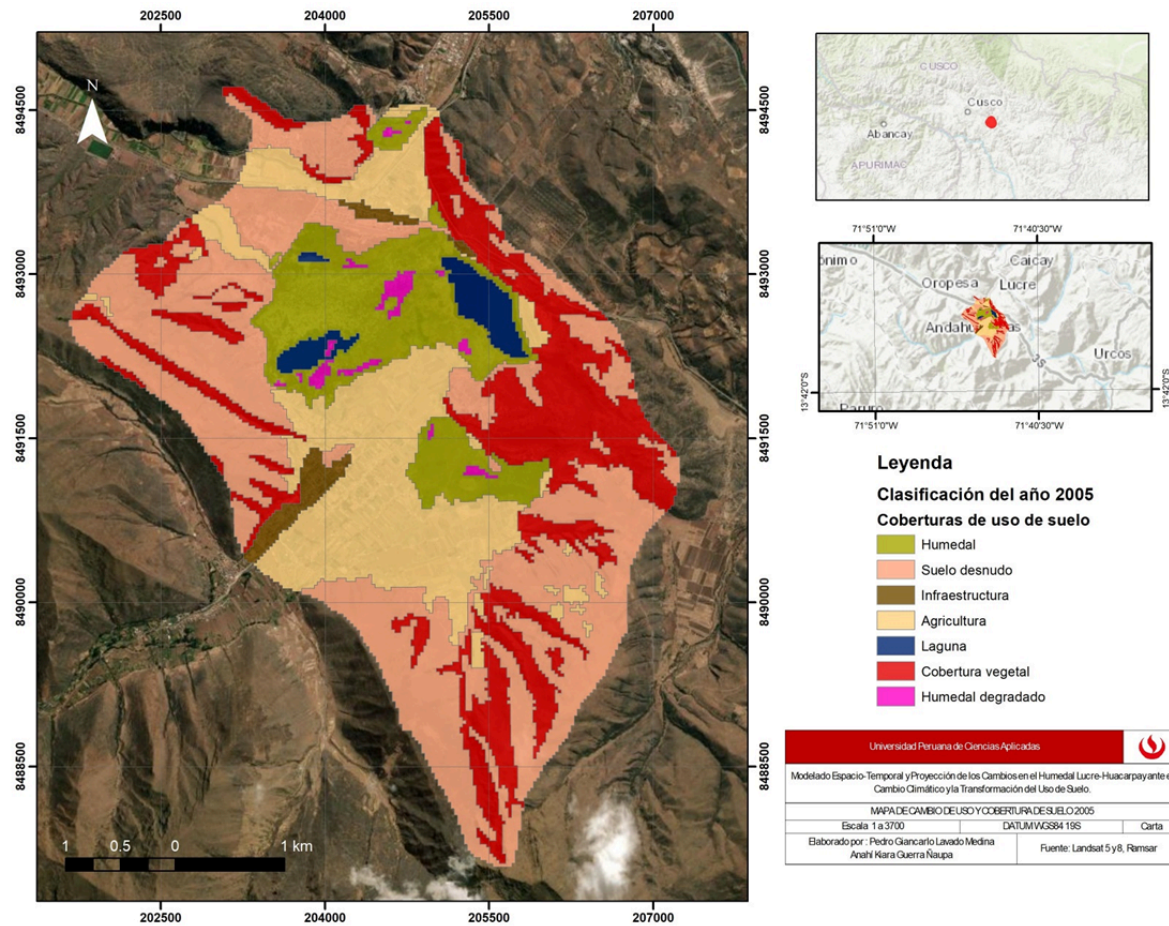
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2004



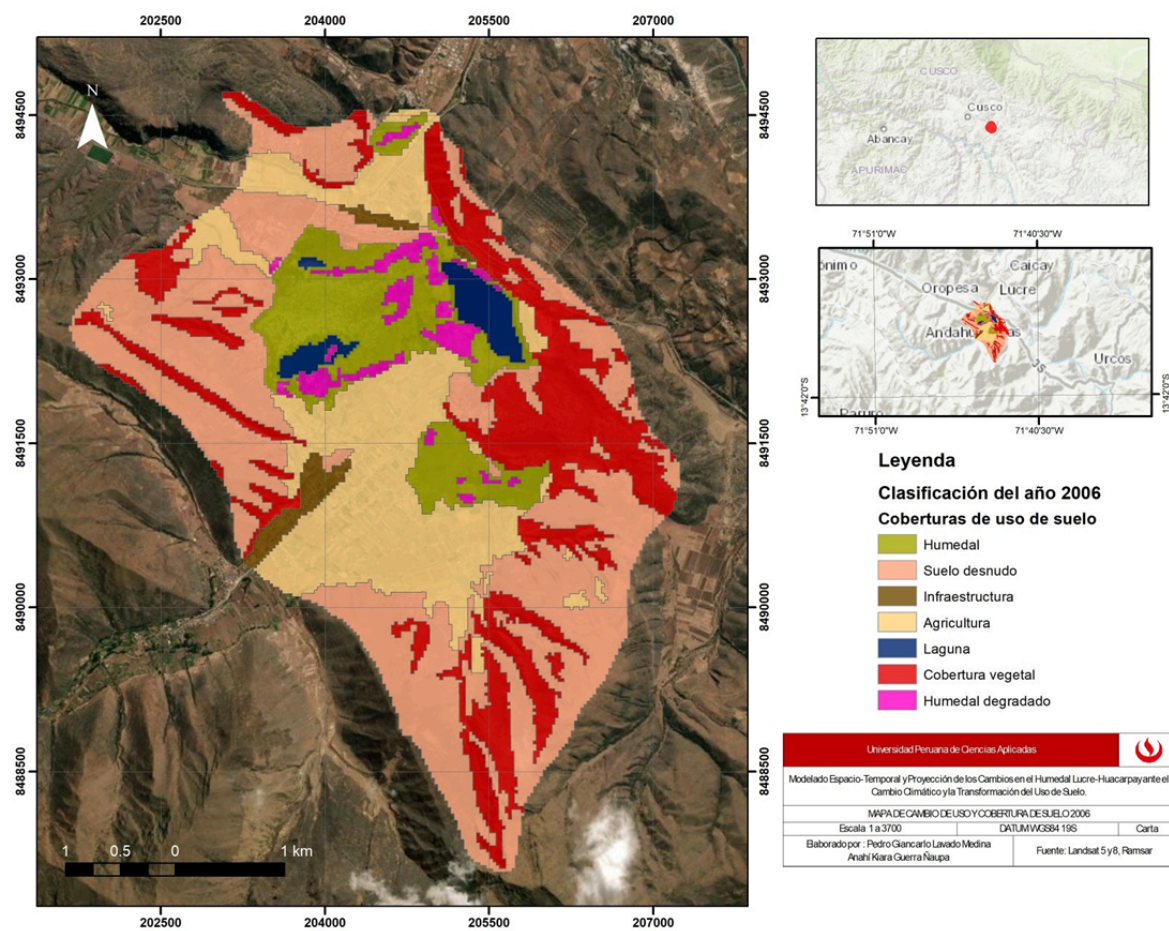
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2005



