



Universidad César Vallejo

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Análisis espacio temporal de la deforestación y erosión de suelo
mediante Google Earth Engine del distrito de Cerro Colorado
Arequipa, 2010-2021**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniera Ambiental**

AUTORAS:

Ccosi Puma, Lady Liz (orcid.org/0000-0003-2605-6005)

Ticona Ccali, Maria Belen (orcid.org/0009-0009-0785-2330)

ASESOR:

Mg. Montalvo Morales, Kenny Ruben (orcid.org/0000-0003-4403-4360)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Gestión de Riesgos y Adaptación al Cambio Climático

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA - PERÚ

2024

Dedicatoria

A Dios por darme fortaleza en el camino. A mis queridos padres Emilio y Natalia por creer siempre en mí y ser mi fuente inagotable de inspiración, perseverancia y amor. A cada persona que con su apoyo incondicional y motivación constante fueron parte fundamental de este logro y para ustedes que son mis angelitos en el cielo.

Lady Liz Ccosi Puma

A Dios por mostrarme su infinita misericordia, por presentarme situaciones incomparables. A mi familia que son mi motor de inspiración, a mis padres Bruno y Berni que formaron mis cimientos, a mis más grandes consejeros mis hermanos, y a quienes, con su paciencia y motivación, estuvieron presentes en este reto. Familia se logró ATCH.

María Belén Ticona Ccali

Agradecimiento

A Dios por permitirme este logro. A nuestro asesor Mg. Kenny Montalvo por su dedicación que guiaron nuestro esfuerzo hacia el éxito académico. A mi cómplice y compañera de tesis por creer en nuestras habilidades para alcanzar este logro de muchos otros que nos esperan.

Lady Liz Ccosi Puma

Primero Dios, porque él sabe cuándo es el momento para cada cosa, A nuestro asesor por acompañarnos en todo el desarrollo de la Tesis, disolviendo cada una de nuestras dudas. A mi compañera de noches de desvelo y por ser cómplice en este camino por lograr el tan aclamado sueño.

María Belén Ticona Ccali



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, MONTALVO MORALES KENNY RUBEN, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis titulada: "ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA DEFORESTACIÓN Y EROSIÓN DE SUELO MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE DEL DISTRITO DE CERRO COLORADO AREQUIPA, 2010-2021", cuyos autores son CCOSI PUMA LADY LIZ, TICONA CCALI MARIA BELEN, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 10.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 20 de Mayo del 2024

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
KENNY RUBEN MONTALVO MORALES DNI: 43713929 ORCID: 0000-0003-4403-4360	Firmado electrónicamente por: KRMONTALVO el 24-07-2024 09:11:06

Código documento Trilce: TRI – 0751825



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, CCOSI PUMA LIZ, TICONA CCALI MARIA BELEN estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA DEFORESTACIÓN Y EROSIÓN DE SUELO MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE DEL DISTRITO DE CERRO COLORADO AREQUIPA, 2010-2021", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
MARIA BELEN TICONA CCALI DNI: 74860559 ORCID: 0009-0009-0785-2330	Firmado electrónicamente por: MBTICONA el 20-05-2024 10:30:16
LADY LIZ CCOSI PUMA DNI: 70473660 ORCID: 0000-0003-2605-6005	Firmado electrónicamente por: CCOSIP el 20-05-2024 09:37:30

Código documento Trilce: TRI – 0751823

Índice de contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Declaratoria de Autenticidad del Asesor.....	iv
Declaratoria de Originalidad de los Autores.....	v
Índice de contenidos	vi
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
Resumen	ix
Abstract	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	5
III. METODOLOGÍA.....	14
3.1 Tipo y diseño de investigación	14
3.2 Variables y operacionalización.....	15
3.3 Población, muestra, muestreo y unidad de análisis	15
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	16
3.5 Procedimientos	18
3.6 Método de análisis de datos.....	20
3.7 Aspectos éticos	21
IV. RESULTADOS	22
V. DISCUSIÓN.....	56
VI. CONCLUSIONES.....	61
VII. RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS.....	65
ANEXOS	75

Índice de tablas

Tabla 1 Estaciones meteorológicas al rededor del Nevado Coropuna.....	26
Tabla 2 Categorías de análisis de áreas.....	39
Tabla 3 Resultados de áreas por categoría	41
Tabla 4 Resultados de suelo desnudo 2010 – 2021	42
Tabla 5 Resultados de Zonas agrícolas y Vegetación 2010 – 2021	45
Tabla 6 Resultados de Zonas urbanas 2010 – 2021.....	48
Tabla 7 Relación de áreas de suelo desnudo y zonas urbanas.....	49

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo de procesamiento de imágenes satelitales para el análisis de la deforestación y erosión de suelo	18
Figura 2 Mapa de ubicación del distrito de Cerro Colorado, Arequipa.....	19
Figura 3 Mapa de ubicación de zona de estudio (cerro colorado) en Google Earth Engine	23
Figura 4 Puntos de muestra para la clasificación supervisada en QGIS	25
Figura 5 Mapa de la clasificación supervisada en QGIS –Landsat 7-2010.....	28
Figura 6 Mapa de la clasificación supervisada en QGIS Sentinel 2 – 2021	29
Figura 7 Distribución de resultados 2010 - 2012	31
Figura 8 Distribución de resultados 2012 - 2014	33
Figura 9 Distribución de resultados 2014 – 2016	35
Figura 10 Distribución de resultados 2016 – 2018	36
Figura 11 Distribución de resultados 2018 – 2020	37
Figura 12 Mapa de evolución multitemporal de las categorías analizadas 2010 – 2021	38
Figura 13 Distribución de resultados de áreas según Clasificación Supervisada	41
Figura 14 Gráfico de comparación de resultados de suelo desnudo del 2010 al 2021.	43
Figura 15 Mapa de evolución multitemporal de la categoría suelo desnudo 2010 – 2021	44
Figura 16 Gráfico de comparación de resultados de zonas agrícolas y vegetación .	46
Figura 17 Mapa de evolución multitemporal de la categoría Zona Agrícola 2010 – 2021	47
Figura 18 Gráfico de comparación de resultados del crecimiento de las zonas urbanas	50
Figura 19 Mapa de evolución multitemporal de la categoría Zona Urbana 2010 – 2021	51
Figura 20 Gráfico de distribución de áreas en el año 2010	53
Figura 21 Gráfico de distribución de áreas en el año 2021	54

Resumen

El Presente trabajo de investigación tuvo como objetivo analizar el área deforestada y erosionada del año 2010 al 2021 a través de un análisis espacio temporal por medio GEE del distrito Cerro Colorado, Arequipa. El tipo de investigación fue aplicada con un diseño no experimental longitudinal. Se delimitó el área de estudio en la plataforma Google Earth Engine(GEE) y se realizó una clasificación supervisada representada en cinco categorías (suelo desnudo, suelos agrícolas, zonas urbanas, cobertura de bosques y Nieve), cuyos resultados se representaron cartográficamente en QGIS. Durante el período de 11 años analizado, se observaron cambios significativos en las categorías identificadas, evidenciando el aumento en la erosión a lo largo del tiempo donde la categoría de suelo desnudo disminuyó en 1951.50 ha, mientras que las áreas urbanas aumentaron en 1985.80 ha. No se detectaron coberturas forestales significativas, y la cobertura de nieve experimentó una leve disminución 0.21ha debido al cambio climático. Se recomienda el uso de GEE debido a su accesibilidad y capacidad para monitorear imágenes satelitales a gran escala, lo que facilita un análisis dinámico y preciso en el tiempo, contribuyendo así a una gestión sostenible del territorio.

Palabras clave: Deforestación, Erosión, Imágenes satelitales, Google Earth Engine, Crecimiento demográfico.

Abstract

The objective of this research work was to analyze the deforested and eroded area from 2010 to 2021 through a spatio-temporal analysis using GEE of the Cerro Colorado district, Arequipa. The type of research was applied with a longitudinal non-experimental design. The study area was delimited on the Google Earth Engine (GEE) platform and a supervised classification represented in five categories (bare soil, agricultural soils, urban areas, forest cover and Snow) was carried out, the results of which were cartographically represented in QGIS. During the 11-year period analyzed, significant changes were observed in the identified categories, evidencing the increase in erosion over time where the bare soil category decreased by 1951.50 ha, while urban areas increased by 1985.80 ha. No significant forest cover was detected, and snow cover experienced a slight decrease of 0.21ha due to climate change. The use of GEE is recommended due to its accessibility and ability to monitor large-scale satellite images, which facilitates a dynamic and precise analysis over time, thus contributing to sustainable management of the territory.

Keywords: Deforestation, Erosion, Satellite images, Google Earth Engine, Demographic growth.

I. INTRODUCCIÓN

La población y el medio ambiente se encuentran vinculados de forma compleja y dinámica, los principios ecológicos indican que el crecimiento demográfico, el desarrollo social, económico y la calidad de medio ambiente presentan una alta dependencia. (Gatarić et al. 2022). Se registró que del 2010 al 2019, un total de 4,7 millones de hectáreas de bosque fueron taladas anualmente y se han estimado 12,3 Gt de pérdida de carbono localizado en la biomasa aérea y subterránea generando un equivalente de 1,5 Gt de pérdida anual. (Hussain et al. 2022)

Las Naciones Unidas (ONU), estiman el crecimiento poblacional de 7 400 millones registrado el 2015 a 11 200 millones el 2100, presenta un vínculo estrecho con la calidad ambiental detallado en la siguiente fórmula la cual relaciona la escala de los Impactos Ambientales (I) en función a la Población (P), la Tecnología (T) y la Afluencia o Consumo (A): $I = f(P, A, T)$, el aumento de la riqueza global (A) es una causa importante de degradación ambiental. (Batchelor 2019)

El biólogo conservacionista Thomas Lovejoy resaltó la conexión entre el crecimiento demográfico, los ecosistemas vulnerables y el cambio climático, señalando que la sobreexplotación y la pérdida de hábitat son consecuencias de las presiones demográficas y la deforestación, lo que acelera la extinción de especies vegetales y animales (Batchelor, 2019).

La pérdida de bosques en Perú alcanza 9.5 millones de hectáreas, equivalente al 15% de su total forestal, lo que ocasiona pérdidas económicas de 60 mil millones de dólares. El crecimiento poblacional contribuye a la deforestación anual de 150 mil hectáreas. Durante el período de 2001 a 2019, Según el Ministerio de Ambiente registró una degradación y deforestación alarmante de bosques, con la pérdida de 2.433.314 hectáreas de bosques húmedos amazónicos, a un promedio anual de 128.069 hectáreas (Luque Ramos, 2021; La Barreda Noa, 2021).

El distrito de Cerro Colorado ubicado en la Provincia de Arequipa presenta el último censo del 2017 organizado por INEI el mayor crecimiento demográfico y reconocido como las más proyectadas a nivel nacional. Cerro Colorado con 157.131, Paucarpata

124.700 y Cayma con 95. 838. (INEI, 2018). El 54% de la población de Arequipa se concentran en el distrito de Cerro Colorado (148,164). (MPA, 2016).

En esta investigación, se analizó la pérdida de cobertura vegetal y degradación del suelo, reconociendo la conservación de la flora y fauna como una estrategia clave contra la deforestación, la erosión y el cambio climático. Utilizando Google Earth Engine (GEE), se llevó a cabo un monitoreo con alta resolución espacial, contrastando imágenes satelitales entre 2010 y 2021. Se evaluó la pérdida de suelos fértiles y se categorizaron mediante GEE y QGIS para procesar los datos. Esta plataforma posibilita análisis, programación y construcción de datos geoespaciales a gran escala (Perilla et al., 2020).

El área de estudio se determinó en función al último censo realizado el 2017, indicando que el distrito que presenta mayor tasa de crecimiento demográfico a nivel nacional es Cerro Colorado, contando como pilar económico la agricultura, y como principales cultivos la papa, cebolla, maíz, etc.

Se formula el problema general: ¿Cómo se ha ido dando el cambio en el ámbito espacio-temporal de la deforestación y erosión de suelo del distrito de Cerro Colorado, Arequipa? Seguido de los problemas específicos: ¿Cuánto es la deforestación causada por el crecimiento demográfico en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa a través del uso GEE periodo 2010-2021? ¿Cuánto es la erosión por el crecimiento demográfico en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa a través del uso GEE periodo 2010-2021? ¿Cuál la relación entre deforestación y erosión a través del análisis espacio temporal 2010-2021 en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa a través del uso GEE?

El crecimiento poblacional en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa, ha provocado una expansión urbana que resulta en la deforestación de áreas altas debido a actividades humanas. Sin embargo, la falta de estudios sobre la extensión de la deforestación dificulta la evaluación precisa de la pérdida de biomasa y la elaboración de planes de prevención y remediación. Esto aumenta el riesgo de

erosión del suelo y deslizamientos, lo que podría generar pérdidas económicas y fatalidades en un contexto de crecimiento urbano desordenado (Sierra Praeli, 2022).

La justificación social se dio a conocer a la municipalidad y autoridades competentes que la herramienta Google Earth Engine es útil para comprender los procesos de deforestación y erosión en el distrito de Cerro Colorado. Esta plataforma brinda apoyo al permitir el monitoreo parcial y completo del distrito mediante imágenes satelitales. Esto facilita la realización de un seguimiento y control efectivo ante estos problemas ambientales.(Yvette Sierra Praeli 2022)

La justificación metodológica se fundamentó en la recopilación de datos de artículos pertinentes al tema de estudio, los cuales fueron utilizados como fuente de información. Además, el uso de la plataforma Google Earth Engine fue imprescindible para llevar a cabo la evaluación del tema de investigación, el contenido y base de datos existente fueron utilizados como fuente de investigación guía. (Perilla et al. 2020)

La justificación económica el uso de la plataforma Google Earth Engine es innovadora de fácil acceso y además gratuita para sus usuarios ya que permite el análisis de una gran cantidad de imágenes satelitales. («Google Earth Engine» 2023)

La justificación ambiental el uso de imágenes satelitales posibilitó la identificación de los efectos adversos de la deforestación y la erosión del suelo en el distrito, lo que permitirá llevar a cabo monitoreos para preservar la biodiversidad nativa.

Se establecerá como **OG**: Analizar el espacio-temporal de la deforestación y erosión de suelo mediante el GEE del distrito de Cerro Colorado, Arequipa. En cuanto a los objetivos específicos **OE1**: Determinar la deforestación causada por el crecimiento demográfico en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa a través del uso GEE periodo 2010-2021. **OE 2**: Determinar la erosión por el crecimiento demográfico en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa a través del uso GEE periodo 2010-2021. **OE3**: Demostrar la relación entre deforestación y erosión a través del análisis espacio temporal 2010-2021 en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa a través del uso GEE

Se detalla las siguientes hipótesis **HG**: Mediante del análisis espacio temporal periodo 2010-2021 a través de la herramienta GEE se permite evidenciar los efectos del crecimiento demográfico sobre la deforestación en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa. Seguido de las hipótesis específicas. **HE1**: El crecimiento demográfico en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa durante el periodo 2010-2021 permitió el incremento de la deforestación para su análisis con la herramienta GEE. **HE2**: Es posible que la consecuencia del crecimiento demográfico mediante el uso GEE en el periodo 2010-2021 sean las áreas erosionadas. **HE3**: Probablemente la relación que existe entre la deforestación y erosión a consecuencia del crecimiento demográfico en el periodo del 2010-2021 en el distrito de Cerro Colorado sea demostrada a través del uso de GEE.

II. MARCO TEÓRICO

(Ma et al. 2023), tuvieron como objetivo la predicción espacial de la salinidad del suelo utilizando imágenes de teledetección multitemporales a través de Google Earth Engine (GEE). Se tuvo como enfoque elegir la ventana de tiempo de detección remota más apropiada utilizando una plataforma de computación en la nube y sintetiza imágenes de detección remota multitemporales para un mapeo digital de salinización de alta resolución espacial a escala regional en el oasis Werigan-Kuqa en Xinjuang, China, utilizando la Reflectancia de superficie (SR) del Landsat 8, en cuatro ventanas de tiempo: abril-octubre, mayo-septiembre, junio-agosto e imágenes de fecha única en julio empleando la plataforma Google Earth Engine (GEE) se recopilaron imágenes satelitales utilizando diferentes estadísticas (máximo, mediano, medio y mínimo) para construir varios índices espectrales se completó el mapeo digital usando un geemap para integrar una biblioteca local de aprendizaje automático scikit-learn con GEE, a continuación, se realizó las predicciones y mapeos de salinidad. El estudio reveló que el período de mayo a septiembre mostró el mejor rendimiento en el modelo. Además, diferentes variables ambientales influyeron de manera distinta en el modelado durante este intervalo de tiempo. Se identificaron índices estables a lo largo del tiempo, como el índice de arcilla (CLEX), el índice de diferencia de vegetación (DVI), el índice de carbonato (CAEX), entre otros. Esto demuestra que el uso de Google Earth Engine (GEE) para seleccionar el período adecuado para sintetizar imágenes de detección remota tiene un efecto de predicción superior en comparación con la precisión de predicción utilizando imágenes de una sola fecha. En resumen, este estudio amplía la aplicación de GEE en el mapeo de suelos y mejora la predicción de la salinidad utilizando imágenes satelitales multitemporales.

(Huacani et al. 2021), evaluaron a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE) la desglaciación en el tiempo del glaciar de Ampay, Abancay periodo 2000-2019 para su evaluación y cuantificación, tipo de investigación aplicada con nivel descriptivo y método deductivo de enfoque cuantitativo. Calcularon el índice espectral de nieve/hielo a partir de imágenes satelitales de Landsat 7 y Landsat 8,

empleando algoritmos de JavaScript en el Code Editor para procesar los datos. Los resultados revelaron una reducción en la cobertura glaciar de 142 hectáreas, lo que equivale al 39.227% de pérdida (19 años). Para evaluar la hipótesis, realizaron un análisis de correlación Pearson, que mostró una correlación negativa significativa ($r = -0.594$) entre el área glaciar y el tiempo lo que indica que a medida incrementa los años el área glaciar disminuye, y una correlación positiva moderada ($r = 0.612$) entre el área glaciar y la precipitación acumulada lo que revela que cuando disminuye el área del glaciar también la variable de precipitación. La utilidad de la herramienta Google Earth Engine (GEE) se confirmó al analizar cómo el cambio climático está afectando el retroceso de la cobertura de nieve en el Glaciar del Ampay. Esto resalta la urgencia de implementar estrategias que promuevan medidas de adaptación adecuadas frente al cambio climático.

(Mendoza Sifuentes 2023), realizó una evaluación de las tendencias históricas de los cambios de las áreas urbanas y agrícolas con proyección al 2030 en las comunidades del Maito y Levanto, Chachapoyas. Se tomaron puntos de muestra en las comunidades a través del uso del GPS Diferencial Geo 7x clasificándolas en siete categorías áreas artificiales, agricultura, plantaciones forestales, arbustos, pastizales, cuerpos de agua y suelo desnudo para subir en formato Zip a Google Earth Engine (GEE) donde se realizó la selección de la colección Landsat 4,5 y 8, recorte del área de estudio y la aplicación de índices (NDVI, NDWI y SAVI) respectivamente para la exportación del mapa clasificado ArcGIS (10.5) donde se realizó la cuantificación de las áreas y posterior representación cartográfica. Como resultados se obtuvieron las áreas artificiales con un incremento durante el periodo 1995, 2021, 2030 con un porcentaje de 0.57%, 2,60 %y 3.03% respectivamente, se demostró que en el área de agricultura el crecimiento es lineal de los años 1995, 2016 de 24,91%, 31.24%, pero se evidencia que el año 2021 es de 23,45% y se prevé para el año 2030 su área representará 17,33%. Por lo tanto, se sugiere a las autoridades municipales y competentes que utilicen la plataforma GEE como una herramienta para prevenir la pérdida de tierras agrícolas y para planificar estratégicamente la reforestación en las comunidades de Maito y Levanto con el fin de conservarlas.

(Quispe Flores 2023), realizó un análisis espacial de los cuerpos de agua en el área minera de La Pampa, ubicada en la región de Madre de Dios durante el año 2022, como resultado de la deforestación. Se recopiló información cartográfica proporcionada por CINCIA (Centro de Innovación Científica Amazónica), y se seleccionaron imágenes satelitales con el uso del satélite Sentinel-2 a través de Google Earth Engine (GEE) para llevar a cabo una clasificación supervisada. Se empleó una índice kappa de referencia en la plataforma GEE para garantizar una medida estadística precisa de la confiabilidad de la clasificación. Se evaluaron cuatro algoritmos en la nube: support vector machine, random forest, minimum distance y classification and regression trees. La verificación y validación en el terreno se realizaron con el respaldo de imágenes satelitales. Los resultados mostraron que la superficie total de cuerpos de agua en el área fue de 5080.94 hectáreas, lo que representa el 37.91% del área deforestada para el año 2022. Además, se obtuvieron índices kappa de 0.745, 0.558, 0.669 y 0.462 para los cuatro algoritmos respectivamente, concluyendo que el algoritmo más adecuado para la detección de cuerpos de agua es el support vector machine. De esta manera se demuestra la capacidad de GEE para procesar y analizar grandes cantidades de datos de imágenes satelitales de manera eficiente, esto permite a los investigadores y autoridades obtener información confiable y estadísticamente precisa sobre la distribución de cuerpos de agua en la región estudiada, lo que puede ser crucial para la gestión ambiental y la toma de decisiones relacionadas con la conservación de recursos hídricos y la mitigación de los impactos de la deforestación.

Es esencial conocer la composición del suelo y los factores que contribuyen a su degradación para preservar los ecosistemas agrícolas y proteger el medio ambiente esta comprensión facilita la toma de decisiones relacionadas con prácticas agrícolas efectivas y medidas ambientales. (Melo et al. 2022). Debido a la alta influencia ejercida por la actividad humana, la deforestación conduce a la reducción de la cobertura forestal en áreas destinadas a la producción. (Cañete et al. 2023) En consecuencia, podemos afirmar que la deforestación representa uno de los desafíos más serios generados por acciones humanas, motivadas por la búsqueda de

ganancias económicas. Estudios demuestran que esta práctica contribuye a la erosión y desertificación. Es necesario conceptualizar la erosión, es la alteración de las funciones y la apariencia de la superficie terrestre debido a cambios en su uso y cobertura es un elemento crucial en la degradación del medio ambiente a niveles mundiales, regionales y locales.(Cachay Reynaga 2023). La degradación del suelo es producto del crecimiento precipitado de la población humana, lo que influye a su vez en la aceleración de la producción tanto ganadera como agrícola y, además, en la expansión de la tierra.(Melo et al. 2022).

Es necesario saber que el 33% de los suelos del mundo se encuentran en cierto nivel de degradación, lo cual manifiesta un incremento mundial de áreas degradadas y el proceso de desertificación de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). En América del Sur, la superficie de bosques naturales se reduce en un 16%, mientras que las áreas de cultivos, plantaciones y pastizales aumentan significativamente. Los bosques tropicales de Brasil y el Chaco en Argentina, Paraguay y Bolivia son ecosistemas altamente amenazados a nivel global debido a la expansión agrícola reciente. (Maillard et al. 2023). Para poder fomentar un ambiente seguro y saludable es necesario identificar los cambios en la naturaleza como el Impacto ambiental, que se refiere a la modificación del entorno natural, ya sea de manera directa o indirecta, debido a un proyecto o actividad que tiene el potencial de generar efectos en todas sus etapas, dentro de una zona específica.(Delgado Cárdenas 2020). Además, el cambio climático es la modificación en el clima, ya sea de manera directa o indirecta, debido a la influencia de la actividad humana que afecta la composición de la atmósfera global, se agrega a las variaciones naturales en el clima que se han observado en intervalos de tiempo similares. (Huacani et al. 2021)

En el año 2020, las áreas urbanas albergaban al 56,2% de la población mundial, y se prevé que la tendencia hacia la urbanización siga aumentando, llegando al 60,4% para 2030, estas cifras no consideran aún el impacto potencial de la pandemia de COVID-19. Además, se proyecta que la mayor parte del crecimiento urbano (90%) entre 2018 y 2050 se producirá en Asia oriental, Asia meridional y

África.(Tjia y Coetzee 2022). El desarrollo urbano y expansión de las ciudades conlleva a la expansión de las zonas urbanizadas, sustituyendo las funciones y servicios ambientales proporcionados por los paisajes naturales y seminaturales previos, esto resulta en cambios significativos en los ecosistemas a menudo de manera irreversible.(Vega et al. 2019). El reconocer el impacto de la expansión del desarrollo urbano nos permite dar a conocer herramientas que faciliten el análisis de datos de manera gratuita y eficiente. El uso y aplicación de la plataforma Google Earth Engine (GEE) fue presentado por Google en 2010 como una evolución de Google Earth, y en 2011 se publicaron los primeros documentos que hacían referencia a su utilización, asimismo, es considerada una herramienta eficaz que permite a los usuarios acceder, procesar y analizar grandes volúmenes de datos geoespaciales de manera rápida y eficiente, lo que la convierte en una herramienta poderosa para la investigación científica, la gestión ambiental, la agricultura de precisión, la vigilancia de desastres naturales y otras aplicaciones relacionadas con la observación de la Tierra (Vega et al. 2019). En esta plataforma, se dispone de un entorno de programación en línea denominado "Editor de Código de Earth Engine (Code Editor EE)," el cual está diseñado para simplificar el acceso a la interfaz de programación de aplicaciones (API), aplicaciones de terceros y bibliotecas de clientes, es así que los usuarios tienen la capacidad de redactar y ejecutar secuencias de comandos, lo que significa que pueden expresar sus solicitudes de manera programática. (Eraso Terán, Badia i Perpinyà y Gisbert i Traveria 2022).

Los avances en el procesamiento de datos satelitales se benefician de sistemas basados en la nube, que permiten a los usuarios acceder a datos geoespaciales y realizar análisis de manera rápida a través de interfaces web.(Delpino Marimón et al. 2021). La plataforma ofrece métodos sólidos de clasificación de Cambio de Uso del Suelo y Cubierta Terrestre (LULC) mediante algoritmos esto permite obtener información valiosa sobre el uso de la tierra de diversas fuentes, lo que puede ser útil para desarrollar estrategias de gestión y mejorar la situación del uso de la tierra.(Kouassi et al. 2023). La teledetección ofrece la oportunidad de analizar características operativas de los sistemas ecológicos,

abarcando desde la escala de los ecosistemas, y en este proceso, los índices espectrales resultan altamente eficaces en esta caracterización.(Janampa Torres y Ponce Cristobal 2022).Asimismo una de las metodologías con énfasis de la pérdida forestal son los Índices de vegetación, como el índice espectrales, permitirá conocer la disminución y el grado de afectación de la cobertura vegetal con resultados muy detallados , con mínima presencia de nubes. Las imágenes de satélite ofrecen información a diferentes escalas espaciales, desde la caracterización del entorno natural hasta detalles como árboles y edificios a nivel submétrico. Además, proporcionan alta resolución y están disponibles de forma gratuita para el público en general. (Metzler et al. 2023). Las imágenes de teledetección, capturadas generalmente por satélites, son una valiosa fuente de información para la toma de decisiones políticas y la planificación urbana. En las revisiones recientes sobre métodos de estimación de la deforestación, se destacan dos enfoques diferentes para monitorear extensas áreas forestales: el muestreo puntual y el mapeo exhaustivo de toda la extensión del bosque (enfoque "pared a pared").(Grinand et al. 2013).

Satélite Landsat (Cheng et al. 2021), Son una fuente de monitoreo terrestre que registra imágenes de alta resolución conformada por siete satélites, permitiendo visualizar cantidad de imágenes de un solo punto. Administrado por USGS. Para poder desarrollar se identificó las características de los Landsat para adecuarse al objetivo del informe, describiendo Landsat 7, Permite evaluar resolución espacial y espectral, se puede almacenar aproximadamente cien imágenes de estudio. La resolución será a través del Sentinel 2, proporcionan imágenes multiespectrales con alta resolución. Según (Calisaya Calisaya 2023), El procesamiento de datos satelitales tiene como finalidad observar elementos de interés mediante un ordenador, el cual interpreta datos capturados en imágenes adquiridas de manera remota. Estas imágenes poseen atributos de calidad como:

La resolución espectral se refiere al espectro de frecuencias de longitud de onda que una imagen es capaz de captar y almacenar. La resolución espacial se asemeja a la calidad de una imagen en televisión. Cuanto mayor sea la calidad de la imagen,

mayor será su resolución, lo que implica que los detalles en la zona fotografiada aumentan y la calidad de lo que se puede capturar también mejora. La resolución radiométrica se refiere al número de niveles digitales requeridos para representar la información recopilada por un sensor. La resolución temporal se relaciona con la frecuencia en la que se obtienen imágenes de un área específica a partir de un satélite, y también se puede llamar intervalo de revisión. La corrección radiométrica implica asignar valores a cada píxel de una imagen, lo cual se modifica debido a las influencias del movimiento de la atmósfera. La corrección atmosférica es necesaria debido a la presencia de partículas en suspensión y nubes en la atmósfera, ya que estas alteran los valores de las imágenes capturadas por los satélites. Según el aspecto teórico definido por (Kouassi et al. 2023), hace referencia a : En los últimos años, la teledetección ambiental ha experimentado un avance significativo debido a la amplia disponibilidad de datos satelitales. La combinación de datos temporales y espectrales, junto con los costos más bajos de procesamiento y adquisición, ha llevado a un aumento en la utilización de estos datos para estudiar la superficie terrestre.

El enfoque conceptual a tomar en cuenta en el presente proyecto de investigación según (FAO y PNUMA 2020) define: Deforestación, Es una variación de la corteza terrestre de forma permanente o temporal, debido a actividades de expansión de agricultura y ganadería. Por consecuencia la eliminación de coberturas vegetales genera la pérdida de flora y fauna tanto como de su hábitat, acumulación de gases de efecto invernadero.

La Erosión, es la pérdida de la capa superficial y nutrientes del suelo debido a prácticas inadecuadas, por consiguiente, la reducción de su capacidad para filtrar contaminantes y mantener la biodiversidad. Hay cuatro tipos de erosión: hídrica (causada por una mala gestión agrícola), eólica, física y química.(Huacani et al. 2021)

Degradación de Tierras, es un fenómeno desencadenante de actividades humanas como: uso inadecuado de tierras agrícolas, practicas deficientes de suelo, pastoreo

excesivo, deficiencia en ordenación de suelos, deforestación, sobreexplotación de vegetación, ya que superpone los cambios negativos en el ecosistema para prestar bienes y servicios: biológicos, sociales, económicos.(Baigorria y Romero 2007)

Huella Ecológica, Se trata de la estimación entre la población y el ecosistema, en donde expresa la cantidad requerida de hectáreas para producir alimentos, madera, e infraestructura. Por consiguiente, la huella ecológica consiste en hacer un análisis sobre el impacto de la población sobre el medio ambiente.

Infraestructura, se trata de diversidad de entidades mixtas de intereses y factores sociales como elementos o servicios con el fin último de promover la dinámica social, económica y ambiental como la producción, transporte, carreteras, centrales hidroeléctricas, entre otros. (Delpino Marimón et al. 2021)

La teledetección, ciencia interdisciplinaria que utiliza tecnología con sensores en plataformas espaciales para recopilar información mediante ondas electromagnéticas su aplicación ha aumentado debido a su capacidad para obtener datos en diversas áreas, como la superficie terrestre, agricultura, erosión, deforestación y más.(Logroño-Naranjo et al. 2020)

Los sensores satelitales son una herramienta informática que posibilita la adquisición de datos a distancia sobre la superficie terrestre y la atmósfera. Estos datos pueden ser de diversos tipos, incluyendo información espacial, espectral, radiométrica y temporal. Por ejemplo, Landsat es un sistema que permite obtener datos en alta resolución de la cobertura terrestre de manera repetida, lo que brinda información valiosa sobre los cambios en el paisaje a lo largo del tiempo. (Quispe Flores 2023)

Satélites Landsat: La serie de satélites Landsat es capaz de ofrecer observaciones detalladas del terreno con una alta resolución espacial (30 m) y frecuencia de revisión (cada 8 días) gracias a sus dos satélites en operación. Esto los convierte en una opción ideal para obtener sobre cambios en la superficie terrestre a nivel local o fino.(Shang et al. 2022)

Google Earth Engine, Es una plataforma gratuita en la nube, de gran escala que facilita la valoración de la cobertura terrestre apoyado con un interfaz de valoración y Data Script (Waleed et al. 2023). Las imágenes satelitales Sentinel-2 de alta resolución espaciotemporal permiten monitorear y rastrear de manera rutinaria las distribuciones espaciales. (Zhang et al.2023)

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

3.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, conforme con el objetivo se busca analizar la deforestación y erosión de suelo desde el año 2010 hasta el año 2021, a través de un análisis espacio temporal en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa y cuantificar el área deforestada y erosionada. Se realizó el planteamiento, validación de una problemática en específico, para aplicar una solución, presentando la relación entre combinar teoría y producto es concepto de Investigación **Aplicada** (Castro Maldonado, Gómez Macho y Camargo Casallas 2023).

3.1.2 Diseño de investigación

El diseño de investigación utilizado es de tipo **No Experimental**, ya que no se manipulan las variables. En este tipo de estudios, no se altera deliberadamente la variable independiente para observar su efecto en otra variable; en cambio, se observó la variación de la deforestación y la erosión a lo largo de varios años de estudio. Para llevar a cabo esto, se realizó un análisis espacio-temporal de imágenes satelitales utilizando programas como Google Earth Engine (GEE) y QGIS, lo que permitió obtener datos sin necesidad de manipular variables.

El diseño de la investigación es de tipo no experimental **longitudinal**, ya que implica la observación periódica de cambios a lo largo de un período prolongado. Este enfoque se centra en visualizar la variación de variables a lo largo del tiempo. Además, implica la recopilación de datos mediante el procesamiento de imágenes satelitales en plataformas como Google Earth Engine (GEE) y QGIS para analizar la deforestación y la erosión a lo largo del tiempo.

3.2 Variables y operacionalización

Variable Independiente: Deforestación y erosión de suelo

Definición conceptual: La deforestación definida como aquel proceso provocado por el ser humano donde las áreas forestales son destruidas y agotadas con la finalidad que el suelo sea favorable para nuevas actividades (Prem, Saavedra y Vargas 2020). La erosión del suelo es un fenómeno natural controlado por factores biofísicos e influenciado por el uso del suelo y de forma especial por la cobertura vegetal y actividades agrícolas. (Rumpel 2022).

Definición operacional: Para cuantificar aquellos impactos provocados a través del tiempo por la deforestación y erosión del suelo se realizaron por medio de imágenes satelitales obtenidas de Google Earth Engine (GEE).

Indicadores: Agricultura y Crecimiento demográfico

Escala de medición: Anexo 01

Variable Dependiente: Análisis espacio temporal mediante Google Earth Engine (GEE)

Definición conceptual: Es una herramienta de programación considerada como una plataforma tecnológica, la cual brinda al usuario una colección de datos espaciales además de imágenes satelitales los mismos que permiten efectuar monitoreos sobre modificaciones ocurridos en el suelo.(Castro Camacho 2022).

Definición operacional: Las imágenes satelitales descargadas de la plataforma GEE, serán procesadas en QGIS a través de la combinación de bandas espectrales con la finalidad de determinar las modificaciones ocurridas en el área de estudio.

Indicadores: Landsat 7, Sentinel 2

Escala de medición: Anexo 01

3.3 Población, muestra, muestreo y unidad de análisis

3.3.1. Población

El presente estudio de investigación tiene como población la provincia de Arequipa. De acuerdo, (Hernandez Sampieri, Fernández Collado y

Baptista Lucio 2014). Define una población o universo como el conjunto de la totalidad de casos que concuerdan con determinadas especificaciones.

Criterios de inclusión: El segmento demográfico considerada fue la provincia de Arequipa ya que cuenta con mayor crecimiento urbano.

Criterios de exclusión: Se discriminó las provincias próximas de Arequipa.

3.3.2. Muestra

Según (Hernandez Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio 2014). Define a la muestra como subgrupo de la población o universo del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de ésta. La muestra fue representada por el distrito de Cerro Colorado en la provincia de Arequipa, considerada la más extensa abarcando una extensión territorial de 174.9 km².

3.3.3. Muestreo

El presente trabajo de investigación es de tipo no probabilístico por conveniencia debido a que permitió seleccionar de acuerdo al interés y criterio de la investigación. Los datos tomados son de proximidad geográfica, accesibles y de representatividad de la población. (Tamara Otzen y Carlos Manterola 2017).

3.3.4. Unidad de análisis

El punto principal de estudio fue el análisis de la deforestación y erosión del suelo en la provincia de Arequipa.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

La observación consiste en una detallada y organizada percepción de los fenómenos relacionados con los objetivos de la investigación en condiciones naturales y habituales, sin interferir intencionalmente en ellos.(GARCÍA Dihigo 2016).

La técnica empleada para la recopilación de datos es la observación de imágenes satelitales descargas de la plataforma Google Earth Engine (GEE) durante el periodo 2010 al 2021, dicho método implica registrar de manera sistemática, válida y confiable los comportamientos y situaciones observables utilizando un conjunto de categorías y subcategorías. Consiste en tomar información y registrarla para su análisis posterior.(Hernandez Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio 2014)

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

El instrumento de recolección de datos empleado fue el software QGIS, Google Earth Engine (GEE) y Microsoft Excel para la representación estadística del análisis y cuantificación de las áreas deforestadas y erosionadas.