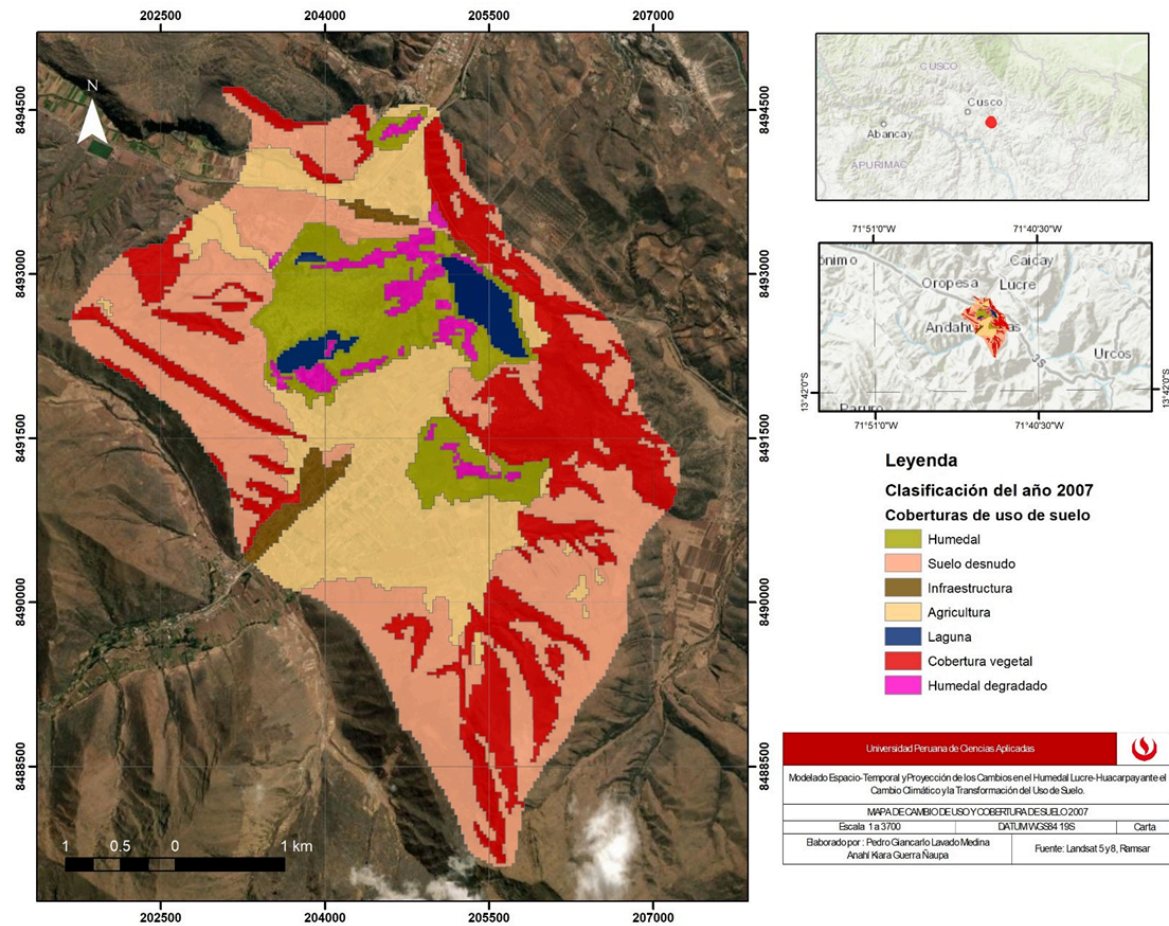
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2006



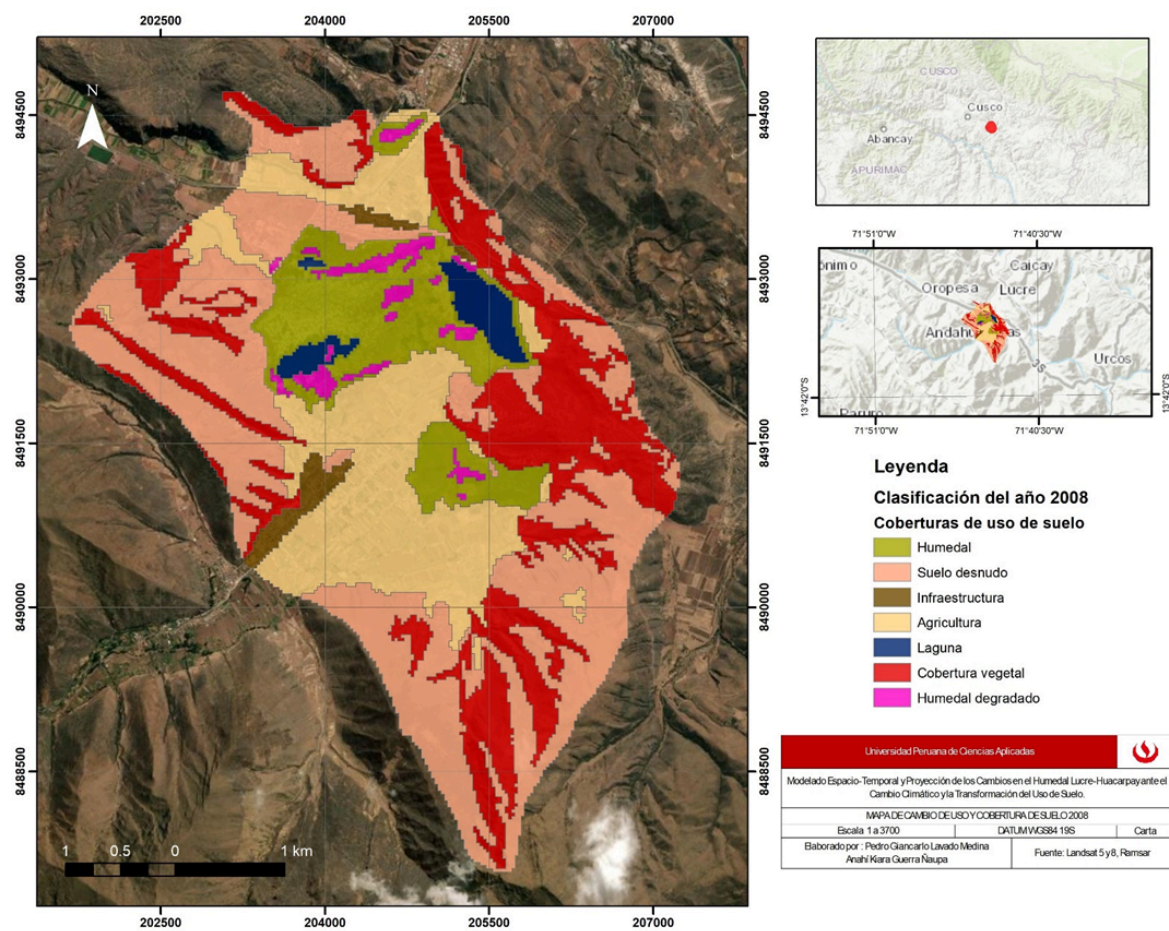
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2007



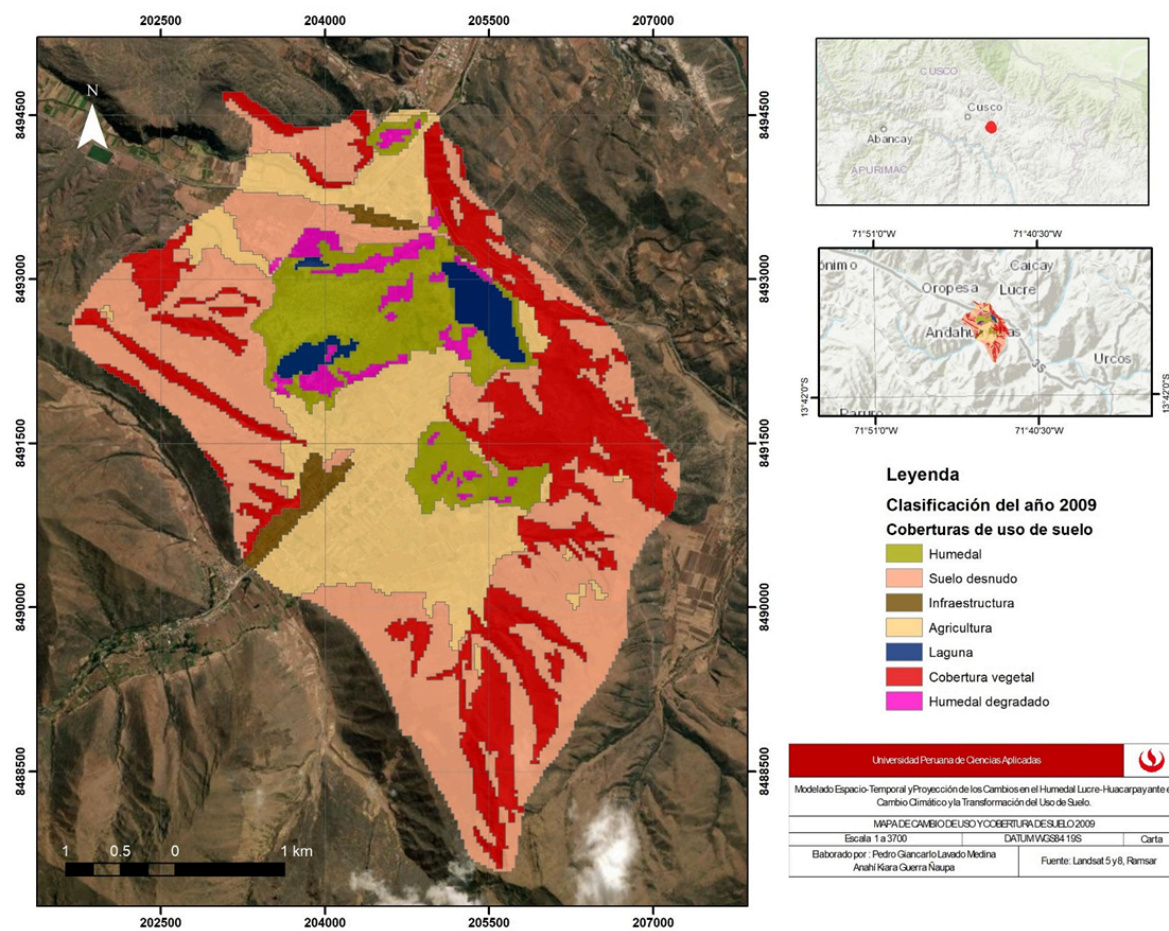
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2008



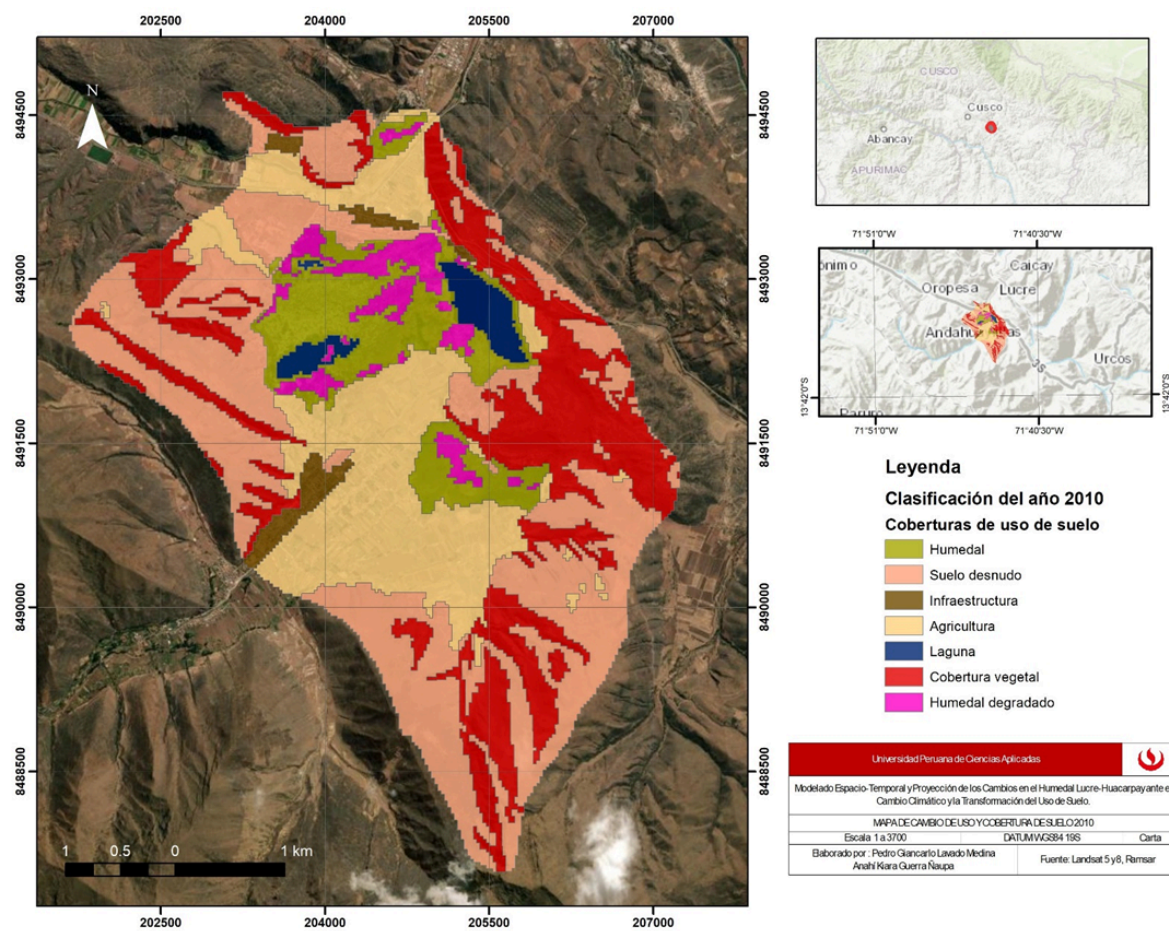
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2009