La ficha de recolección de datos y ficha de campo, permitieron evidenciar muestras de puntos del distrito de Cerro Colorado identificando cinco categorías:

- Suelo desnudo
- Zonas agrícolas/vegetación
- Zonas urbanas
- Cobertura forestal/bosques
- Cobertura de nieve

3.5 Procedimientos



Figura 1 Diagrama de flujo de procesamiento de imágenes satelitales para el análisis de la deforestación y erosión de suelo

Fuente: Elaboración propia

a. Definición de la zona de estudio

Se define la zona de estudio comprendiendo el límite total distrital de Cerro Colorado en esta presente investigación se considera analizar el entorno de las zonas:

- Zonas Urbanas
- Zonas Agrícolas
- Zona Periférica

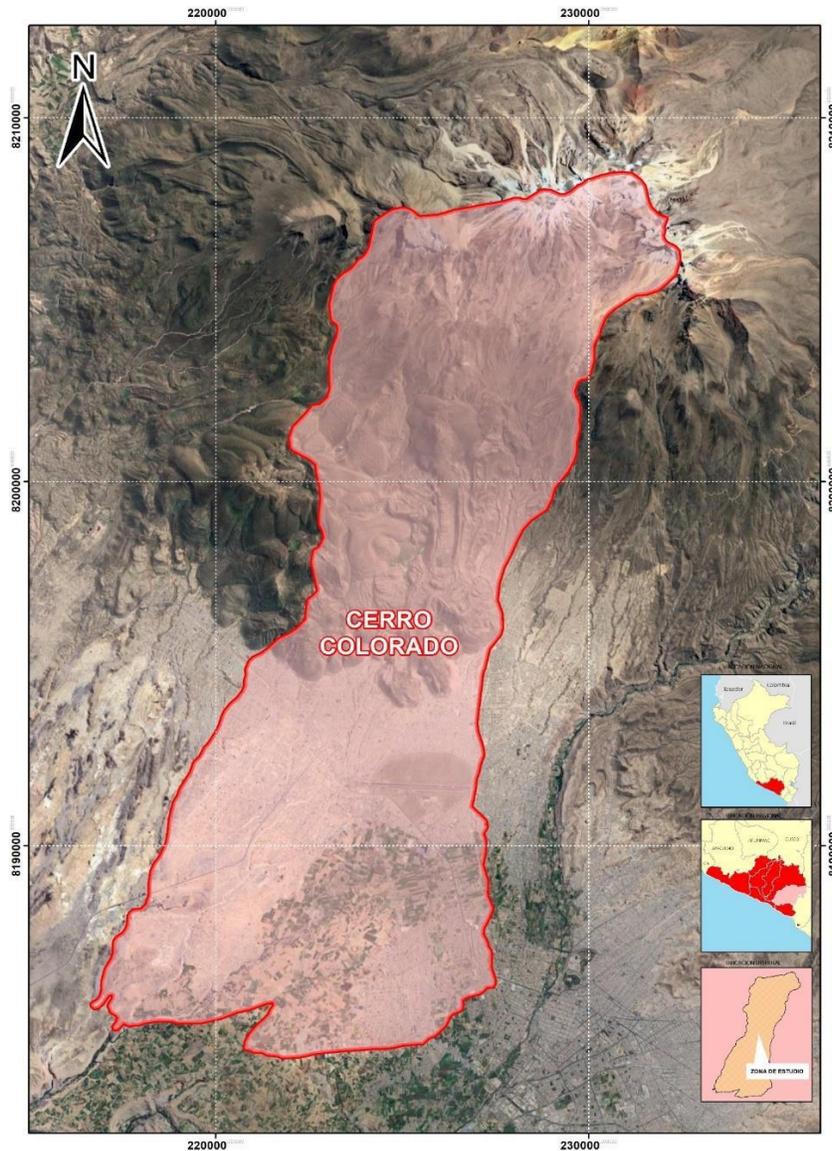


Figura 2 Mapa de ubicación del distrito de Cerro Colorado, Arequipa

Fuente: Google Earth Engine, 2023

b. Selección de intervalo de análisis

En la presente investigación de análisis espacio temporal de la deforestación y erosión de suelo se determinó realizar un análisis considerando un intervalo de tiempo de cada dos años y de un año, siendo el año inicial 2010 y de termino 2021.

c. Selección de imágenes satelitales

Se consideró para la selección de imágenes el periodo de Estación seca

- Landsat 7 (disponibilidad en tiempos pasados y la resolución. espacial 30m y 15m aplicando métodos específicos)
 - Sentinel 2 (Resolución espacial 10 m)
- d. Métodos de corrección de imágenes satelitales
- Los métodos de corrección aplicadas a las imágenes satelitales fueron dados con correcciones básicas tales como la corrección geométrica y orto rectificación de las imágenes satelitales, dichos procesos anteriormente mencionados están incluidos en los módulos de descarga con corrección L1
- e. Code Editor GEE Process
- Espacio de trabajo nos permitió la delimitación de la zona de estudio, procesamiento y corrección de imágenes Satelitales.
- f. Procesamiento de información Geoespacial
- Clasificación Supervisada; Aplicación del método específico para la detección de coberturas boscosas y cambios a nivel geomorfológico, que indiquen erosión.
- g. Time Series Analyst
- Análisis multitemporal de datos obtenidos y comparación de datos (diferencia de perdidas, áreas de perdida, etc.).
- h. Cuantificación, delimitación de áreas y porcentajes de pérdidas de cobertura
- Se logró delimitar, cuantificar y hallar el porcentaje de las áreas de perdida durante el periodo 2010-2021.
- i. Representación cartográfica de los resultados del análisis multitemporal
- Aplicación de métodos de geo procesamiento (QGIS: Mapas, etc.).

3.6 Método de análisis de datos

Se realizó un análisis de correlación con la finalidad de según (Martínez Curbelo, Cortés Cortés y Pérez Fernández 2016), evaluar la tendencia de la relación entre variables (Datos experimentales), generalmente lineal y existen estadísticos para evaluar las relaciones de una forma paramétrica y de otra no paramétrica. Esta matriz de correlación de Pearson proporciona datos en escala e indicará el grado de relación entre las variables. Todos los datos

obtenidos en campo fueron estudiados, técnica avanzada que ayudó en el procesamiento de datos.

$$P_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}}$$

Donde:

σ_{XY} es la covarianza de (X, Y)

σ_X es la desviación estándar de la variable X

σ_Y es la desviación estándar de la variable Y

3.7 Aspectos éticos

El presente trabajo de investigación se realizó basándose en principios y cultura ética (aspectos buenos y malos) y morales (normas, valores, costumbre de cada persona) para evitar o minimizar comportamientos ilegales, Durante el desarrollo de esta investigación ha tomado como soporte diversos autores salvaguardando su propiedad ya que se han citado y colocado las fuentes bibliográficas.(Cagle y Baucus 2006), atribuyendo en todo momento su autoría.

Según (Rosales Cevallos Marco Mauricio 2021) La ética es considerada una filosofía moral ya que permite evaluar y orientar a las personas lo correcto de lo incorrecto se ha citado y colocado las fuentes bibliográficas. El plagio es una práctica desleal que consiste en tomar ideas ajenas como propias, violando los derechos del autor. Además de tener como soporte el uso de software que permitirá bajo su estructura y criterio la herramienta del Turnitin, el uso de este recurso será vital para detectar cualquier tipo de plagio, y así verificar la originalidad de la presente investigación. (Fuentes 2019).

IV. RESULTADOS

4.1. Organización, presentación y análisis de resultados

El presente estudio se enmarca dentro de esta línea de investigación, centrándose en el distrito de Cerro Colorado, en el departamento de Arequipa, Perú, durante el periodo comprendido entre 2010 y 2021. La elección de esta región como área de estudio se fundamenta en su importante extensión territorial, su diversidad ecológica y la presencia de amenazas a la integridad de sus ecosistemas, como la deforestación y la erosión del suelo.

Para alcanzar nuestros objetivos, se empleó una metodología robusta y avanzada, aprovechando las capacidades de Google Earth Engine (GEE) para el procesamiento y análisis de datos de teledetección a gran escala. El proceso de obtención de resultados preliminares se dividió en varias etapas, cada una de las cuales desempeñó un papel crucial en la adquisición de datos precisos y fiables.

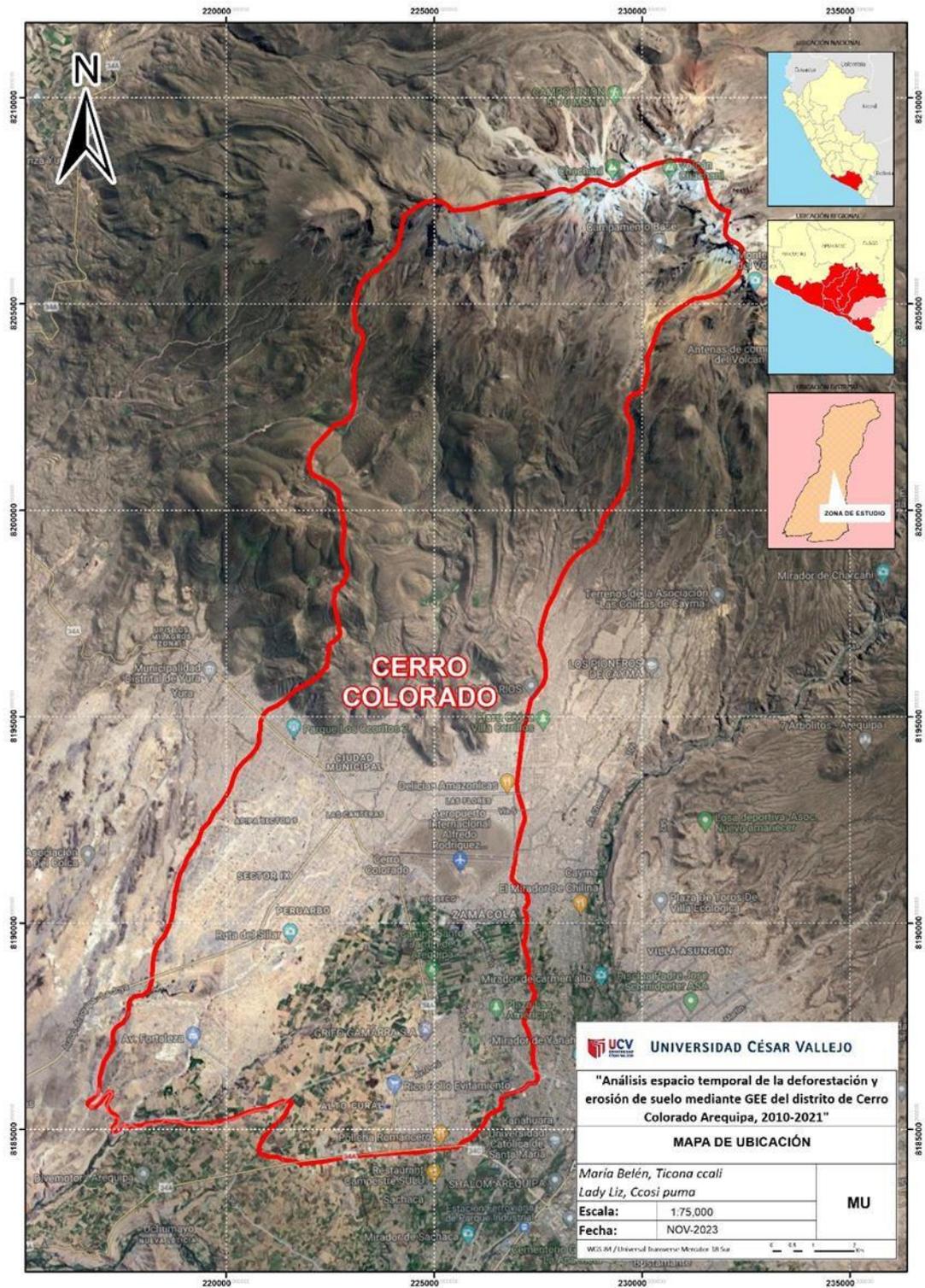


Figura 3 Mapa de ubicación de zona de estudio (cerro colorado) en Google Earth Engine

Fuente: Elaboración propia

La primera etapa consistió en delimitar la zona de estudio, concretamente el distrito de Cerro Colorado. Esto se llevó a cabo en dos fases. En primer lugar, se definieron los límites generales de la región de interés mediante el

programa informático de código abierto QGIS. Posteriormente, esta delimitación se afinó utilizando herramientas GEE, garantizando la coherencia espacial y la precisión de nuestros análisis.

Una vez establecida con precisión la región de estudio, se extrajeron puntos clave de interés, estratégicamente situados en zonas históricamente identificadas como propensas a la deforestación y la erosión del suelo. La selección de estos puntos permitió un seguimiento detallado de las tendencias y cambios en estas áreas críticas a lo largo del periodo de estudio.

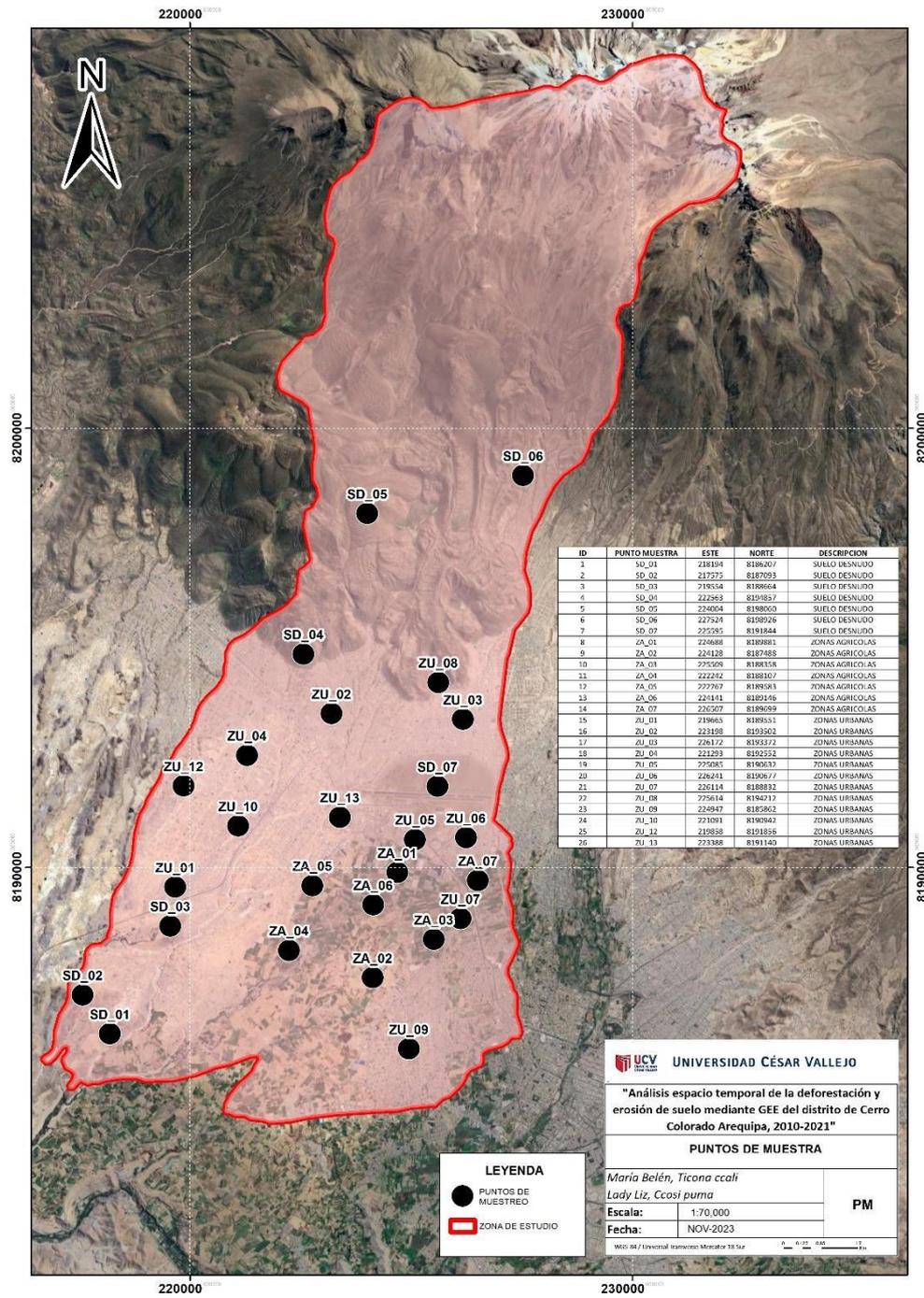


Figura 4 Puntos de muestra para la clasificación supervisada en QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo se definieron categorías para la correcta identificación de los elementos o puntos “muestreados” en la superficie, dichos puntos ayudaran a identificar si el suelo tiene cobertura vegetal al momento del muestreo, cobertura de bosques, suelo desnudo, etc. Por ello en la siguiente tabla se identificaron las categorías y los respectivos identificativos.

Tabla 1 Estaciones meteorológicas al rededor del Nevado Coropuna

ID	PUNTO MUESTRA	ESTE	NORTE	DESCRIPCION
1	SD_01	218194	8186207	SUELO DESNUDO
2	SD_02	217575	8187093	SUELO DESNUDO
3	SD_03	219554	8188664	SUELO DESNUDO
4	SD_04	222563	8194857	SUELO DESNUDO
5	SD_05	224004	8198060	SUELO DESNUDO
6	SD_06	227524	8198926	SUELO DESNUDO
7	SD_07	225595	8191844	SUELO DESNUDO
8	ZA_01	224688	8189881	ZONAS AGRICOLAS
9	ZA_02	224128	8187488	ZONAS AGRICOLAS
10	ZA_03	225509	8188358	ZONAS AGRICOLAS
11	ZA_04	222242	8188107	ZONAS AGRICOLAS
12	ZA_05	222767	8189583	ZONAS AGRICOLAS
13	ZA_06	224141	8189146	ZONAS AGRICOLAS
14	ZA_07	226507	8189699	ZONAS AGRICOLAS
15	ZU_01	219665	8189551	ZONAS URBANAS
16	ZU_02	223198	8193502	ZONAS URBANAS
17	ZU_03	226172	8193372	ZONAS URBANAS
18	ZU_04	221293	8192552	ZONAS URBANAS
19	ZU_05	225085	8190632	ZONAS URBANAS
20	ZU_06	226241	8190677	ZONAS URBANAS
21	ZU_07	226114	8188832	ZONAS URBANAS
22	ZU_08	225614	8194212	ZONAS URBANAS
23	ZU_09	224947	8185862	ZONAS URBANAS
24	ZU_10	221091	8190942	ZONAS URBANAS
25	ZU_12	219858	8191856	ZONAS URBANAS
26	ZU_13	223388	8191140	ZONAS URBANAS

Fuente: Elaboración propia

Nota: datos recopilados en campo y post procesados en QGIS, sobre el mapa base de Google Hybrid.

Para obtener información detallada sobre los cambios en la cubierta vegetal y los procesos erosivos, se empleó la clasificación supervisada de

imágenes de satélite. Las imágenes de los satélites Landsat 7 y Sentinel 2, con su alta resolución espacial y temporal, se utilizaron para identificar y cuantificar los cambios en la vegetación y la exposición del suelo en el distrito de Cerro Colorado a lo largo de los años. Esta clasificación supervisada se basó en algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes y análisis espectral, dando lugar a resultados precisos y detallados.

En resumen, este estudio representa un esfuerzo exhaustivo y minucioso para analizar la dinámica de la deforestación y la erosión del suelo en el distrito de Cerro Colorado, aprovechando el poder de las tecnologías de teledetección y la plataforma GEE. Los resultados preliminares obtenidos hasta la fecha aportan valiosos conocimientos sobre la evolución de estos procesos en la región, sentando las bases para futuras investigaciones y contribuyendo a la comprensión y gestión sostenible de este ecosistema crítico en el departamento de Arequipa.