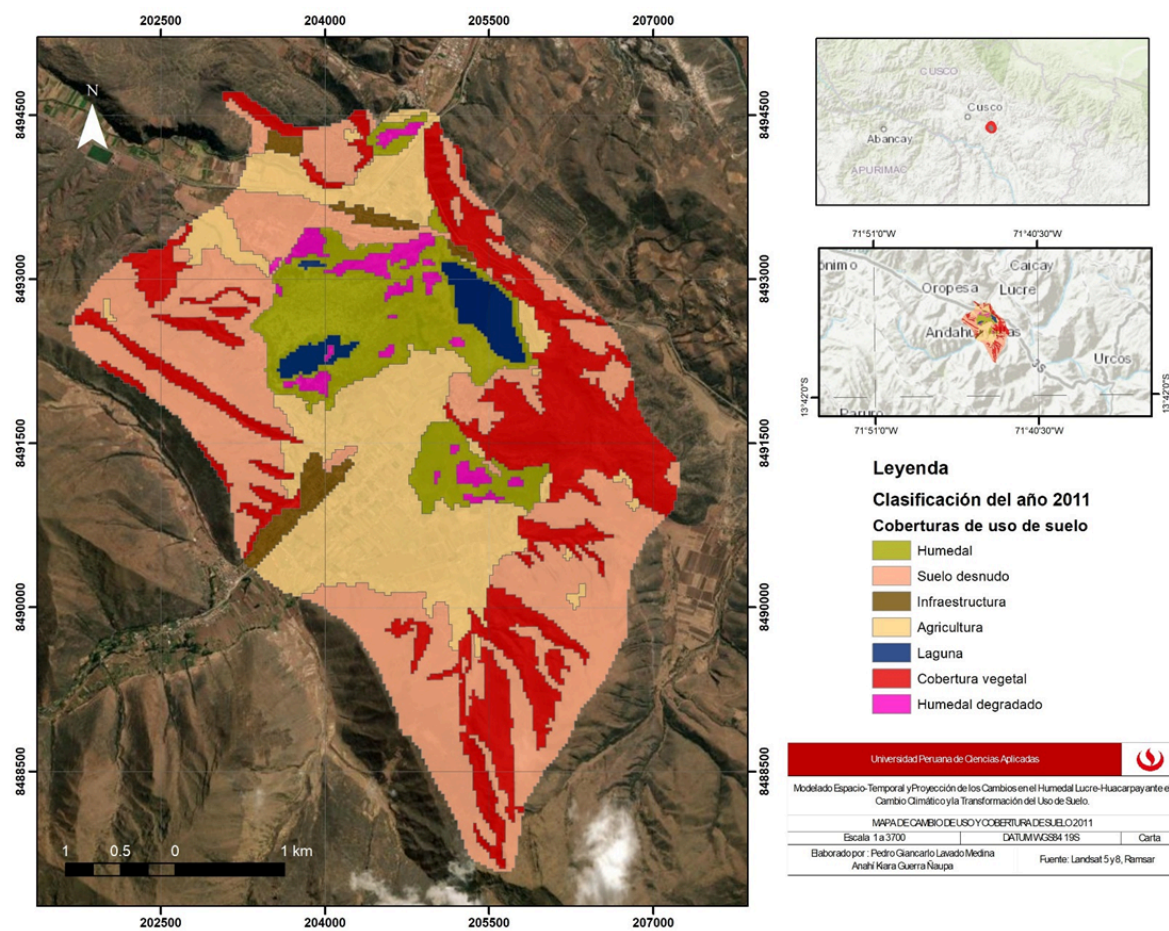
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2010



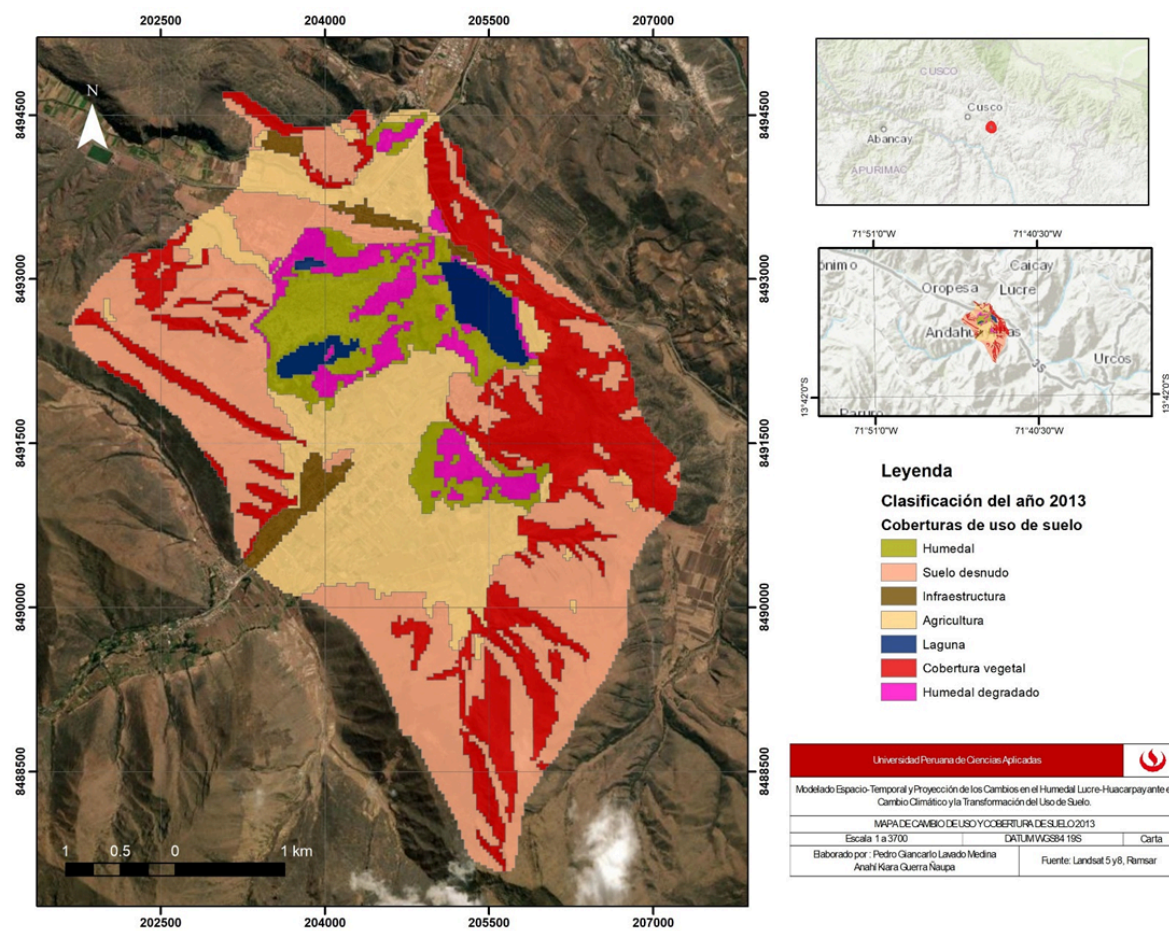
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2011



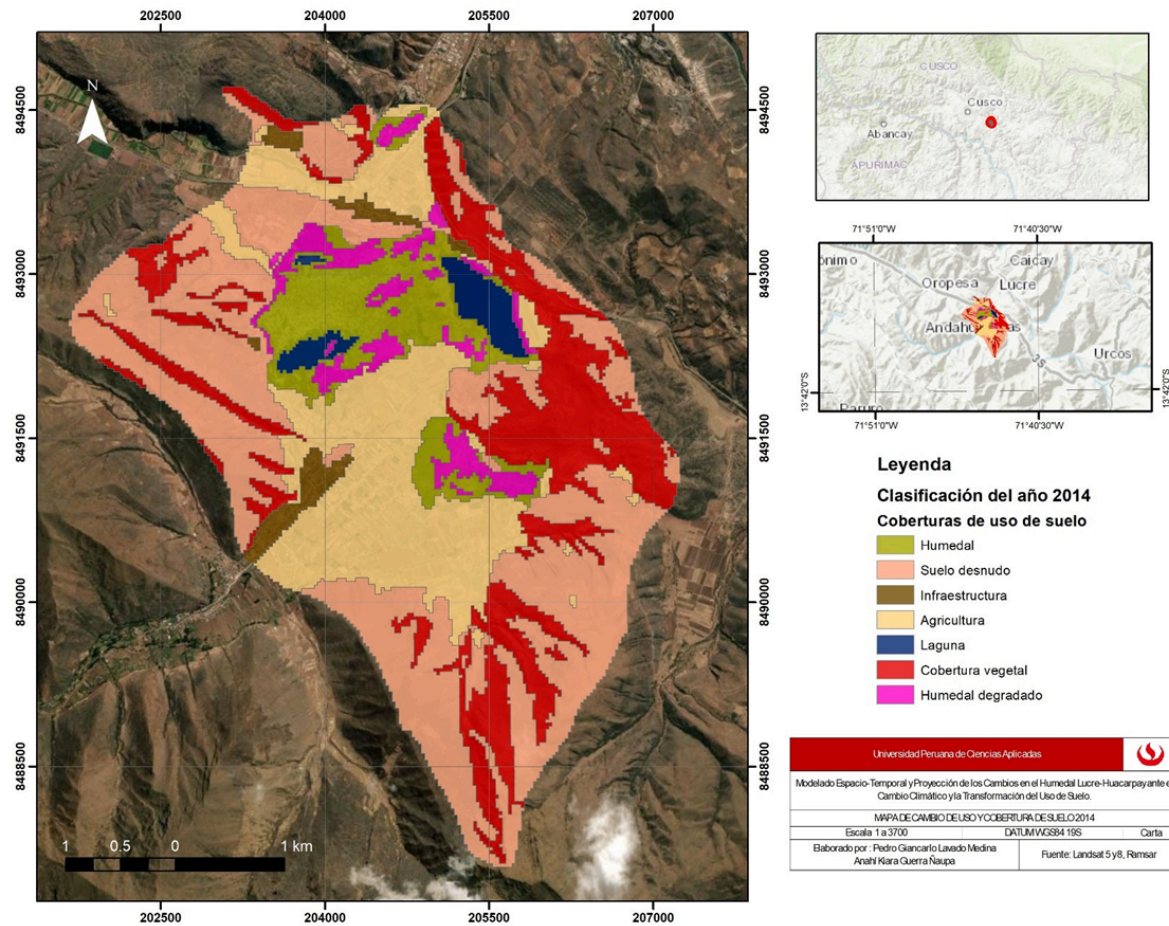
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2013



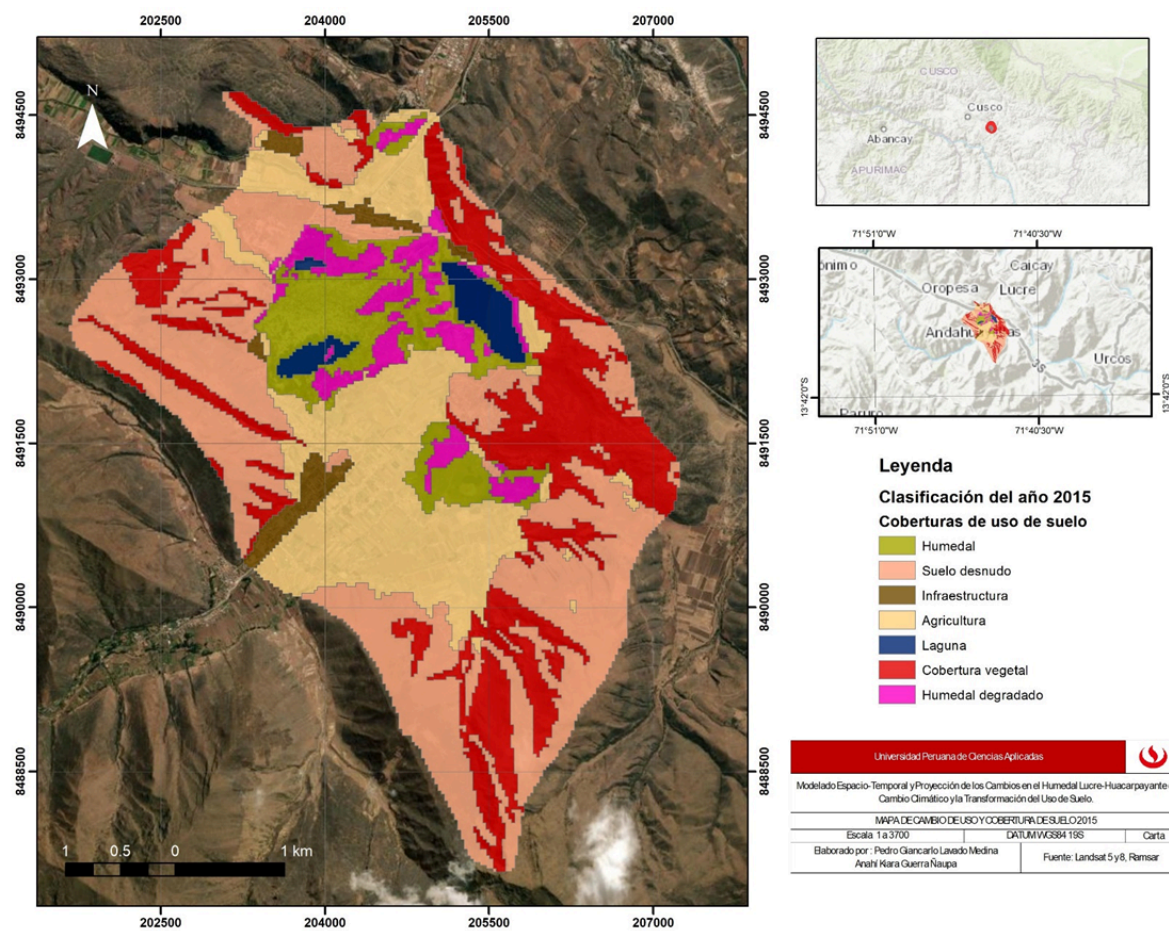
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2014