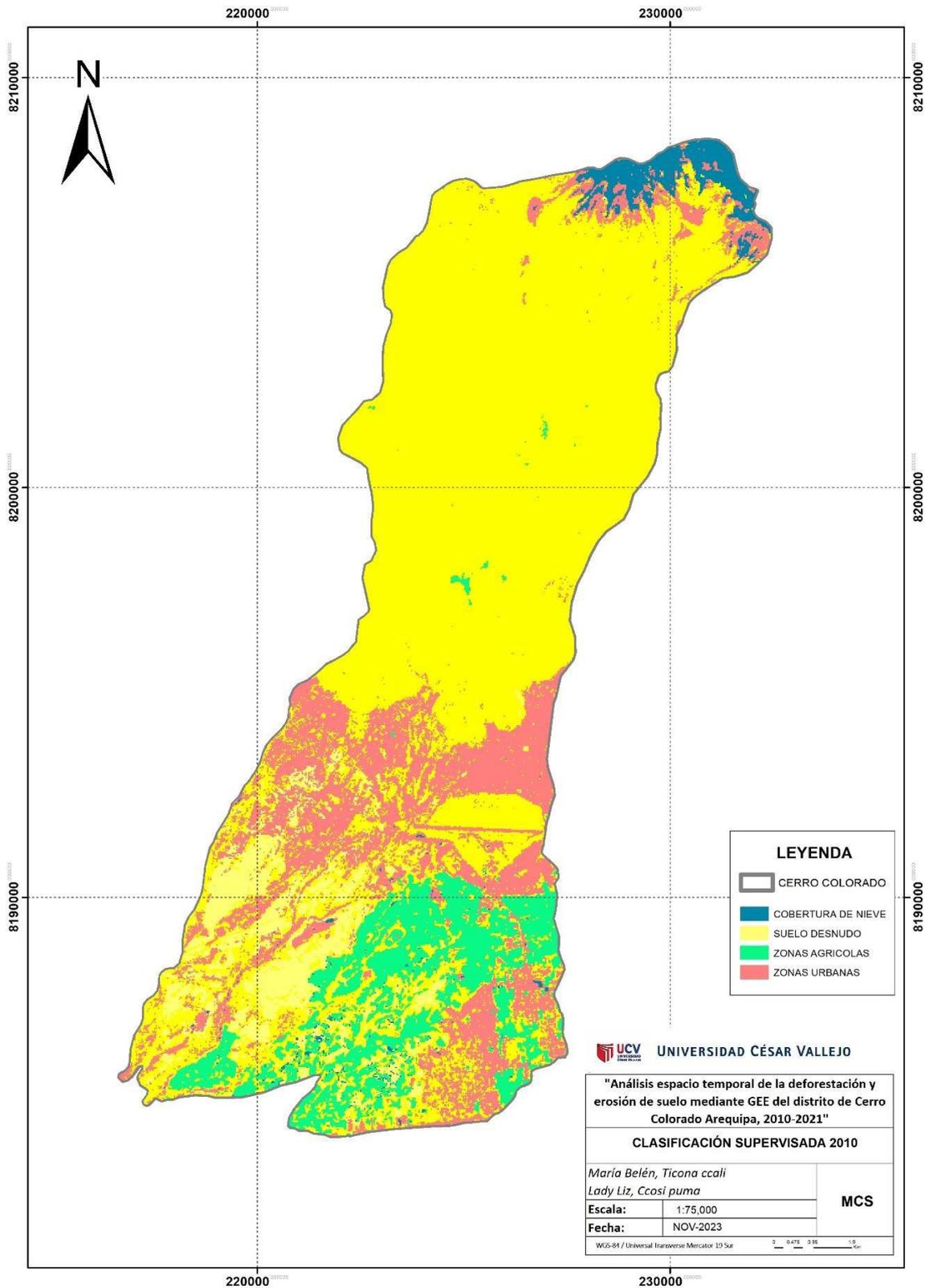


Figura 5 Mapa de la clasificación supervisada en QGIS –Landsat 7-2010

Fuente: Elaboración propia

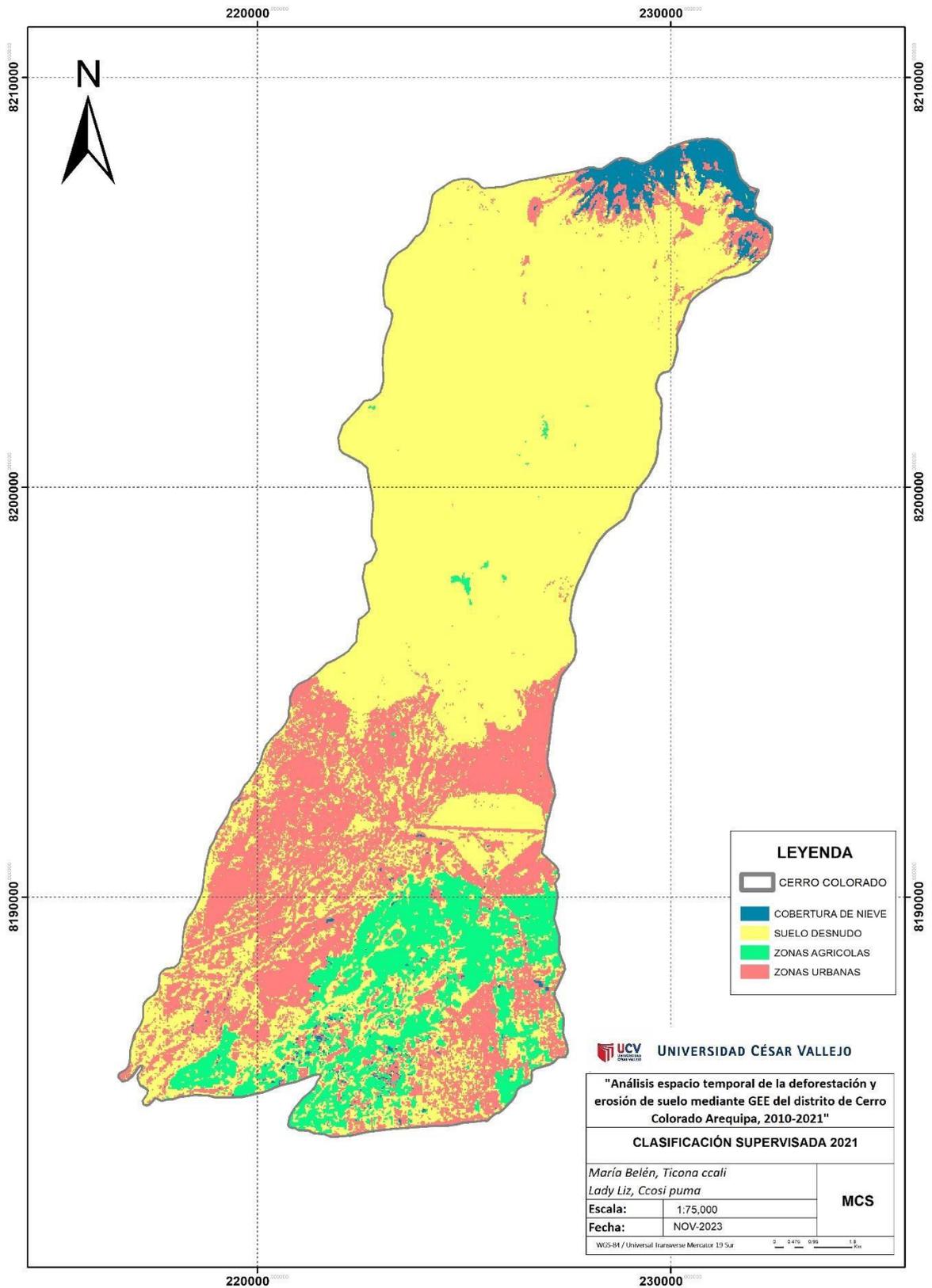


Figura 6 Mapa de la clasificación supervisada en QGIS Sentinel 2 – 2021.

Fuente: Elaboración propia

Es esencial tener en cuenta que, los valores notificados para 2010 y 2021 se basan en la clasificación supervisada realizada en QGIS. Esto significa que los datos de entrenamiento y las firmas espectrales se utilizaron para clasificar toda la imagen y generar las áreas de clase de cobertura del suelo en hectáreas. La precisión de la clasificación depende en gran medida de la calidad de los datos de entrenamiento y de la elección de los algoritmos de clasificación.

En general, la clasificación supervisada es un proceso crítico en la interpretación de datos de imágenes de satélite y proporciona información valiosa para el análisis de los cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo. Se calculó el área deforestada y se observó una reducción de suelo desnudo de 1951.50 ha, con un incremento significativo de zonas urbanas de 1985.80 ha.

I.1.1. Resultados 2010 - 2012

Los resultados para los periodos 2010 y 2012, demostraron una disminución en algunas categorías, así mismo en algunos se evidenció un claro incremento, entre este periodo de 2 años, se evidenció una pérdida de suelo desnudo de 194.11 ha. respecto al año 2010, siguiendo una aparente tendencia de decrecimiento a nivel de suelo desnudo, este resultado indica la pérdida de suelos por efectos de la erosión de este, por actividades antrópicas, más específicamente por ocupación de estos suelos con fines de urbanización, así mismo, los resultados que se obtuvieron para la categoría de zonas urbanas, claramente coincide con el área perdida de suelo desnudo, el área para la categoría de zonas urbanas, no sufre una pérdida, más si un incremento, con un área total de incremento de 196.51 ha., es decir, es ligeramente igual al área perdida que se evidencio en el suelo desnudo, por lo tanto se puede concluir, que según se pudo evidenciar, existe una tendencia en el tiempo de, que el suelo desnudo disminuya producto de la erosión por ocupación urbana y donde las zonas urbanas tienen aparentemente tienen un crecimiento en el tiempo.

En la categoría de zonas agrícolas y/o vegetación, no se pudo evidenciar un cambio a nivel de la cobertura, por lo tanto, aparentemente no existe una pérdida, si no que se mantiene en el tiempo, es importante aclarar, que los resultados para esta categoría no fueron los esperados, debido al error de fill de las bandas del satélite Landsat 7, por lo tanto, mediante la técnica de fotointerpretación se pudo evidenciar lo anteriormente descrito.

En la categoría de cobertura de bosques, según la técnica aplicada en esta presente investigación, no se pudo evidenciar la presencia de coberturas de bosques en este periodo de 2 años analizados.

En cuanto a la cobertura de nieve, los resultados mostraron una disminución de 2.50 ha. de cobertura de nieve del volcán Chachani, es importante definir que la cobertura de nieve puede ser muy variable en función a las condiciones climáticas, así mismo la técnica empleada también es importante, así mismo estos ecosistemas son muy frágiles al cambio climático.

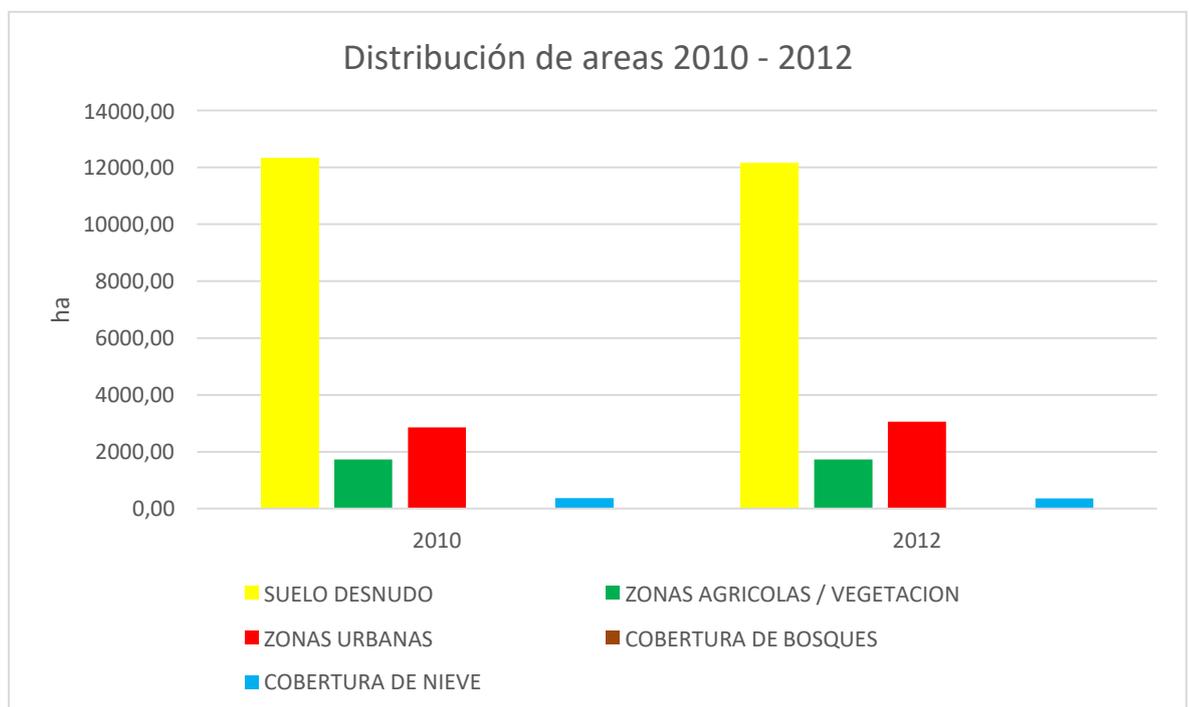


Figura 7 Distribución de resultados 2010 - 2012

Fuente: Elaboración propia

I.1.2. Resultados 2012 - 2014

Los resultados que se obtuvieron por cada categoría designada en esta investigación para los periodos 2012 – 2014, demostraron un patrón de crecimiento de las zonas urbanas, en una medida no muy significativa, así mismo en la categoría de suelo desnudo presento una reducción menor que lo ocurrido en el año 2012.

Las zonas urbanas en periodo del 2012 – 2014, demostró un crecimiento de 132.42 ha con respecto al año 2012. aparentemente el crecimiento no fue tan importante durante ese periodo, indicando que las causas pueden ser variadas, por otro lado, el suelo desnudo tiene un registro de pérdidas bajo, con respecto al año 2012, donde se evidencio una pérdida de 36.88 ha. a diferencia del año 2012 donde se perdió más de 194 ha., esto podría ser un buen indicador, donde las zonas urbanas presentaron un detenimiento el crecimiento o expansión, así mismo la reducción de los suelos desnudos por erosión claramente es baja.

Las zonas agrícolas y/o vegetación, según los resultados que se obtuvieron, demostraron un decrecimiento de 30.14 ha. con respecto al año 2012, los factores en este caso pudieron ser las prácticas agrícolas empleadas, ya que es importante aclarar, que el análisis con imágenes satelitales aplicada a esta presente investigación fue en temporadas de estiaje.

La cobertura de bosque según la técnica empleada en esta investigación, evidencio que no hay cobertura de bosques detectable según el método empleado.

Con respecto a la cobertura de nieve del volcán Chachani, se pudo evidenciar una reducción de dicha cobertura, en un área total de 65.29 ha. perdidas con respecto al año 2012, donde los factores climáticos y efectivamente el cambio climático juega un rol muy importante, al afectar este tipo de ecosistemas muy importantes a nivel de cuenca.

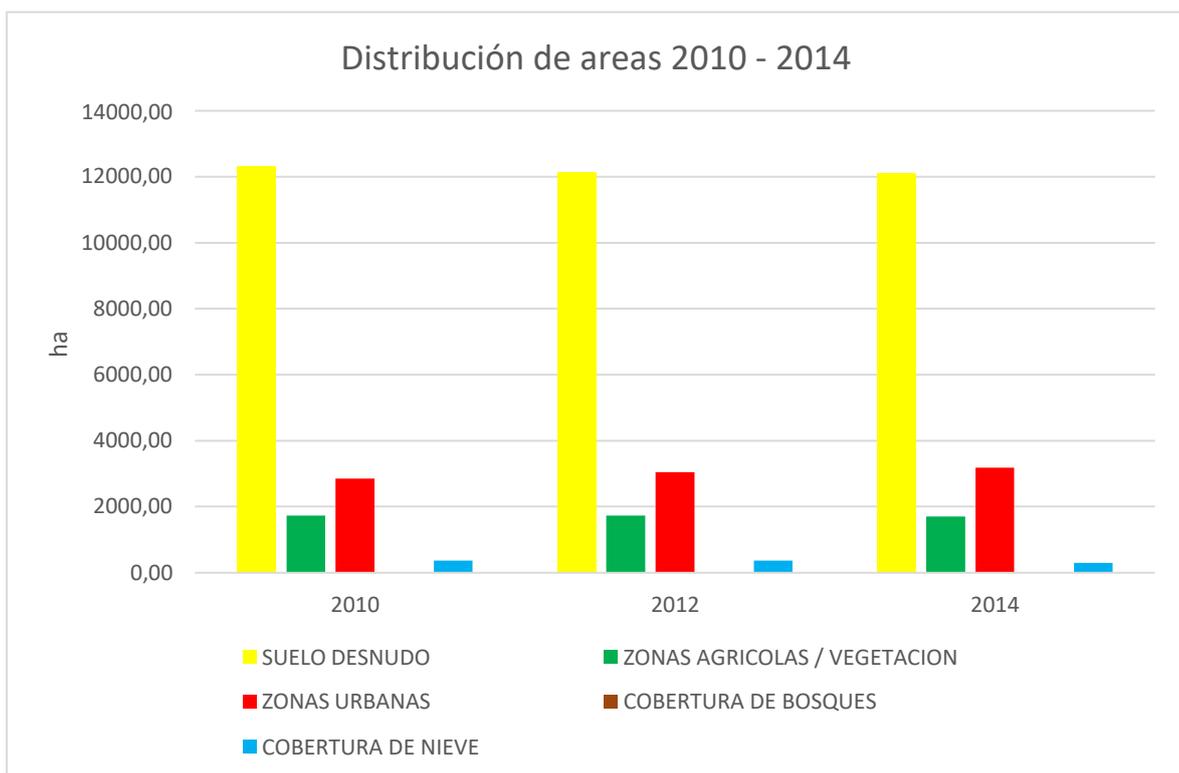


Figura 8 Distribución de resultados 2012 - 2014

Fuente: Elaboración propia

I.1.3. Resultados 2014 - 2016

Los resultados en este periodo de análisis, según la continuación de la serie temporal analizada, se evidenció un incremento muy importante de las zonas urbanas, así mismo una reducción muy apreciable de las zonas agrícolas y/o vegetación.

Los resultados que se obtuvieron en esta presente investigación, evidenciaron, que, el suelo desnudo tiene un aparente incremento a nivel de área respecto al año 2014, donde se apreció un decrecimiento, este fenómeno es muy importante analizar, debido a que se apreció un incremento de 83.65 ha. de área, respecto al año 2014, para ello es importante aclarar que la técnica empleada en esta presente investigación, detecto como suelo desnudo a aquella superficie sin cobertura de las categorías establecidas en este análisis, por ello, este resultado tiene una relación directa con el decrecimiento de las zonas agrícolas y/o vegetación, donde se perdió 268.65 ha con respecto al año 2014, ya que las áreas no

fueron ocupadas por las zonas agrícolas y/o vegetación, fueron consideradas como suelo desnudo, esto debido a la técnica empleada en esta investigación, esto explica el “incremento” aparente del suelo desnudo este periodo de análisis (2016).

Las zonas urbanas tuvieron un importante crecimiento con respecto al año 2014; se evidencio un incremento de 334.49 ha. con respecto al años 2014, esto claramente indico un crecimiento muy agresivo de las zonas urbanas, donde nos advirtió la posible expansión de la ocupación urbanas de manera exponencial en el futuro y bastante nociva para los suelos por los efectos de la erosión, que este tipo de actividades conlleva.

Los resultados de cobertura de bosques evidencio que, según la técnica empleada, no se pudo detectar esta categoría en la zona de estudio, más, sin embargo, se evidencio un resultado de decrecimiento del área, de 149.49 ha. de la cobertura de nieve del volcán Chachani con respecto al año 2014.

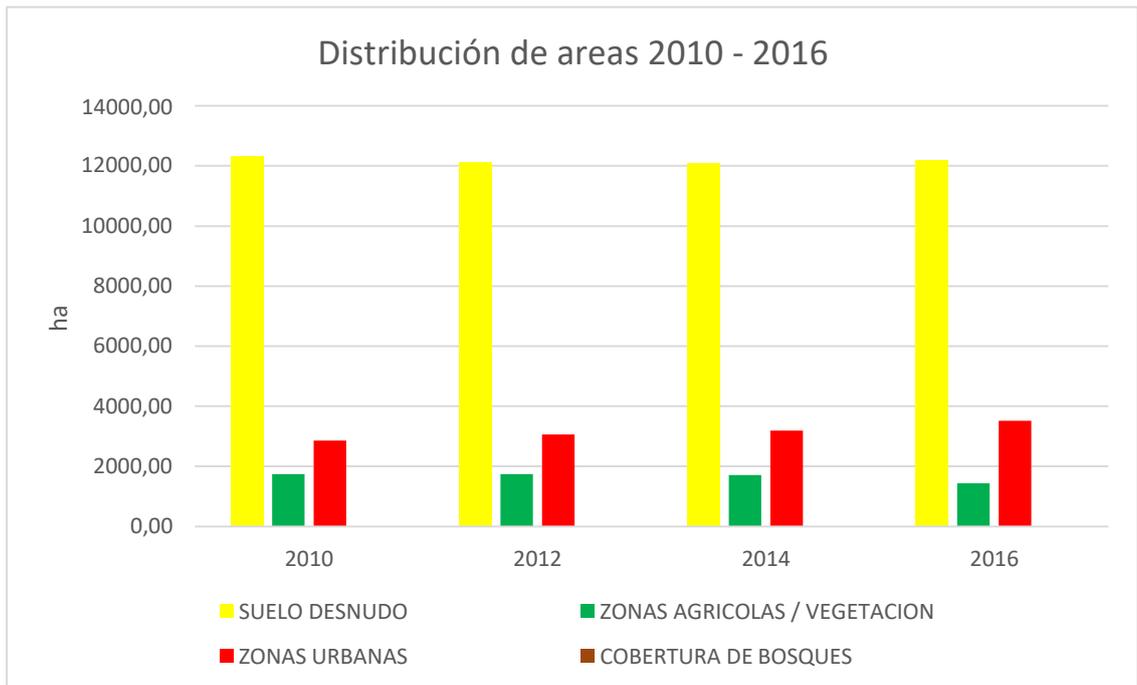


Figura 9 Distribución de resultados 2014 – 2016.