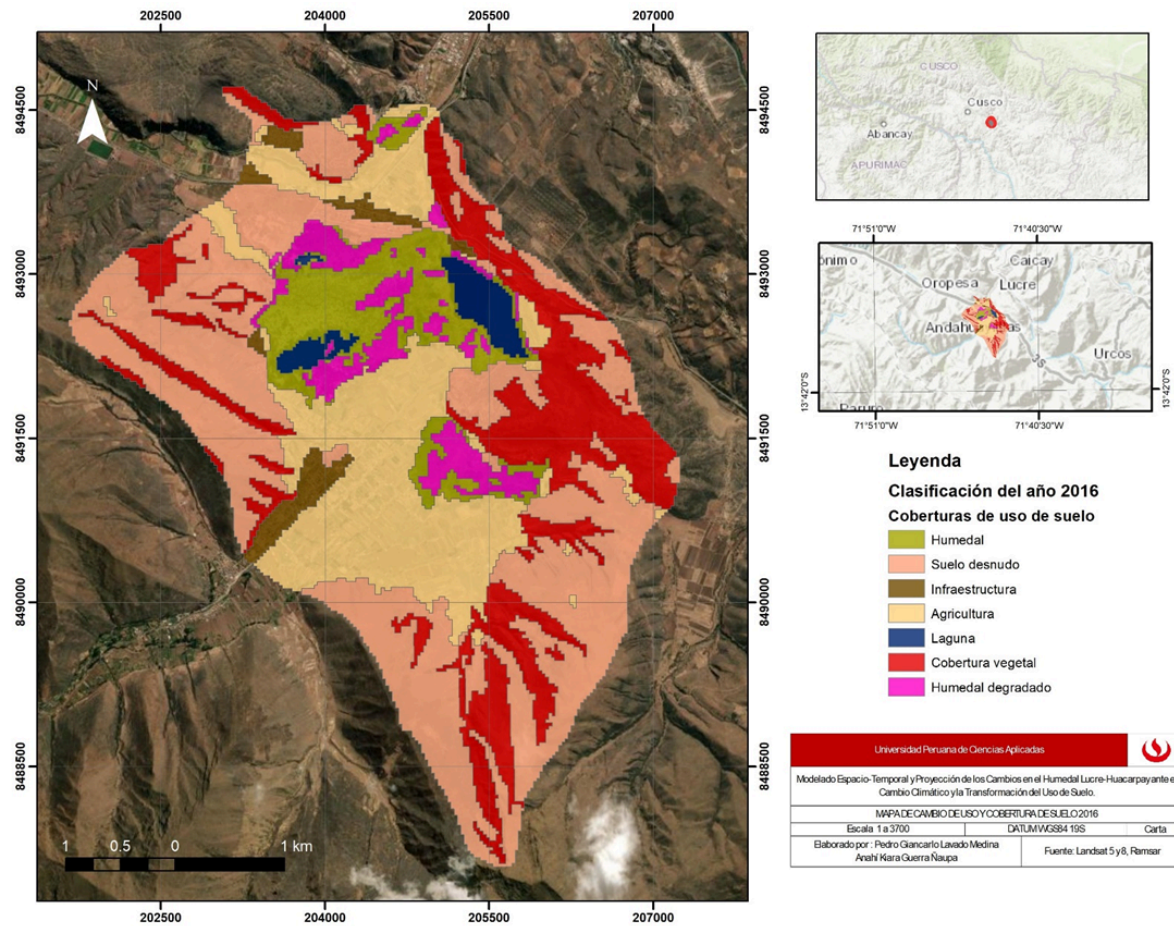
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2015



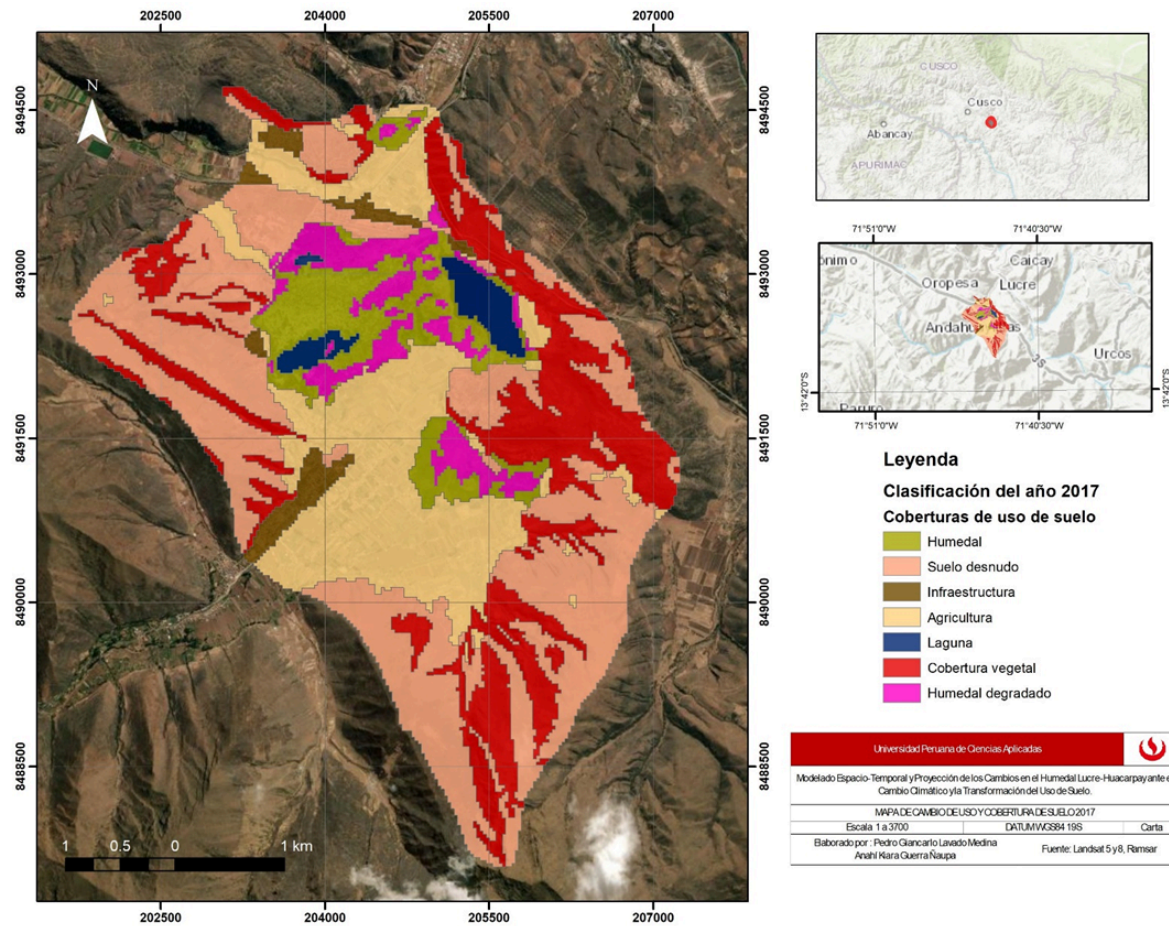
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2016



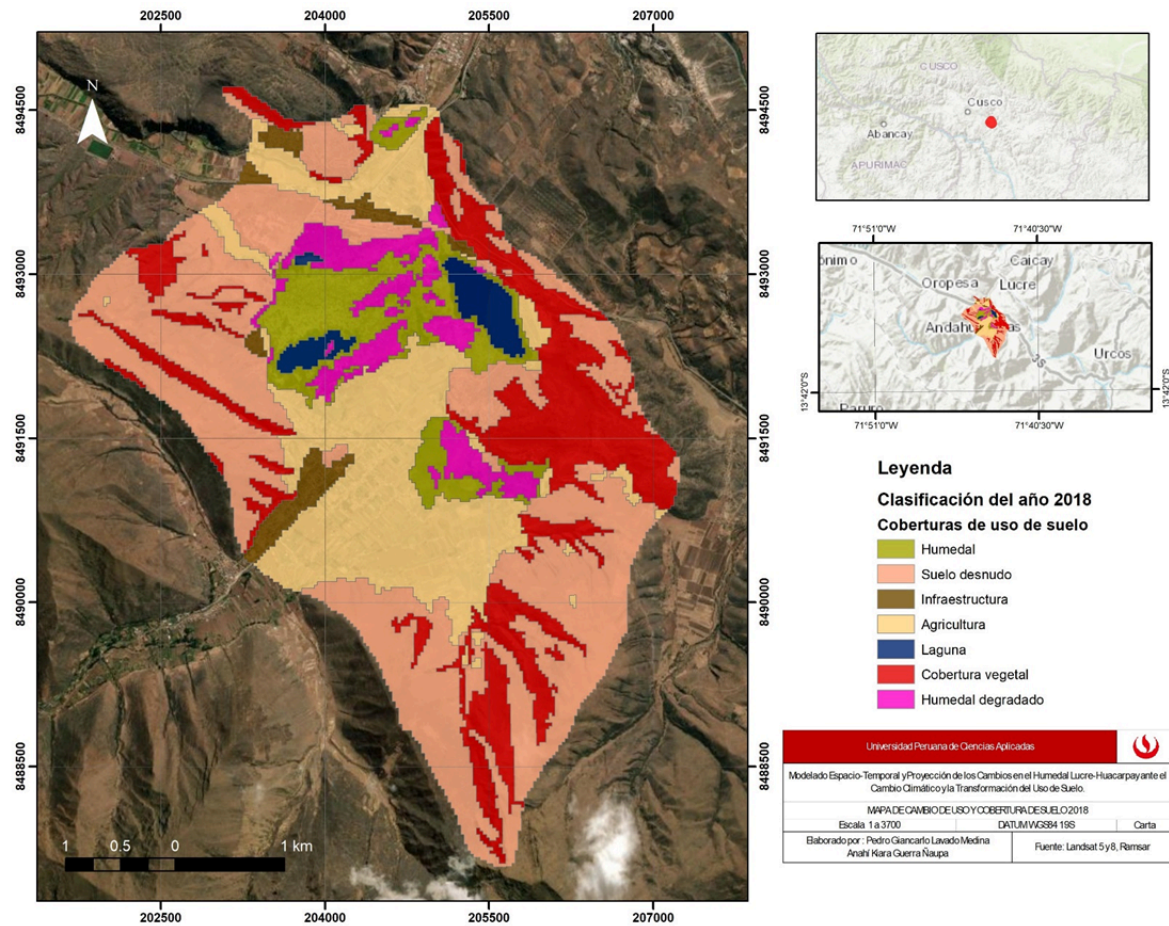
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2017



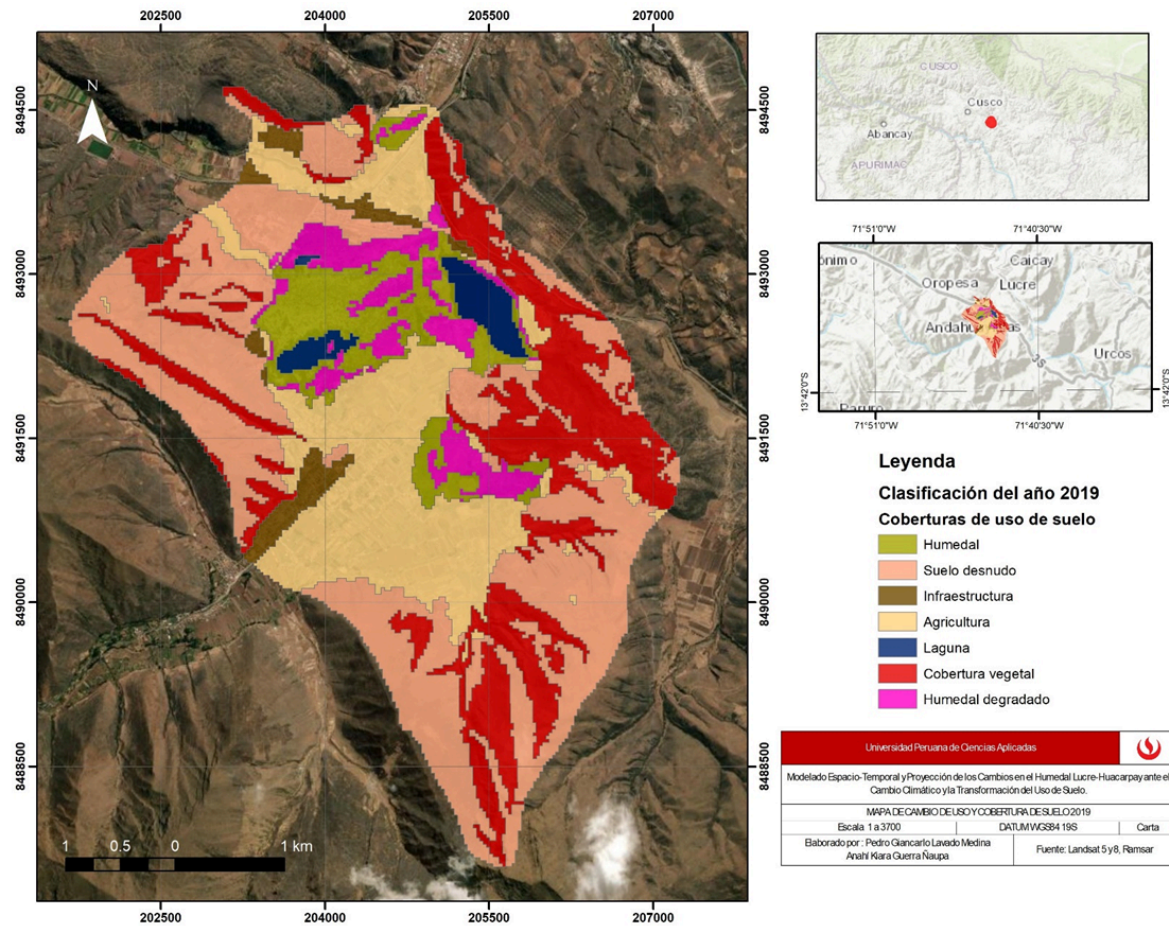
Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2018