Fuente: Elaboración propia

I.1.4. Resultados 2016 - 2018

En análisis que se realizó para estos periodos, demostró resultados más preocupantes, con respecto al año 2016, el crecimiento urbano para este periodo fue más agresivo, así mismo la erosión del suelo por efectos antrópicos fue más apreciable.

El suelo desnudo desapareció en área con una cantidad de 654.64 ha. con respecto al año 2016, es una perdida bastante apreciable de suelo desnudo en un periodo de solo 2 años, por lo tanto, la erosión del suelo fue bastante agresiva en este periodo, así mismo, las zonas urbanas evidenciaron un crecimiento, bajo la misma magnitud de perdida que el suelo desnudo respecto al año 2016, por ello, se determinó un crecimiento de las zonas urbanas con un área de 468.14 ha. con respecto al año 2016, por lo tanto, puedo evidenciar un crecimiento agresivo, ocupando territorios que no necesariamente fueron habitados.

Las zonas agrícolas y/o vegetación tuvieron un incremento apreciable, con respecto al año 2016, se evidencio un área total de 197.25 ha. con respecto al año anterior, esto pudo ser debido a las prácticas agrícolas, así

mismo debido a la demanda misma de productos agrícolas, por el crecimiento evidenciado de las urbanizaciones.

En cuanto a cobertura de bosques, así como en los anteriores periodos, no se evidencio coberturas boscosas con la técnica empleada dentro de la zona de estudio, por otro lado, la cobertura glaciara experimento un decrecimiento de área, donde se evidencio una pérdida de 10.75 ha. con respecto al año anterior, los factores son asociados a los procesos climatológicos y los efectos del cambio climático.

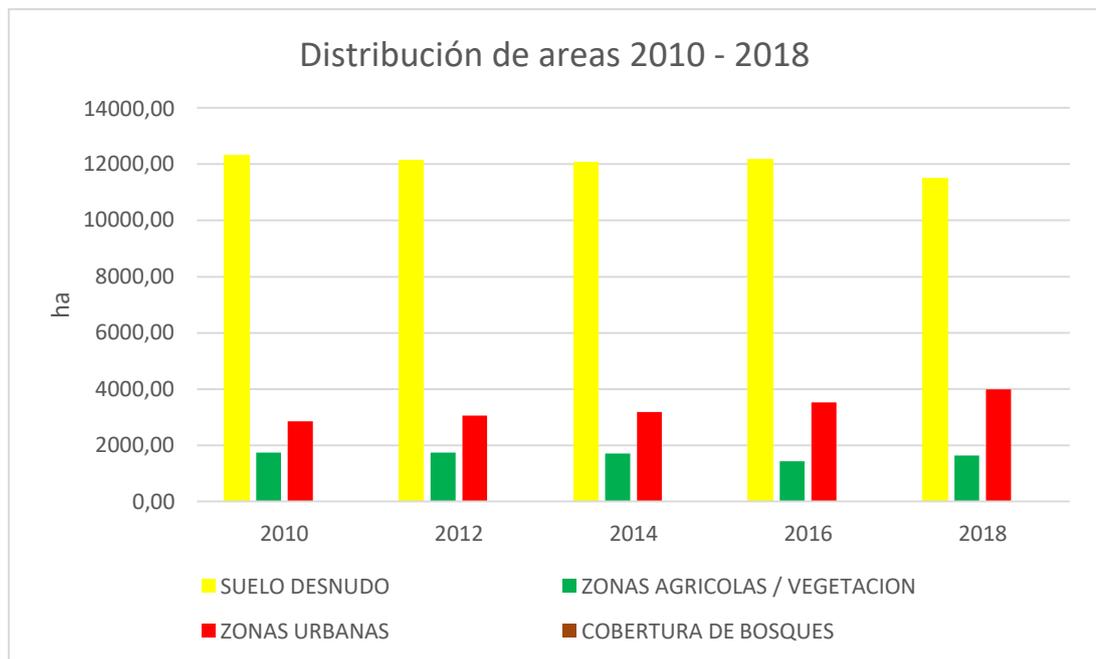


Figura 10 Distribución de resultados 2016 – 2018

Fuente: Elaboración propia

I.1.5. Resultados 2018 – 2020

Los resultados para este periodo de análisis, demostraron que la tasa fue creciente de manera exponencial de las zonas urbanas y la pérdida de suelos estuvo en auge.

Los suelos perdieron 338.81 ha. con respecto al año 2018, por lo tanto, la cantidad de suelo erosionada es agresiva, siendo los resultados muy proporcionales al crecimiento urbano, donde se le atribuyó la afección directa de los suelos a las actividades antrópicas de ocupación, así mismo, las zonas urbanas obtuvieron un crecimiento exponencial, ocupando un

total de 4307.40 ha. desde el año 2010, y creciendo en un total de 320.48 ha. respecto al año 2018.

La cobertura de bosques este intervalo de tiempo analizado, demostró resultados similares a los anteriores, donde no se evidencio cobertura alguna.

Se evidencio un ligero incremento de las actividades agrícolas dentro de la zona de estudio, con un área total de 5.48 ha. con respecto al año 2018, esto podría explicarse debido al crecimiento de las necesidades poblacionales dentro del distrito.

La cobertura de nieve experimentó un ligero incremento también, con un área de 12.86 ha. con respecto al año 2018, los causales de estos efectos son evidentemente las actividades climáticas y las variabilidades, donde las probabilidades de precipitación y nieve en la temporada de análisis fue alta.

Se identificó un crecimiento de las zonas urbanas de 1985.80 ha, lo que indica una expansión urbana a costa de áreas de suelo desnudo.

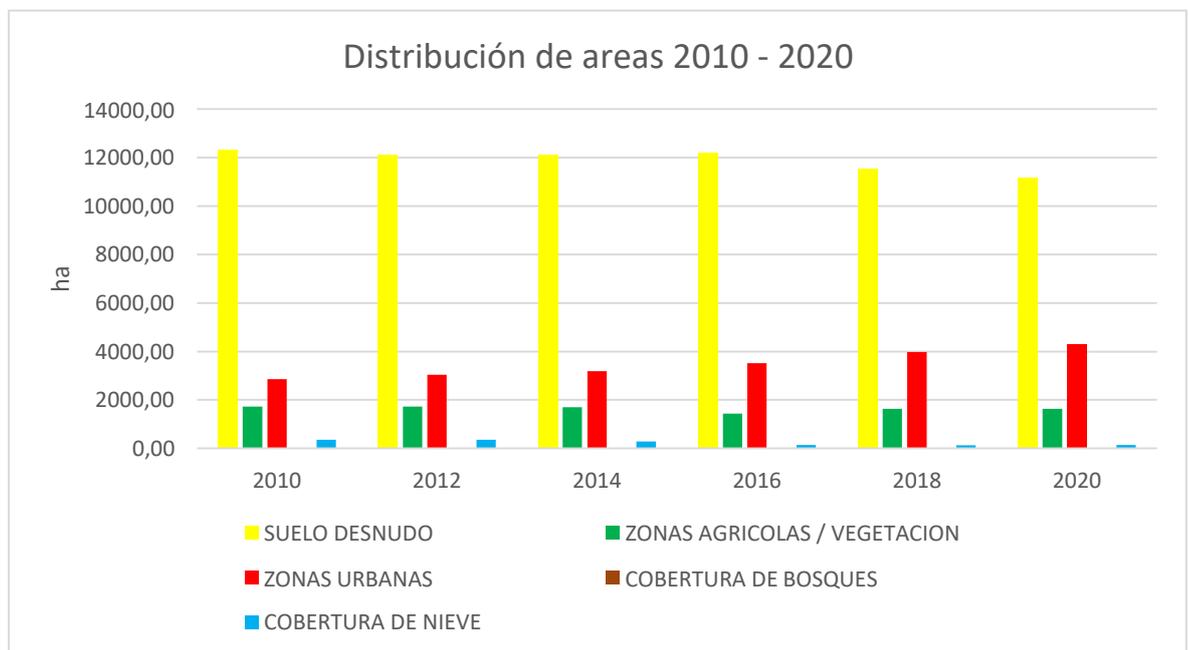


Figura 11 Distribución de resultados 2018 – 2020

Fuente: Elaboración propia

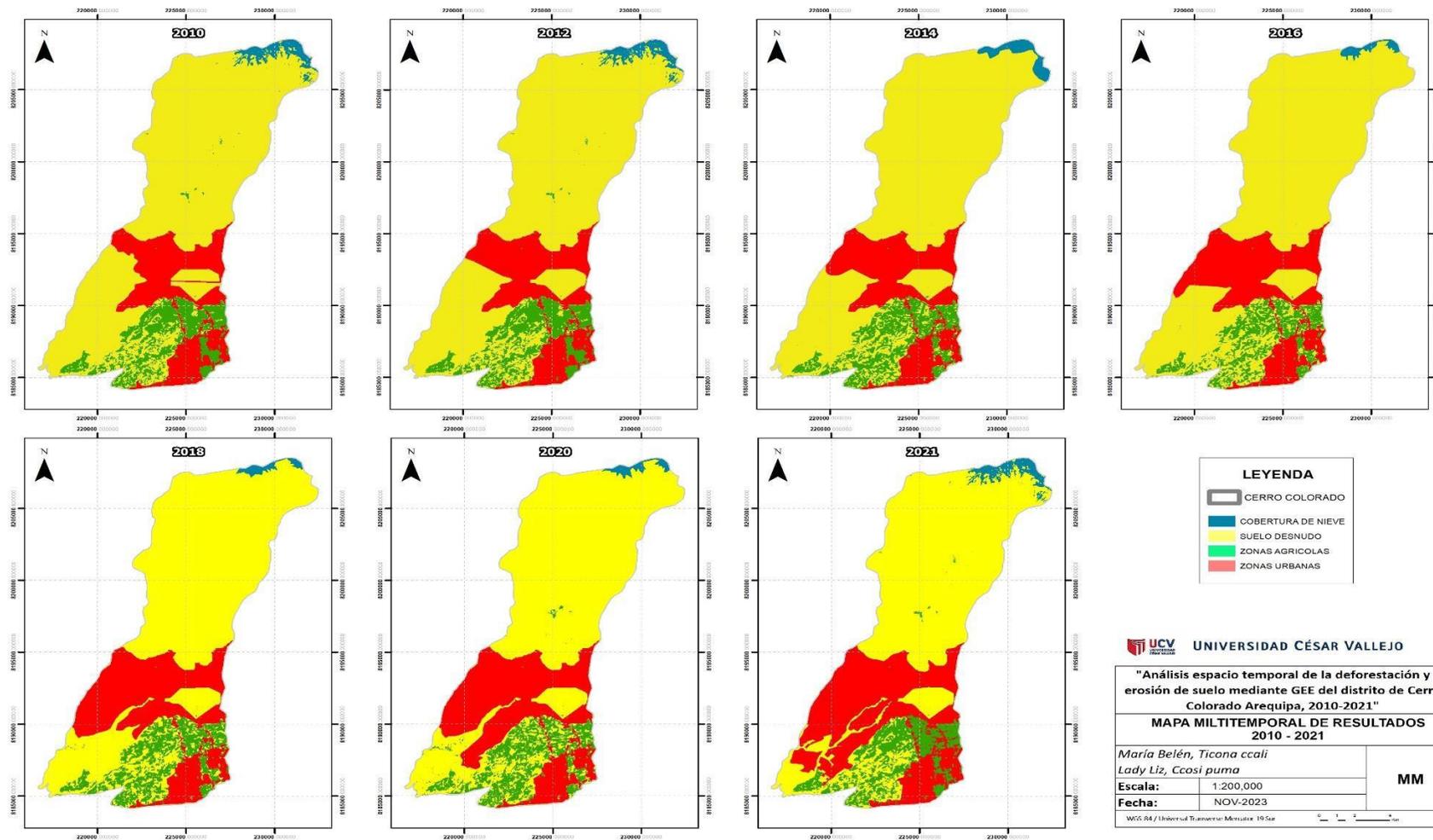


Figura 12 Mapa de evolución multitemporal de las categorías analizadas 2010 – 2021.

Fuente: Elaboración propia

Para esta presente investigación se definieron, 05 categorías, siendo estas las “guías” para definir el análisis de clasificación supervisada y por consecuente demostrar la erosión atravez de las categorías enlistadas son las siguientes:

Tabla 2 Categorías de análisis de áreas

ITEM	DESCRIPCIÓN	CODIFICACION DE COLORES
1	Suelo desnudo	Amarillo
2	Zonas agrícolas / vegetación	Verde
3	Zonas urbanas	Rojo
4	Cobertura de bosques	-
5	Cobertura de nieve	Azul

Fuente: Elaboración propia

El suelo desnudo define áreas alrededor de las demás categorías consideradas, es decir, son áreas que no contienen vegetación, coberturas boscosas, así mismo no existen asentamientos sobre ellas, por lo tanto, pueden agrupar diferentes tipos de suelo, los resultados dentro de un lapso de 11 años, sugiere una reducción del suelo desnudo, en aproximadamente 1951.50 Hectáreas, siendo está ocupada mayormente por las zonas urbanas, advirtiendo un claro proceso de erosión.

En cuanto a las zonas agrícolas, es importante aclarar, que se consideró dentro de esta categoría a la vegetación, debido a las características de flora y vegetación dentro del distrito de cerro colorado (Zeballos Velarde 2020), donde claramente desde una perspectiva geoespacial, las actividad agrícolas es predominante, así mismo se consideró el nivel de detalle que la resolución espacial de los satélites Landsat 7 y Sentinel 2 pueden recopilar, bajo esas circunstancias, se evidencio una reducción de 34 hectáreas dentro de un periodo de 11 años, entendido que la dinámica agrícolas dentro de la ciudad de Arequipa es variable, dependiendo de las estaciones y cultivos (Atlas Ambiental Arequipa, 2020).

Las zonas urbanas son evidentemente las mayores predominantes dentro de la zona de estudio, los resultados evidenciaron un incremento muy importante

dentro del periodo temporal 2010 y 2021, con un área de incremento de 1985.80 Hectáreas, así mismo, desde una perspectiva de análisis e interpretación de imágenes satelitales, es muy evidente el avance de las zonas urbanas dentro del distrito de cerro colorado, erosionando el suelo a través de los procesos de ocupación urbana.

Los resultados a nivel de cobertura de bosques, fue negativa, debido a que la distribución de especies arbóreas es muy específica dentro del territorio Arequipeño, así mismo en las faldas del Volcán Chachani no se detectaron coberturas de bosque a través de los procesos de teledetección aplicados en esta investigación, por otro lado, es evidente que la mayor distribución, así mismo la existencia de bosques nativos, están por el distrito de chiguata y las faldas del volcán Pichu Pichu. .Zaballos Velarde (2020)

Finalmente, la cobertura de nieve encontrada dentro del distrito de cerro colorado, pertenece a la cobertura de la cima del volcán Chachani, siendo una parte perteneciente según los límites del distrito de Cerro Colorado, se evidencio un decrecimiento aparentemente leve de la cobertura de nieve, con 0.21 Hectáreas perdidas dentro de 11 años, esto claramente dado por los procesos de cambio climático Francou y Pouyaud (2007)

Tabla 3 Resultados de áreas por categoría

DESCRIPCION	AREA ha						
	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2021
SUELO DESNUDO	12329.51	12135.39	12098.52	12182.17	11527.52	11188.71	10378.00
ZONAS AGRICOLAS / VEGETACION	1733.99	1733.99	1703.84	1435.19	1632.44	1637.91	1699.90
ZONAS URBANAS	2855.35	3051.86	3184.28	3518.77	3986.92	4307.40	4841.15
COBERTURA DE BOSQUES	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
COBERTURA DE NIEVE	366.05	363.55	298.26	148.77	138.02	150.88	365.85

Fuente: Elaboración propia

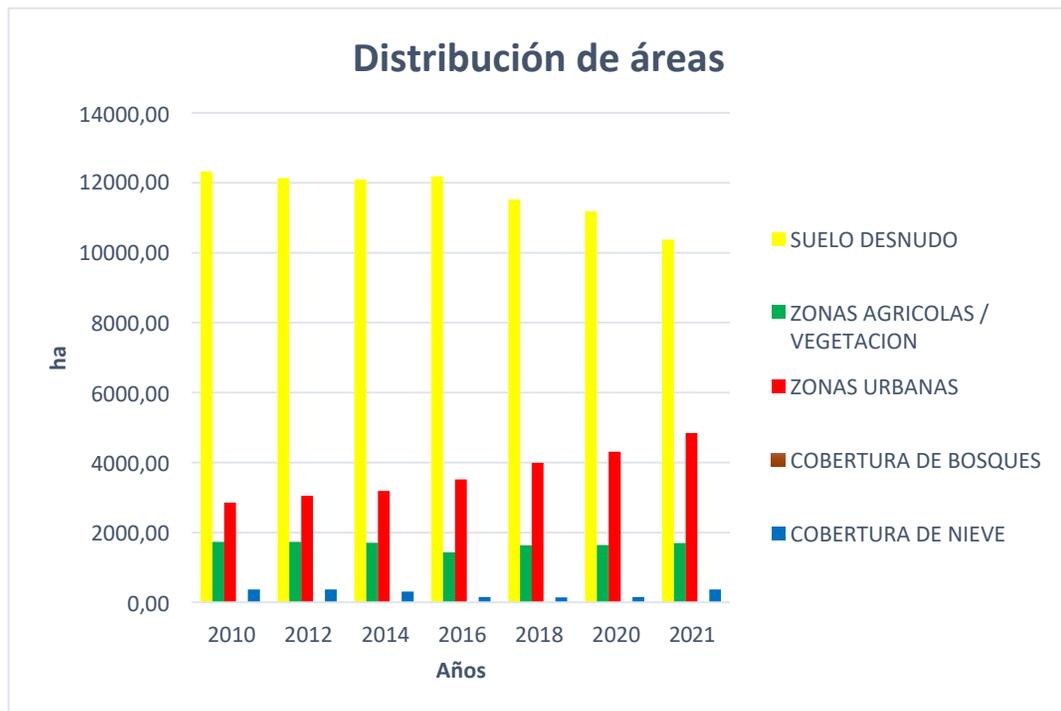


Figura 13 Distribución de resultados de áreas según Clasificación Supervisada

Fuente: Elaboración propia

4.2.1. Suelo desnudo

Los resultados a nivel de suelo desnudo dentro de la zona de estudio de esta presente investigación, demostraron una relación aparente con las zonas urbanas, la mayoría de los suelos dentro del distrito de Cerro Colorado, son suelos eriazos, que fueron ocupados progresivamente por las zonas urbanas.

Tabla 4 Resultados de suelo desnudo 2010 – 2021

SUELO DESNUDO		
AÑO	ha	%
2010	12329.51	71.3
2012	12135.39	70.2
2014	12099.43	70.0
2016	12183.12	70.5
2018	11528.23	66.7
2020	11189.18	64.7
2021	10378.00	60.0

Fuente: Elaboración propia

Para el periodo 2010 se evidencio una área total de 12329.51 hectáreas, representando un 71.3% de la zona de estudio, siendo este el área de mayor predominancia dentro del distrito de Cerro Colorado, según los resultados procesados en esta presente investigación, en el periodo 2021, se obtuvo un área total de 10378.00 hectáreas de suelo desnudo distribuido dentro de la zona de estudio, representando un 60% del total de área de la zona de estudio, según dichos resultados, es bastante evidente la reducción de suelo desnudo entre el periodo 2010 y 2021, así mismo existe una clara diferencia de porcentajes, con respecto al año 2010 existe una diferencia del 10%, por lo tanto el área perdida es de 1951.50 hectáreas dentro de 11 años; donde se presume la ocupación de suelos por el crecimiento urbano dentro del distrito de Cerro Colorado, erosionando y afectando a la fauna y flora propia de los ecosistemas eriazos Zevallos (2020), así mismo estos suelos expuestos a la erosión por los procesos de expansión urbana son considerados irrecuperables hasta cierto punto, en la mayoría de casos los suelos son roturados y acarreados, en procesos de nivelación del suelo con maquinaria

para su posterior lotización y venta, bajo esta circunstancia los suelos del distrito de Cerro Colorado están siendo explotados con dichos fines, según datos del Gobierno Regional de Arequipa, la mayor distribución y/o concentración de viviendas están en el distrito de Cerro Colorado.

Los resultados comparados de los años 2010 y 2021 a nivel de suelo desnudo, evidencian una tendencia de decrecimiento (ver figura 14), en una tasa aproximada de más de 190 ha/año (hectáreas por año) y un decrecimiento de más del 10% dentro de 10 años, bajo dicha perspectiva los suelos de la zona de estudio, están bajo una eminente desaparición en las próximas décadas, donde se presume la ocupación urbana descontrolada, según la figura 14, existe una relación de tendencia lineal de decrecimiento, con un R^2 igual a 0.819, aunque es importante considerar que es necesario tener una mayor agrupación de datos históricos para corroborar dicha tendencia.

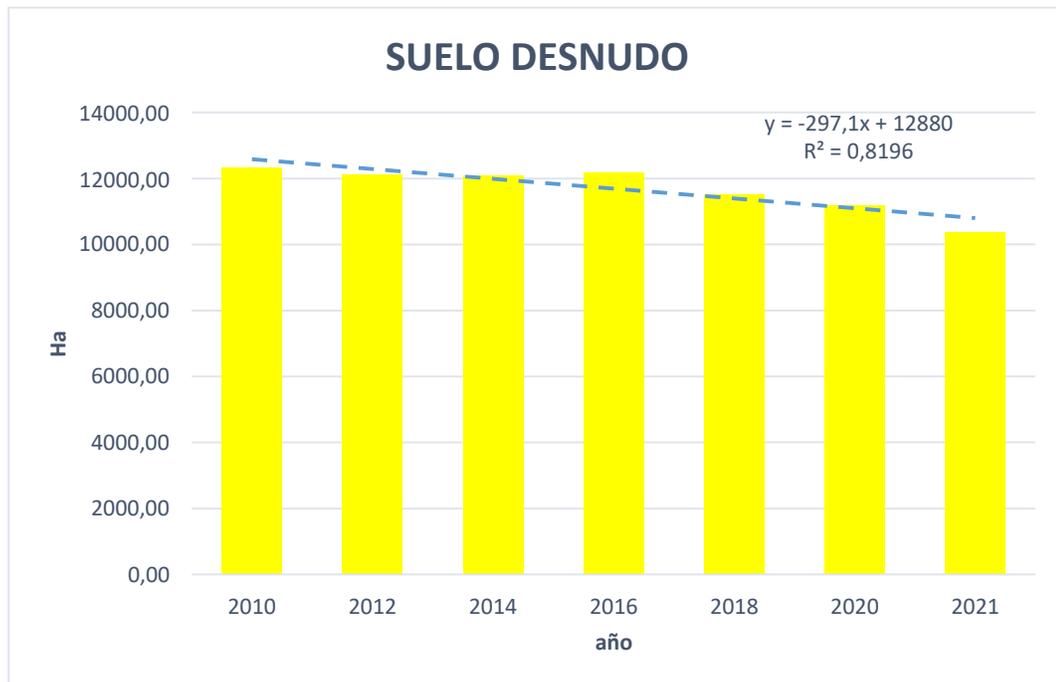


Figura 14 Gráfico de comparación de resultados de suelo desnudo del 2010 al 2021.

Fuente: Elaboración propia

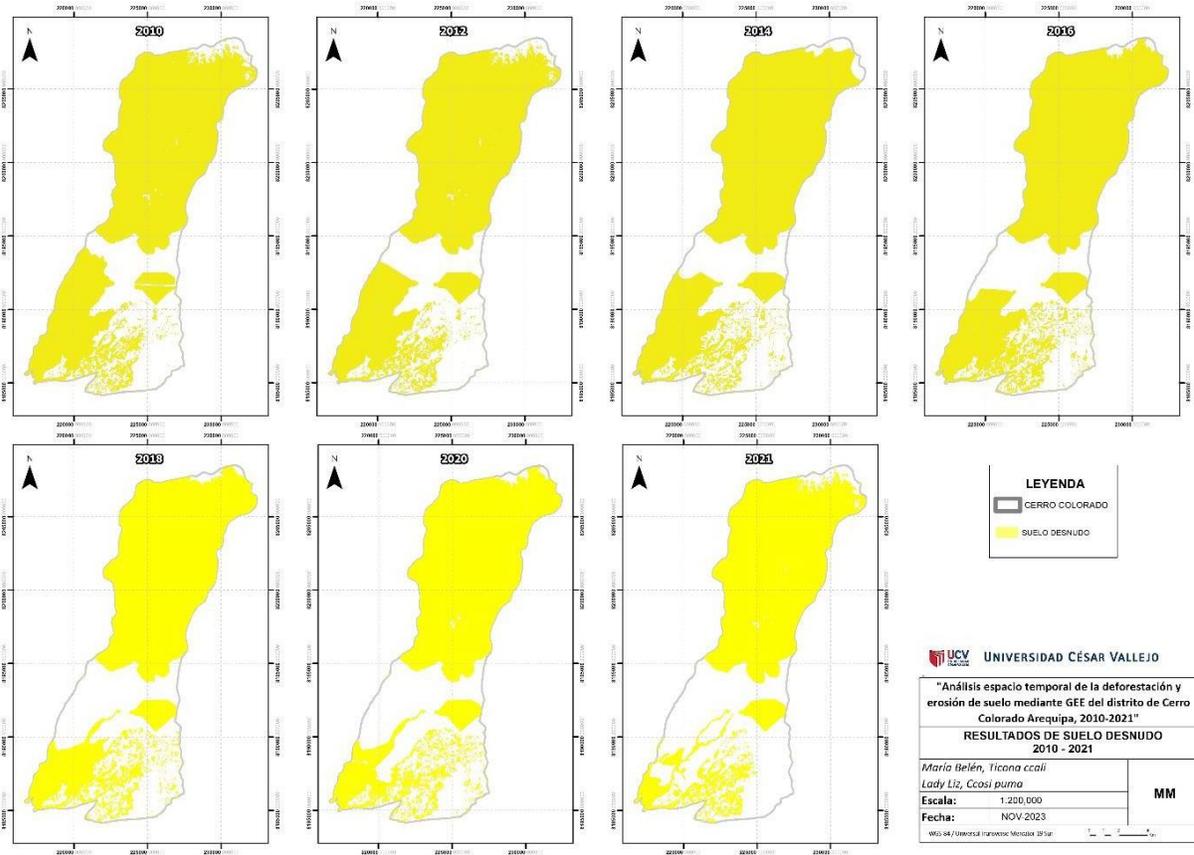


Figura 15 Mapa de evolución multitemporal de la categoría suelo desnudo 2010 – 2021

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Zonas agrícolas y Vegetación

Las zonas agrícolas y la vegetación existente dentro de la zona de estudio de esta presente investigación, se consideraron bajo una categoría, debido a que la resolución espacial o tamaño de pixel de cada sensor satelital utilizado, no puede diferenciar específicamente la vegetación a un nivel detallado, es por ello que se determinó tomar la cobertura agrícola como representativa.

Tabla 5 Resultados de Zonas agrícolas y Vegetación 2010 – 2021

ZONAS AGRICOLAS / VEGETACION		
AÑO	Ha	%
2010	1733.99	10.0
2012	1733.99	10.0
2014	1703.84	9.9
2016	1435.19	8.3
2018	1632.44	9.4
2020	1637.91	9.5
2021	1699.90	9.8

Fuente: Elaboración propia

Los resultados para el año 2010 mostraron un área total de 1733.99 hectáreas de zonas agrícolas y vegetación dentro de la zona de estudio, en consideración con respecto al distrito de estudio, representó un 10% del total de área, para el año 2021 se puede mostrar 1699.90 hectáreas de área, siendo este un 9.8% del total de área en el año 2021, con dichos resultados se puede asumir una pérdida mínima de área equivalente a un 0.19%, por lo tanto se asumió una pérdida de 34.09 hectáreas en un periodo de 11 años, es importante aclarar que los aspectos de flora y vegetación, tienen una relación con los procesos bioclimáticos propios de los ecosistemas desérticos y montañosos ZEE (2019), así mismo los procesos agrícolas están estrechamente relacionadas a las prácticas agrícolas en función a cada producto o especie cultivada, por lo tanto los resultados pueden tener esa variabilidad, para ello es recomendable generar un análisis con mayor detalle, respecto a las pérdidas de área agrícolas y de cobertura vegetal.

Es importante destacar que el mantenimiento de zonas agrícolas sostenibles es esencial para la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de la región. Sin embargo, es crucial garantizar que la agricultura se lleva a cabo de forma sostenible para evitar la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad.

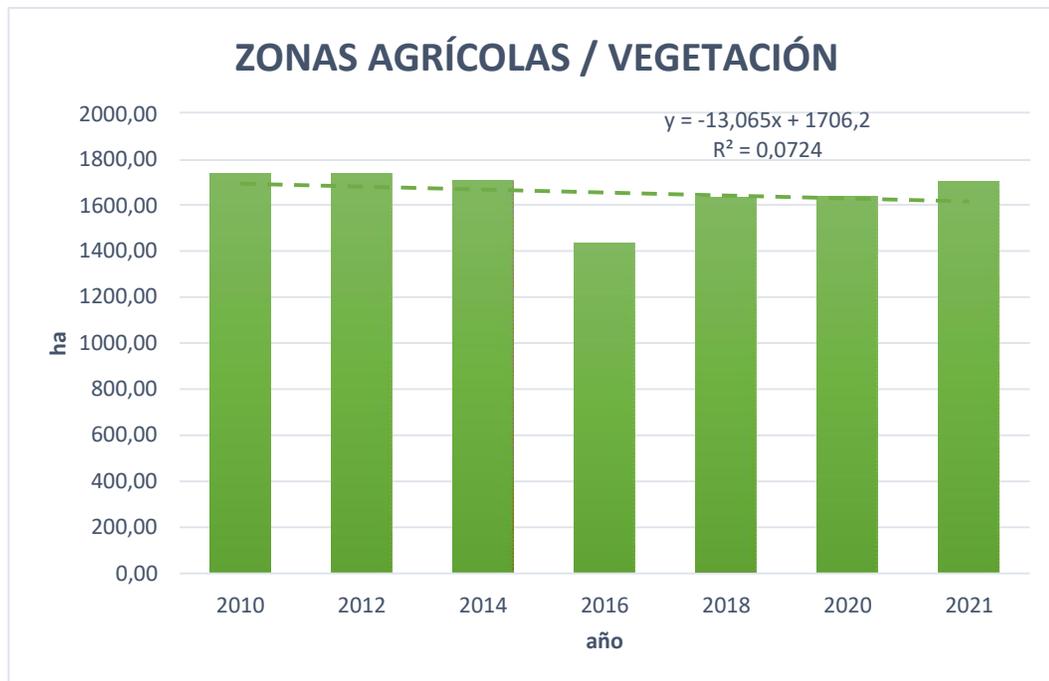


Figura 16 Gráfico de comparación de resultados de zonas agrícolas y vegetación

Fuente: Elaboración propia

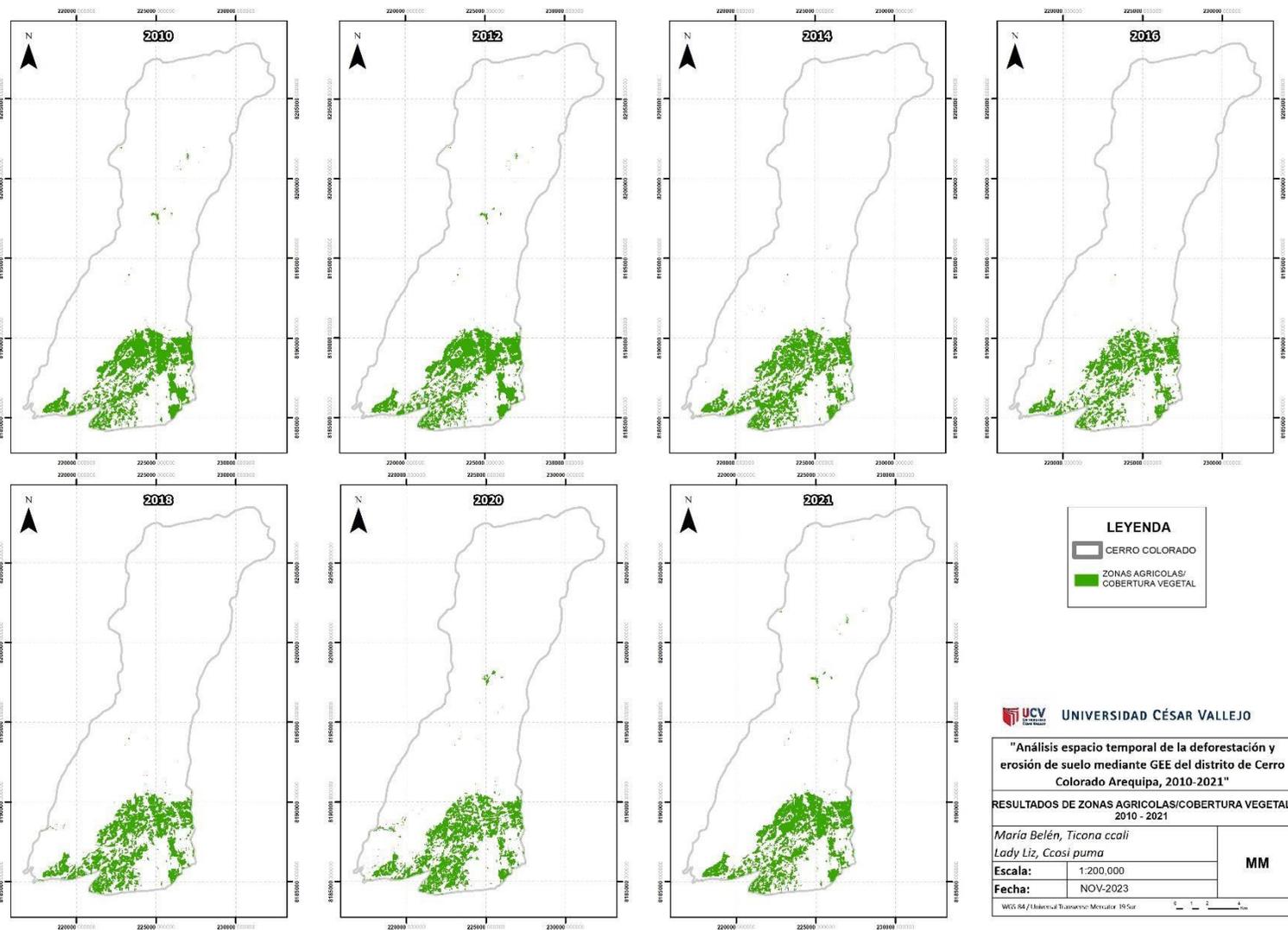


Figura 17 Mapa de evolución multitemporal de la categoría Zona Agrícola 2010 – 2021

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Zonas urbanas

Según el Atlas Ambiental de Arequipa del 2020, Arequipa tuvo un crecimiento de 17 veces más entre los periodos de 1944 al 2018, donde evidentemente la cantidad de habitantes creció exponencialmente, ese crecimiento en su mayoría está concentrada en el distrito de Cerro Colorado, ello evidentemente tendría una consecuencia directa en la ocupación del suelo en el distrito de Cerro Colorado.

Tabla 6 Resultados de Zonas urbanas 2010 – 2021

ZONAS URBANAS		
AÑO	Ha	%
2010	2855.35	16.5
2012	3051.86	17.7
2014	3184.28	18.4
2016	3518.77	20.4
2018	3986.92	23.1
2020	4307.40	24.9
2021	4841.15	28.0

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran efectivamente que existe un crecimiento bastante importante de las zonas urbanas en la zona de estudio (Cerro Colorado), se evidencio un crecimiento de más de la mitad en una década, en el año 2010 los resultados analizados evidenciaron 2855.35 hectáreas de área de ocupación urbana, esto representa un 16% del total de la extensión territorial del distrito de Cerro Colorado, para el año 2021 se obtuvo como resultado un área de 4841.15 hectáreas, representando un 28% de la extensión total del distrito de estudio (Cerro Colorado), este evidentemente representa un crecimiento aproximado de un 11.5 % en 11 años.

Las zonas urbanas crecieron en área de manera exponencial, dentro del periodo del 2010 y 2021 creció unas 1985.80 hectáreas, es decir que anualmente represento una tasa de crecimiento de 180 ha/año (hectáreas al años), se puede considerar que dicha tasa de crecimiento es alta, suponiendo

la desaparición de las zonas eriazas, con pendientes planas y no muy pronunciadas, así mismo las que están cercanas a los asentamiento humanos, bajo dicha tasa de crecimiento según el ajuste existe una tendencia de crecimiento exponencial en el tiempo, así mismo considerando el crecimiento del 10% de área por década, las zonas con suelos eriazos y una pendiente plana aun no ocupados, estarían ocupadas en poco más de una década bajo esas condiciones, por otro lado el crecimiento absolutamente descontrolado es un gran problema con la que actualmente convive en general Arequipa metropolitana y el distrito de Cerro Colorado y otros están siendo los más afectados.

Es evidente la relación de pérdida de área de suelo desnudo, así mismo de zonas agrícolas, con respecto la pérdida de suelo desnudo o eriazo es casi proporcional al crecimiento urbano, donde se evidencio, que, mientras la zona urbana crece en un 11.4%, los suelos se pierden un 11.2%, producto del crecimiento abrupto de las zonas urbanas, por otro lado, las zonas agrícolas se ven amenazadas en un porcentaje muy pequeño.

Tabla 7 Relación de áreas de suelo desnudo y zonas urbanas

DESCRIPCIÓN	AREA ha 2010	AREA ha 2012	AREA ha 2014	AREA ha 2016	AREA ha 2018	AREA ha 2020	AREA ha 2021
SUELO DESNUDO	12329.51	12135.39	12098.52	12182.17	11527.52	11188.71	10378.00
ZONAS URBANAS	2855.35	3051.86	3184.28	3518.77	3986.92	4307.40	4841.15

Fuente: Elaboración propia

Las imágenes satelitales adquiridas para los años 2010 y 2021, evidencian a través de los procesos de fotointerpretación y combinación de bandas satelitales (Sobrino J., 2000), la evidente expansión urbana al Sureste del distrito de Cerro Colorado, como anteriormente se menciona las zonas más predispuestas, son las que están cercanas a las expansiones urbanas y las de pendientes moderadas, bajo esta situación no interesa el estado del suelo, ni

tampoco las capacidades de las mismas en aspectos de ocupación urbana ilegal e informal.