Figura

Mapa de cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay en el 2019



Anexo 4: Áreas (ha) por año de cambio de uso y cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay 2000 al 2020

Año	ID	Clasificación	Area (ha)
2000	1	Humedal sano	293,7
	2	Suelo desnudo	760,0
	3	Urbanización	29,2
	4	Agricultura	358,4
	5	Laguna	48,9
	6	Cobertura vegetal	491,4
	7	Humedal degradado	13,1
Total			1 994,7
2001	1	Humedal sano	280,73
	2	Suelo desnudo	771,10
	3	Urbanización	30,05
	4	Agricultura	380,99
	5	Laguna	49,98
	6	Cobertura vegetal	460,56
	7	Humedal degradado	21,31
Total			1 994,7
2003	1	Humedal sano	264,91
	2	Suelo desnudo	776,98
	3	Urbanización	33,01
	4	Agricultura	400,83
	5	Laguna	47,97

	6	Cobertura vegetal	437,16
	7	Humedal degradado	33,87
Total			1 994,7
2004	1	Humedal sano	252,05
	2	Suelo desnudo	761,54
	3	Urbanización	33,27
	4	Agricultura	407,50
	5	Laguna	49,02
	6	Cobertura vegetal	445,41
	7	Humedal degradado	45,90
Total			1 994,7
2005	1	Humedal sano	273,76
	2	Suelo desnudo	758,75
	3	Urbanización	33,62
	4	Agricultura	420,30
	5	Laguna	47,54
	6	Cobertura vegetal	440,03
	7	Humedal degradado	20,71
Total			1 994,7
2006	1	Humedal sano	239,08
	2	Suelo desnudo	773,57
	3	Urbanización	34,05
	4	Agricultura	420,02

	5	Laguna	46,84
	6	Cobertura vegetal	421,83
	7	Humedal degradado	59,33
Total			1 994,7
2007	1	Humedal sano	234,58
	2	Suelo desnudo	723,33
	3	Urbanización	34,32
	4	Agricultura	424,05
	5	Laguna	47,36
	6	Cobertura vegetal	468,31
	7	Humedal degradado	62,77
Total			1 994,7
2008	1	Humedal sano	252,80
	2	Suelo desnudo	727,05
	3	Urbanización	34,66
	4	Agricultura	424,84
	5	Laguna	48,58
	6	Cobertura vegetal	461,88
	7	Humedal degradado	44,90
Total			1 994,7
2009	1	Humedal sano	233,19
	2	Suelo desnudo	728,26
	3	Urbanización	35,08

	4	Agricultura	426,79
	5	Laguna	49,28
	6	Cobertura vegetal	461,17
	7	Humedal degradado	60,95
Total			1 994,7
2010	1	Humedal sano	212,48
	2	Suelo desnudo	716,02
	3	Urbanización	39,87
	4	Agricultura	430,02
	5	Laguna	48,67
	6	Cobertura vegetal	464,20
	7	Humedal degradado	83,46
Total			1 994,7
2011	1	Humedal sano	243,83
	2	Suelo desnudo	718,46
	3	Urbanización	41,97
	4	Agricultura	431,99
	5	Laguna	47,88
	6	Cobertura vegetal	460,13
	7	Humedal degradado	50,44
Total			1 994,7
2013	1	Humedal sano	181,98
	2	Suelo desnudo	714,04

	3	Urbanización	43,36
	4	Agricultura	439,33
	5	Laguna	53,10
	6	Cobertura vegetal	456,09
	7	Humedal degradado	106,86
Total			1 994,7
2014	1	Humedal sano	191,60
	2	Suelo desnudo	758,77
	3	Urbanización	44,66
	4	Agricultura	433,67
	5	Laguna	47,36
	6	Cobertura vegetal	421,81
	7	Humedal degradado	96,85
Total			1 994,7
2015	1	Humedal sano	184,89
	2	Suelo desnudo	725,19
	3	Urbanización	47,36
	4	Agricultura	434,43
	5	Laguna	47,71
	6	Cobertura vegetal	447,70
	7	Humedal degradado	107,45
Total			1 994,7
2016	1	Humedal sano	174,21

	2	Suelo desnudo	763,49
	3	Urbanización	52,00
	4	Agricultura	433,94
	5	Laguna	47,97
	6	Cobertura vegetal	410,63
	7	Humedal degradado	112,47
Total			1 994,7
2017	1	Humedal sano	173,42
	2	Suelo desnudo	727,82
	3	Urbanización	54,50
	4	Agricultura	433,73
	5	Laguna	47,36
	6	Cobertura vegetal	440,32
	7	Humedal degradado	117,58
Total			1 994,7
2018	1	Humedal sano	169,31
	2	Suelo desnudo	764,27
	3	Urbanización	54,70
	4	Agricultura	435,42
	5	Laguna	47,80
	6	Cobertura vegetal	407,31
	7	Humedal degradado	115,91
Total			1 994,7

2019	1	Humedal sano	162,72
	2	Suelo desnudo	728,26
	3	Urbanización	55,95
	4	Agricultura	433,94
	5	Laguna	48,41
	6	Cobertura vegetal	441,70
	7	Humedal degradado	123,76
Total			1 994,7
2020	1	Humedal sano	154,0
	2	Suelo desnudo	781,5
	3	Urbanización	56,3
	4	Agricultura	436,3
	5	Laguna	50,0
	6	Cobertura vegetal	388,0
	7	Humedal degradado	128,7
Total			1 994,7