La figura 18 evidencia una tendencia exponencial con un R^2 igual a 0.985, siendo este muy significativo, confirmando la expansión bajo consideraciones exponenciales.

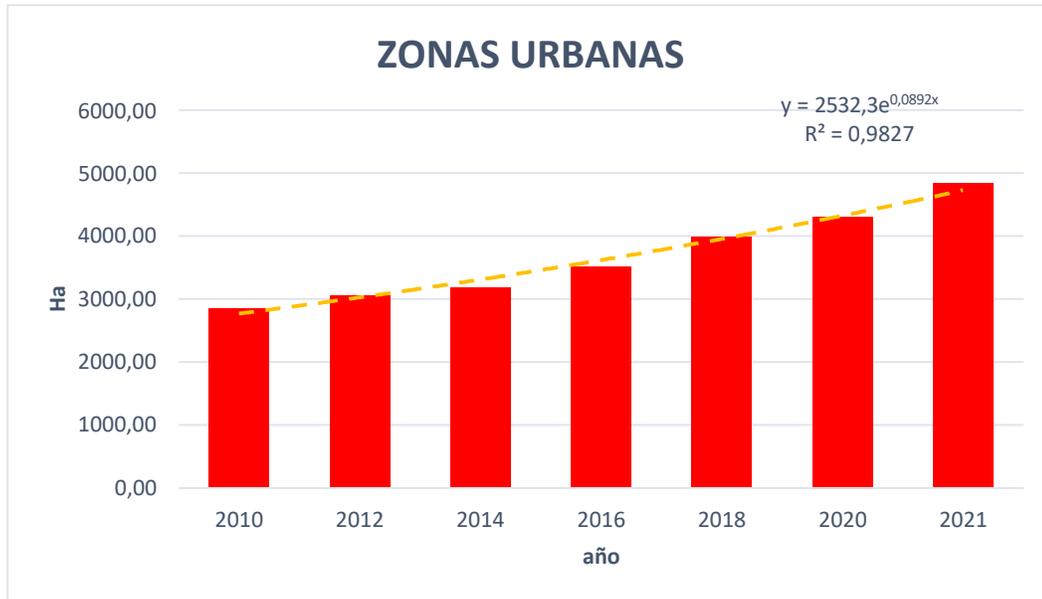


Figura 18 Gráfico de comparación de resultados del crecimiento de las zonas urbanas

Fuente: Elaboración propia

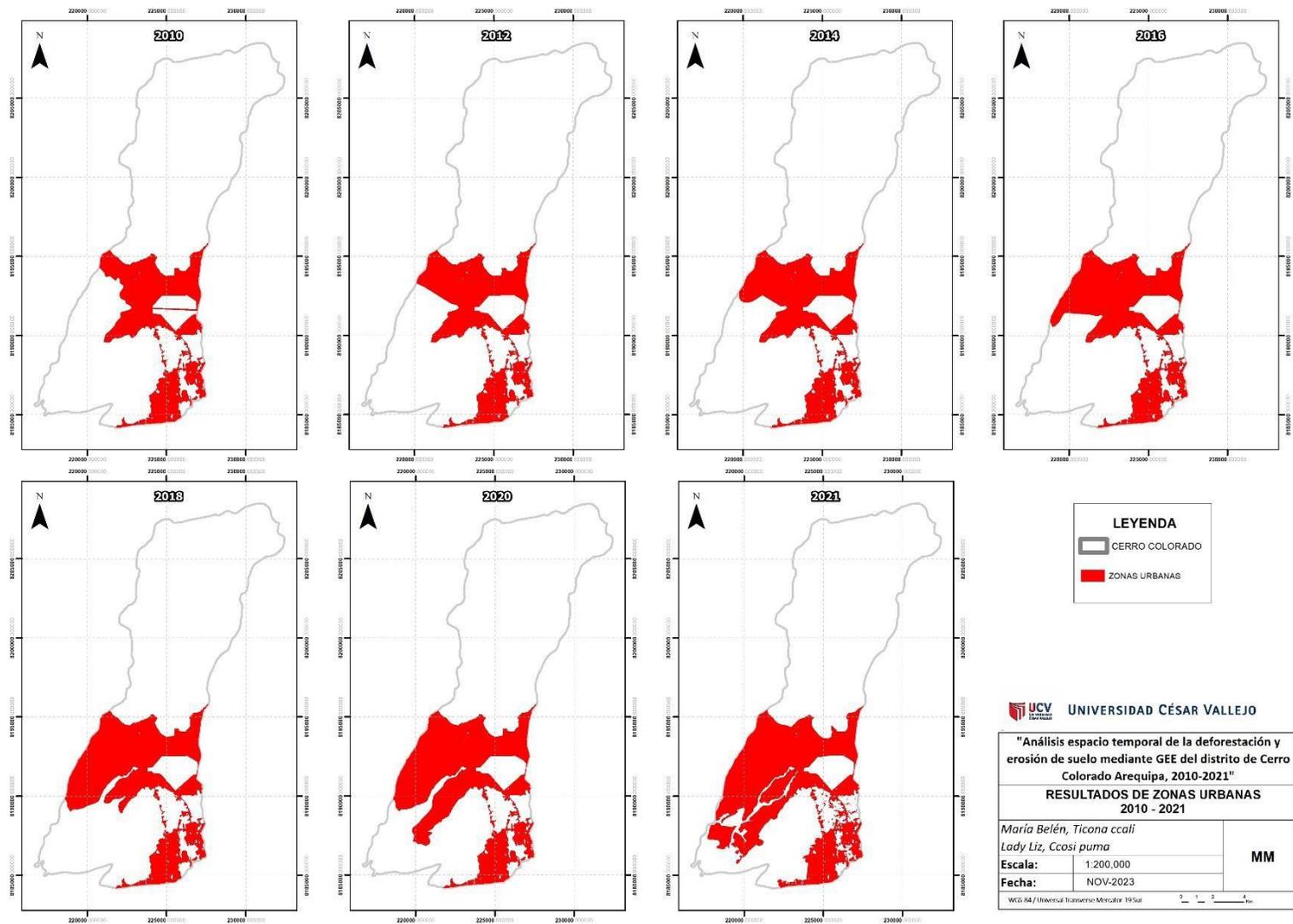


Figura 19 Mapa de evolución multitemporal de la categoría Zona Urbana 2010 – 2021

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Cobertura forestal

La cobertura forestal como resultado para esta presente investigación fue nula, no se evidenció cobertura de bosques a través de los procesos de teledetección aplicados en esta investigación, según el Atlas Ambiental 2020 y (ZEE, 2019) la mayor distribución de coberturas de boscosas nativas están en las faldas del volcán Pichu Pichu, es decir la mayoría de ellos están distribuidos en el distrito de Chiguata, al Noreste de la ciudad de Arequipa, por lo tanto las zonas boscosas no fueron evidenciadas en este proceso de análisis de teledetección espacial.

4.2.5. Cobertura de nieve

Los resultados de cobertura de nieve para esta presente investigación evidenciaron un área de 366.05 hectáreas para el año 2010 y un área de 365.85 para el año 2021, aunque estas áreas representan un 2.1% con respecto a todo el distrito de Cerro Colorado, suponen una gran importancia en los procesos de regulación hídrica a nivel de las microcuencas perteneciente a la cuenca Quilca, Vitor, Chili, su reducción en un periodo de 11 años es aparentemente mínima, con una área perdida de 0.21 hectáreas, es importante aclarar que el análisis, no fue estrictamente enfocado en los glaciares del volcán Chachani, así mismo no fue analizado en su totalidad, pero estos resultados son un claro indicio de un proceso de deglaciación, producto del cambio climático y los procesos antrópicos; estos ecosistemas son muy sensibles y frágiles a los cambios mínimos climáticos (Vuille, 2008), por otro lado la pérdida de estos ecosistemas son casi irrecuperables a lo largo del tiempo.

La tasa de decrecimiento es poco notable siendo un 0.21% por cada 11 años, esto sugiere claramente un análisis más profundo y especializado en los glaciares de la región de Arequipa en general.

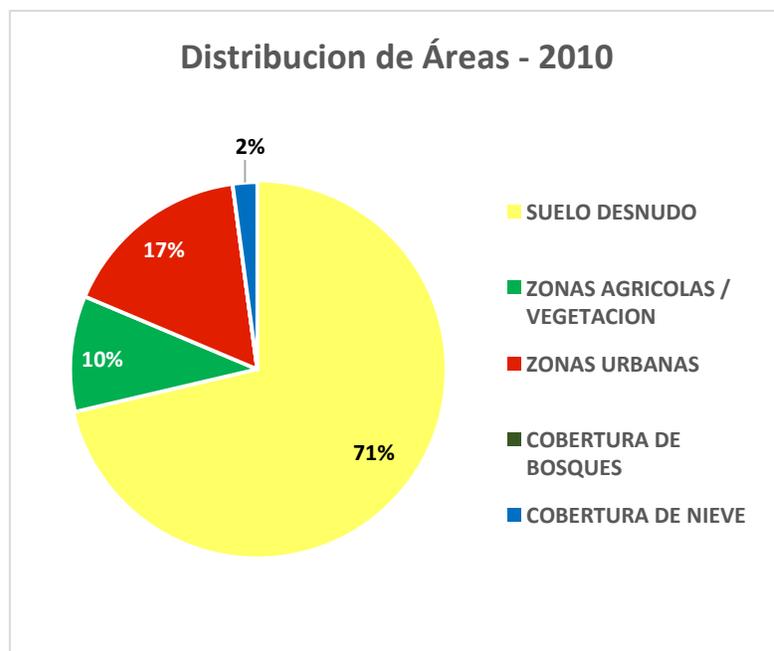


Figura 20 Gráfico de distribución de áreas en el año 2010

Fuente: Elaboración propia

El análisis espacio-temporal de la deforestación y la erosión del suelo en el distrito de Cerro Colorado es un paso inicial importante para comprender la dinámica de cambio de la cubierta terrestre en la región, los resultados destacan la necesidad de un enfoque integral que equilibre el desarrollo urbano con la conservación de la naturaleza y la agricultura sostenible.

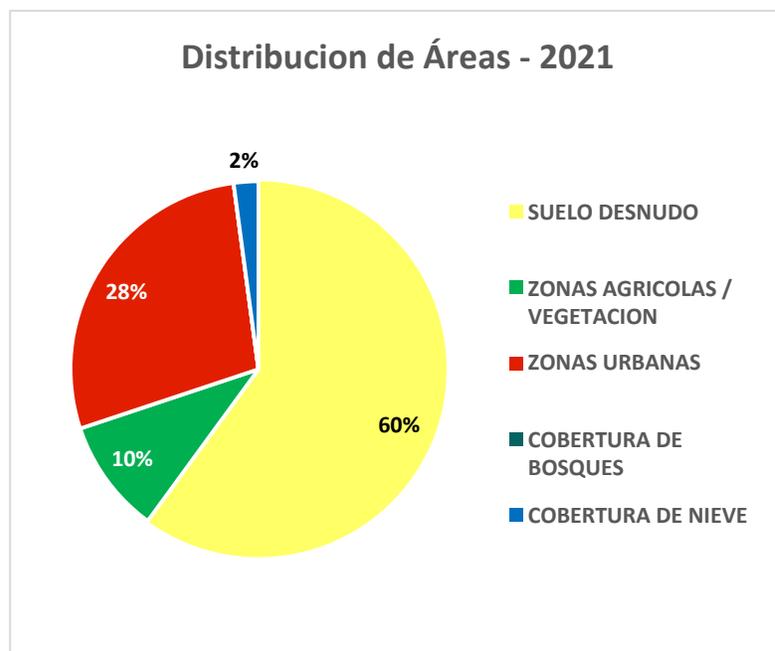


Figura 21 Gráfico de distribución de áreas en el año 2021

Fuente: Elaboración propia

La erosión fue en ascenso, evidenciada por la reducción de suelo desnudo y el aumento de zonas urbanas.

El análisis espacio-temporal de la deforestación y la erosión del suelo en el distrito de Cerro Colorado es un paso inicial importante para comprender la dinámica de cambio de la cubierta terrestre en la región, los resultados destacan la necesidad de un enfoque integral que equilibre el desarrollo urbano con la conservación de la naturaleza y la agricultura sostenible.

Se mostró una correlación entre la pérdida de suelo desnudo y el incremento de zonas urbanas, lo que sugiere una relación directa entre la deforestación y la erosión.

Hipótesis Contrastadas: La tesis examina la deforestación y erosión del suelo en Cerro Colorado, Arequipa, entre 2010 y 2021. Se utilizó Google Earth Engine para el análisis espacial y temporal.

Resultados Estadísticos: Se observó una reducción de suelo desnudo de 1951.50 ha y un incremento significativo de zonas urbanas en 1985.80 ha. Las

zonas agrícolas mostraron una disminución de 34 ha, mientras que la cobertura de nieve disminuyó en 0.21 ha debido al cambio climático.

Análisis de Datos: Se aplicaron técnicas de clasificación supervisada y se realizó un análisis multitemporal para evaluar los cambios en la cobertura del suelo.

Correlación Estadística: Se empleó la correlación de Pearson para evaluar la relación entre variables como la pérdida de cobertura glaciaria y factores climáticos, indicando una correlación negativa significativa entre el área glaciaria y el tiempo.

V. DISCUSIÓN

Los elementos de la superficie terrestre, tales como el suelo, vegetación, etc., están expuestos a cambios permanentes, la actividad humana continuamente impacta en estos elementos de manera positiva y mucho más de manera negativa, en la presente investigación se determinó efectivamente que los procesos de expansión urbana, impactan negativamente en los suelos, específicamente en los suelos desnudos o eriazos, etc.

Según la Zonificación Ecológica y Económica de Arequipa (Autoridad Regional Ambiental - ARMA 2019), desarrollado en el 2019, se establecieron 5 categorías de zonificación: conservación, protección, recuperación, producción y urbanización, bajo esta perspectiva, la promoción de la recuperación de las zonas degradadas, la protección y el tema de la urbanización, no está siendo ejecutada como tal, es importante definir los límites máximos de crecimiento urbano, tal como se plantea en las categorías de zonificación, las autoridades competentes deberán definir urgentemente y aplicar las medidas, debido a la extinción de los suelos desnudos por parte del crecimiento urbano, así mismo según (Oliva Cáceres 2023), las actividades humanas tienen la capacidad de afectar suelos y así mismo cultivos, en esta investigación se corrobora que la presencia de actividades humanas repercuten directamente en el entorno inmediato, en este caso existe una reducción (no significativa) de las zonas agrícolas, en la gran mayoría de casos, la necesidad de vivienda y los negocios inmobiliarios “obligan” el avance y el crecimiento de los espacios urbanos.

Según (Zeballos Velarde 2020), en el Atlas Ambiental de Arequipa, se plantea la existencia de riesgos que conlleva la ocupación urbana descontrolada, informal y hasta ilegal, debido a que gran parte de la región está expuesta a un alto potencial sísmico, por ello como se evidencio esta investigación el crecimiento desmedido de las zonas urbanas es agresivo, con una tasa del 10% cada 10 años, toda aquella población mal asentada y/o ubicada está expuesta al riesgo de sufrir un alto nivel de destrucción por consecuencia de los sismos, así mismo el

riesgo de pérdidas humanas es muy alto, por ello es importante tomar en cuenta los factores de riesgo y principalmente las autoridades tomen en cuenta e inicien acciones de prevención. Es importante tomar en cuenta que el distrito de Cerro Colorado se encuentra en una zona de riesgo, no solo sísmica, también está expuesta a otros riesgos y peligros naturales.

Según (Zeballos 2015), las áreas metropolitanas de recreación y sobre todo las áreas de mejora de la calidad ambiental, son muy escasas, existiendo una dotación de $3\text{m}^2/\text{hab}$. Así mismo el incremento de la desertificación por la reducción de las zonas de compensación ambiental y áreas verdes disminuidas, son una evidente confirmación del aumento población en los últimos años, esto recae y se confirma nuevamente lo descrito en cuanto a la pérdida de zonas eriazas y reducción de las zonas agrícolas en esta investigación, por otro lado el crecimiento descontrolado también se evidencia con la baja densidad urbana, es decir, existe un crecimiento especulativo y no planificado, donde la ciudad ocupa áreas innecesarias o simplemente destinadas a negocios inmobiliarios o de inversión. A todo esto, se puede agregar el centralismo existente dentro de Arequipa, esto necesariamente recae en el distrito de Cerro Colorado, donde se evidencia un centralismo, provocando la necesidad de asentarse urgentemente y ocupar un espacio de vivienda sea forma, informal e ilegal.

Según el Atlas Ambiental de Arequipa 2020, Arequipa alberga riqueza de flora y que esta afecta a los volcanes de la ciudad, a una mayor altitud y en la franja de serranía esteparia, existe un bosque nativo de queñuales siendo la agrupación más grande de la región, así mismo se precisa que está distribuido en las laderas del volcán Pichu Pichu, aunque la distribución de la franja de la serranía esteparia abarca al volcán Chachani, quien es ubicado dentro de la zona de estudio de esta investigación, no se descarta la existencia de especies de flora, vegetación y fauna con alto valor bioecológico, albergando hasta 320 especies.

Así mismo según (Sahagún-Sánchez et al. 2018), los cambios de usos de suelo producto de la ocupación urbana y por consiguiente la creciente expansión de los procesos antrópicos generan impactos muchas veces irreversibles y altamente negativo en los suelos, bajo dicha consideración, en esta investigación se evidencio la creciente e imparable extensión de urbana, donde en los últimos años tuvo un crecimiento muy significativo respecto a otros, por ello se confirmó que dicho crecimiento mantiene al suelo en un proceso irrecuperable, así mismo los impactos en los ecosistemas y la provisión de servicios eco sistémicos fueron negativamente impactados.

El crecimiento urbano trae efectos muy adversos en los procesos forestales, según (Yvette Sierra Praeli 2022), en un artículo de la revista ambiental independiente en Latinoamérica, se confirman que los procesos de crecimiento urbano en entornos de zonas de coberturas de bosques, estas tienden a ser deforestadas, por lo tanto, los suelos quedan expuestos y de tal manera ocupados, sin contar la pérdida de biodiversidad, si bien es cierto en esta investigación no se detectó zonas con coberturas de bosques con la técnica empleada, es importante destacar la existencia de bosques nativos de Queñuales en las faldas del volcán Pichu Pichu (Zeballos Velarde 2020), que evidentemente esta expuestos a los procesos de las actividades antrópicas así mismo a la ocupación urbana, por lo tanto recae en un proceso de deforestación y pérdida de biodiversidad nuevamente por actividades antrópicas, es importante destacar que según (Yvette Sierra Praeli 2022), en el 2020 el Perú alcanzó cifras de deforestación siendo una de las más altas en los últimos 20 años conllevando la erosión de suelos y pérdida importante de biodiversidad.

Según los resultados que se obtuvieron en esta presente investigación, refiere una dinámica de procesos de crecimiento interno, bajo un patrón de crecimiento por año desde una perspectiva geoespacial, así mismo en cuanto a expansión a nivel de área, según (Álvaro Espinoza, Ricardo Fort 2020), en el 2020, definieron y cuantificaron los patrones de la dinámica interna de crecimiento en el Perú, donde también se utilizaron análisis de imágenes satelitales como en esta investigación, para identificar la expansión urbana, por otro lado dichos datos se corroboraron y

compararon con los censos del 2017 (Censo Nacional de Población y Vivienda), así mismo se analizaron los mercados de suelos urbanos nuevos, por tanto es importante destacar que en esta investigación se pudo corroborar, que existe una dinámica de crecimiento urbano, donde evidentemente las necesidades de vivienda y el funcionamiento de los nuevos mercados de adquisición de suelos condicionan la ocupación (Grade, 2020).

Los fenómenos relacionados a la ocupación de suelos y la erosión de suelos, destacan aspectos como el tiempo y el espacio (Senamhi, 2014), en esta investigación se corroboró la inferencia de estos aspectos al momento de cuantificar el avance de las zonas urbanas, con una eminente erosión de por medio, en donde se puede destacar que existe una relación con el área determinada en los periodos 2010 y 2021 de suelo desnudo, con respecto a la ocupación de las zonas urbanas, las evidencias demostraron que a medida que las zonas urbanas avanzaban en un área determinado, el suelo desnudo perdía casi la misma área que las zonas urbanas ocupaban en un determinado periodo de tiempo, el contraste determinado más importante se evidenció entre el 2010 y 2021, es importante destacar que la existencia de factores como las zonas críticas y/o vulnerables establecieron un rol fundamental en los procesos de ocupación de suelo desnudo, así mismo la ocupación de zonas agrícolas, donde se redujo la campiña dentro del distrito de Cerro Colorado, por ello se corroboró según (Sabino Rojas, Felipe-Obando y Lavado-Casimiro 2017), que existen zonas críticas de ocupación urbana, donde los procesos de erosión de suelo son irrecuperables y muchos más intensos.

Las zonas en proceso de desertificación también se constituyen en un problema de debilitamiento y pérdida de ecosistemas propios de una zona determinada, así mismo estas zonas son más propensas a ser ocupadas, según la Universidad Abierta de Cataluña, las zonas áridas, semiáridas, los procesos de sobreexplotación agraria y sobre todo la falta de medidas de corrección gubernamental, derivan en un proceso grave de erosión y degradación de suelos, así mismo la pronta desertificación de estos ecosistemas (UOC, 2020), algunos síntomas descritos pudieron ser evidenciados en esta presente investigación, donde el abandono

gubernamental, la ocupación de zonas agrícolas, suelos desnudos son un problema latente.

VI. CONCLUSIONES

Se determinó que según el objetivo general planteado en la presente investigación, la deforestación en el distrito Cerro Colorado ha resultado en una evidente ausencia de la misma debido, a que, según la técnica geoespacial empleada en esta investigación, no fue posible la detección de coberturas de bosque, por lo tanto una afirmación de incremento o disminución estimada en hectáreas no fue calculable en el periodo estudiado, lo que más bien se reflejó es un cambio notable en la utilización del suelo debido al crecimiento demográfico y urbano, por lo tanto se determinó bajo los procesos de teledetección aplicados en esta investigación, la existencia nula de cobertura de bosques representativos, siendo negativo para ambos años de análisis (2010 y 2021).

Se determinó que la expansión urbana incremento en área de manera significativa, pero, según el objetivo específico 01, no es posible afirmar que el crecimiento urbano en la zona de estudio causó deforestación, debido a que, según la técnica empleada para esta investigación, no detectó coberturas de bosques, siendo el área de estas nula, por otro lado, el crecimiento urbano tuvo un crecimiento de más de 1985 Ha. en un periodo de 10 años, esto significa una tasa estadística de crecimiento de más del 10% cada década.

Se determinó que la erosión del suelo por el crecimiento demográfico mostró una tendencia de crecimiento dentro del periodo de tiempo analizado en esta investigación, por ello, se determinaron la cantidad de áreas de zonas urbanas para los años 2010 y 2021, siendo 2855.35 ha. en el año 2010 y 4841.15 en el año 2021, donde se evidenció un incremento de las áreas urbanas en más de 1985 ha. en 10 años, con una tasa de incremento muy agresivo del 11.5% cada 10 años, esto supone un aproximado de 180 ha. /año, así mismo se determinó que la tasa de incremento en porcentaje cada 10 años es ligeramente el mismo que la pérdida de suelo desnudo cada 10 años, con un porcentaje de pérdida de 11.3% cada 10 años. Así mismo existe una relación a nivel de pérdida de coberturas de suelo desnudo por erosión, donde se determinó la extensión

territorial en hectáreas de suelo desnudo presente en la zona de estudio (distrito de Cerro Colorado), con una extensión en el año 2010 de 12329.51 ha. y 10378.00 ha. en el año 2021, así mismo se identificó que existe una pérdida de 1951.50 ha. en los periodos que van desde el 2010 al 2021, suponiendo una tasa de reducción anual de 190 ha/año. Por lo tanto, se concluye que según los resultados estadísticos de reducción de suelo erosionado tienen una relación con el crecimiento de las zonas urbanas y las actividades de erosión.

Se evidencio que según el objetivo específico 3, no fue posible evidenciar puntualmente los procesos de deforestación con la erosión, debido a que no se pudo cuantificar la existencia coberturas de bosque con la técnica de teledetección empleada en esta investigación durante el periodo de tiempo establecido, más sin embargo, se cuantifico la perdida de coberturas de vegetación y/o zonas agrícolas, en donde se determinaron que, el área de las zonas agrícolas y de cobertura vegetal, para el año 2010 tuvieron una extensión de 1733.99 ha. y para el año 2021 se determinó 1699.90 ha., por lo tanto, se concluye que se evidencio una reducción de áreas agrícolas en más de 34 ha., así mismo se determinó una reducción a una tasa de un 0.2% aproximadamente cada 10 años, aunque es importante destacar los cambios a nivel agrícola debido a las prácticas agrícolas

Se cuantifico adicionalmente la existencia de áreas con cobertura de nieve procedentes del volcán Chachani, para el año 2010 se obtuvo una extensión territorial de 366.05 ha. y para el año 2021 se obtuvo 365.85 ha., bajo estos resultados se pudo determinar la existencia de una reducción de la cobertura glaciar del Chachani en un 0.21% cada 10 años, siendo este un ecosistema altamente frágil al cambio climático, así mismo resaltar que no se realizó un análisis de toda la cobertura.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de imágenes de alta resolución espacial o resolución centimétrica, para un procesamiento y análisis más detallado de las especies con agrupaciones muy poco densas, así mismo para la detección de áreas verdes dentro de las zonas urbanas, también es importante considerarlo para la aplicación en técnicas de teledetección de “bosque y no bosque” debido a que en esta investigación se consideró una resolución espacial de 30 m por cada banda de las imágenes Landsat procesadas, esto represento que la técnica empleada no permitió cuantificar las coberturas o áreas de forestación, por lo tanto la consiguiente no cuantificación de las áreas deforestadas durante el periodo 2010 y 2021, así mismo este representa un factor determinante en la cuantificación de esta y otras áreas durante el proceso de vectorización de los rasters resultantes.

Se recomienda la aplicación de técnicas de clasificación supervisada como Random Forest, para la detección específica de coberturas de bosque y no bosque, dentro de entornos urbanos, donde las capacidades de teledetección pudieran ser complicadas, debido a que según los procesos empleados en esta investigación tuvieron dificultades para determinar la deforestación y su relación con el crecimiento urbano dentro de la zona de estudio en el periodo 2010 – 2021

Así también, se recomienda el uso de técnicas de pansharpening para imágenes satelitales con bandas pancromáticas, para incrementar la resolución espacial de las bandas del espectro visible y el infrarrojo, para mejorar la precisión y los detalles de los elementos de cobertura vegetal, específicamente la erosión y el crecimiento de las zonas urbanas, esto debido a que esta investigación no se determinó este proceso de pansharpening, debido a la continuidad direccional de las resoluciones que es preciso mantener, por lo tanto es posible aplicar la técnica de pansharpening con la banda pancromática de Landsat 8 y asimismo considerar las imágenes satelitales landsat 9 dentro de las posibilidades de cuantificación del crecimiento urbano y la erosión.

Se recomienda realizar un análisis específico de coberturas de bosque dentro de la franja de la serranía esteparia, correspondiente al volcán Chachani y su relación con la riqueza de flora y vegetación endémica, los estudios de corredores ecológicos incrementaron el valor y así mismo el nivel de detalle e información que se maneje desde una perspectiva de caracterización geoespacial de estas, donde exista inclusive monitoreos a través de transectos y/o cuadrantes de flora y vegetación.

Se recomienda el uso de técnicas de índices espectrales en GEE, para identificar coberturas vegetales, procesos de deforestación y erosión específicas, dentro de periodos según factores geográficos de la zona, es importante considerar técnicas que pueden discretizar con un nivel de detalle mayor aquellas coberturas forestales o aquellas en procesos de erosión que puedan producir alguna variación a nivel de reflectancias, así mismo este pueda producir errores debido a la similitud de una cobertura vegetal con otras que no necesariamente sea vegetación, por lo tanto la desmezcla espectral también es recomendable, ya que existe la posibilidad de trabajar con información tales como hyperion u otras.

Se recomienda un análisis detallado de la cobertura glaciar del volcán Chachani a través de técnicas específicas e índices espectrales, así mismo su aplicación en Google Earth Engine, con los conceptos de variación multitemporal.

REFERENCIAS

ÁLVARO ESPINOZA, RICARDO FORT, 2020. Mapeo y tipología de la expansión urbana en el Perú. [en línea]. [consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.grade.org.pe/publicaciones/mapeo-y-tipologia-de-la-expansion-urbana-en-el-peru/>.

AUTORIDAD REGIONAL AMBIENTAL - ARMA, 2019. *Zoonificacion Ecologica y economica de Arequipa* [en línea]. Arequipa: GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA. Disponible en: <https://arma.regionarequipa.gob.pe/pagina.php?id=26>.

BAIGORRIA, G.A. y ROMERO, C.C., 2007. Assessment of erosion hotspots in a watershed: Integrating the WEPP model and GIS in a case study in the Peruvian Andes. *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, no. 8, ISSN 13648152. DOI <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.012>.

BATCHELOR, D., 2019. Islamic Perspectives on Curbing Population Growth to Promote Earth's Sustainability. *ICR Journal*, vol. 10, DOI <https://doi.org/10.52282/icr.v10i1.70>.

CACHAY REYNAGA, R., 2023. Cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca del Río Jucusbamba, Amazonas (Perú), 1992-2052. En: Accepted: 2023-03-08T20:34:21Z [en línea], [consulta: 15 septiembre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/3100>.

CAGLE, J.A.B. y BAUCUS, M.S., 2006. Case Studies of Ethics Scandals: Effects on Ethical Perceptions of Finance Students. *Journal of Business Ethics*, vol. 64, no. 3, ISSN 0167-4544, 1573-0697. DOI 10.1007/s10551-005-8503-5.

CALISAYA CALISAYA, W.M., 2023. Análisis de la proliferación de la lenteja de agua (Lemna Gibba) en la bahía interior de Puno utilizando imágenes satelitales

2013 - 2020. En: Accepted: 2023-02- 09T13:13:53Z, *Universidad Privada San Carlos* [en línea], [consulta: 14 septiembre 2023].

Disponible en: <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/461>.

CALSIN, W.H., OCHOA, E.N.L., HUILLCAS, F.A. y SILVA, F.E., [sin fecha]. Análisis multitemporal del glaciar del Ampay por medio de la plataforma de Google Earth Engine, periodo 2000-2019. ,

CAÑETE, R., VILLALBA, N., AGUILERA, Y., FERREIRA, Á., IBARRA, M., DÍAZ, M.R. y CHUNG, C.K.K., 2023.

El impacto de la deforestación y la necesidad del análisis ambiental. *Revista Científica OMNES*, vol. 5, no. 1, ISSN 2523-2908.

CASTRO CAMACHO, J.J., 2022. *Uso del modelo Random Forest mediante Google Earth Engine para determinar el cambio de area de los ecosistemas y su relacion con el cambio climatico en la cuenca Sibinacocha 1984-2020*. [en línea]. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12918/7024>.

CASTRO MALDONADO, J.J., GÓMEZ MACHO, L.K. y CAMARGO CASALLAS, E., 2023. La investigación

aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, vol. 27, no. 75, ISSN 2248-7638, 0123-921X. DOI 10.14483/22487638.19171.

CHENG, J., MENG, X., DONG, S. y LIANG, S., 2021. Generating the 30-m land surface temperature product over continental China and USA from landsat 5/7/8 data. *Science of Remote Sensing*, vol. 4, ISSN 2666-0172. DOI <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100032>.

DELGADO CÁRDENAS, A., 2020. Impacto ambiental por extracción en la formación vegetal tolar en el distrito de Tisco, provincia de Caylloma, Arequipa,. En: Accepted: 2020-12-22T19:12:53Z, *Universidad Católica de Santa María* [en

[línea], [consulta: 14 septiembre 2023]. Disponible en:
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/10435>.

DELPINO MARIMÓN, P., HUMPHREYS BEBBINGTON, D., BEBBINGTON, A.J., SAULS, L.A., CUBA, N., CHICCHON, A., HECHT, S., ROGAN, J., RAY, R., DIAZ, O., KANDEL, S., OSBORNE, T., RIVERA, M. y ZALLES, V., 2021. 'Tradescares' in the forest: framing infrastructure's relation to territory, commodities, and flows. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 53, ISSN 18773435. DOI 10.1016/j.cosust.2021.10.004.

ERASO TERÁN, O.H., BADIA I PERPINYÀ, A. y GISBERT I TRAVERIA, M., 2022. Google earth engine aplicado al monitoreo de superficies quemadas y cambios de coberturas y usos del suelo. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, no. 29, ISSN 1578-5157. DOI <https://dx.doi.org/10.21138/GF.764>.

FAO Y PNUMA, 2020. *El estado de los bosques del mundo 2020: Los bosques, la biodiversidad y las personas*. [en línea]. Rome, Italy: FAO y PNUMA. [consulta: 24 septiembre 2023]. 2020, ISBN 978-92-5-132421-9. Disponible en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca8642es>.

FRANCOU, B. y POUYAUD, B., 2007. Retroceso glaciar y cambio climático en los Andes Centrales. [en línea], ISSN 978-9972-787-28-7. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/280634722_Retroceso_glaciar_y_cambio_climatico_en_los_Andes_Centrales_Glacier_retreat_and_climate_change_in_the_Central_Andes.

FUENTES, M., 2019. Instrumentos de evaluación para verificar originalidad de investigación en tesis.

Revista Innova Educación, vol. 1, no. 3, ISSN 2664-1488. DOI 10.35622/j.rie.2019.03.012.

GARCÍA DLHIGO, J., 2016. *Metodología de la investigación para administradores*. Bogotá: Ediciones de la U. ISBN 978-958-762-527-1.

GATARIĆ, D., ĐERČAN, B., ŽIVKOVIĆ, M.B., OSTOJIĆ, M., MANOJLOVIĆ, S., SIBINOVIĆ, M., LUKIĆ, T.,

JEFTIĆ, M., LUTOVAC, Miloš y LUTOVAC, Milena, 2022. Can Depopulation Stop Deforestation? The Impact of Demographic Movement on Forest Cover Changes in the Settlements of the South Banat District (Serbia). *Frontiers in Environmental Science* [en línea], vol. 10, [consulta: 20 abril 2024]. ISSN 2296-665X. DOI <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.897201>. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.897201>.

Google Earth Engine. [en línea], 2023. [consulta: 23 abril 2024]. Disponible en: https://www.google.com/intl/es_in/earth/education/tools/google-earth-engine/.

GRINAND, C., RAKOTOMALALA, F., GOND, V., VAUDRY, R., BERNOUX, M. y VIEILLEDENT, G., 2013.

Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. *Remote Sensing of Environment*, vol. 139, ISSN 0034-4257. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.008>.

HERNANDEZ SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ COLLADO, C. y BAPTISTA LUCIO, M. del P., 2014. *Metodología de la investigación - Sexta Edición*. México D.F.: Mc Graw Hill Education. ISBN 978-1-4562- 2396-0.

HUACANI, W.C., MEZA, N.P.P., LUQUE, E.N.O., AGUIRRE, F.H. y ESCOBEDO, F.S., 2021. Análisis multitemporal del glaciar del Ampay por medio de la plataforma de Google Earth Engine, periodo 2000-2019. , vol. 18, no. 1, ISSN 1690-8627.

HUSSAIN, RAHMAN, F., ULLAH, I., AHMAD, Z. y SCHICKHOFF, U., 2022. Assessing the Impacts of Population Growth and Roads on Forest Cover: A Temporal Approach to Reconstruct the Deforestation Process in District Kurram, Pakistan, since 1972. *Land*, vol. 11, DOI <https://doi.org/10.3390/land11060810>.

JANAMPA TORRES, S. y PONCE CRISTOBAL, J.J., 2022. *Análisis multitemporal de la deforestación por imágenes satelitales en el distrito de Pangoa, Junín desde el año 2000 al 2020*. [en línea]. Huancayo: Universidad Continental. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12239>

KOUASSI, C.J.A., QIAN, C., KHAN, D., ACHILLE, L.S., KEBIN, Z., OMIFOLAJI, J.K. y YANG, X., 2023. Google Earth Engine for Landsat image processing and assessing LULC classification in southwestern Côte D'ivoire. *Geodesy and Cartography*, vol. 49, no. 1, ISSN 2029-7009. DOI <https://doi.org/10.3846/gac.2023.16805>.

LA BARREDA NOA, S.D., 2021. Deforestación en la región amazónica del Perú: situación y perspectivas. *M+A, revista electrónica de medioambiente*, vol. 21, no. 2, ISSN 1886-3329.

LOGROÑO-NARANJO, S.I., LÓPEZ-PAREDES, C.R., MOYANO-JÁCOME, M.G. y OYAGUE-BAJAÑA, E.S., 2020. El alcance de la teledetección satelital utilizando modelos estadísticos y

físicos y sus beneficios en áreas contables. *Domino de las Ciencias*, vol. 6, no. 2, ISSN 2477-8818. DOI 10.23857/dc.v6i2.1142.

LUQUE RAMOS, L., 2021. Análisis de la deforestación de la Amazonia peruana: Madre de Dios. *Revista Innova Educación*, vol. 3, no. 3, ISSN 2664-1488. DOI <https://doi.org/10.35622/j.rie.2021.03.013.es>.

MA, S., HE, B., GE, X. y LUO, X., 2023. Spatial prediction of soil salinity based on the Google Earth Engine platform with multitemporal synthetic remote sensing images. *Ecological Informatics*, vol. 75, ISSN 15749541. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102111>.

MAILLARD, O., VIDES-ALMONACID, R., SALAZAR, Á. y LARREA-ALCAZAR, D.M., 2023. Effect of Deforestation on Land Surface Temperature in the Chiquitania Region, Bolivia. *Land*, vol. 12, no. 1, ISSN 2073-445X. DOI <https://doi.org/10.3390/land12010002>.

MARTÍNEZ CURBELO, G., CORTÉS CORTÉS, M.E. y PÉREZ FERNÁNDEZ, A. del C., 2016. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CORRELACIÓN Y CONCORDANCIA EN EQUIPOS DE MEDICIONES SIMILARES. *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 8, no. 4, ISSN 2218-3620.

MELO, M.V.N. de, OLIVEIRA, M.E.G. de, ALMEIDA, G.L.P. de, GOMES, N.F., MONTALVO MORALES, K.R., SANTANA, T.C., SILVA, P.C., MORAES, A.S., PANDORFI, H. y SILVA, M.V. da, 2022. Spatiotemporal characterization of land cover and degradation in the agreste region of Pernambuco, Brazil, using cloud geoprocessing on Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 26, ISSN 2352-9385. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100756>.

MENDOZA SIFUENTES, A., 2023. *Análisis temporal de Áreas Agrícolas y*

Urbanas mediante Google Earth Engine (GEE) e IDRISI en las Comunidades Campesinas del Maino y Levanto, Chachapoyas. [en línea]. S.I.: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. [consulta: 24 septiembre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/3286>.

METZLER, A.B., NATHVANI, R., SHARMANSKA, V., BAI, W., MULLER, E., MOULDS, S., AGYEI-ASABERE, C., ADJEI-BOADI, D., KYERE-GYEABOUR, E., TETTEH, J.D., OWUSU, G., AGYEI-MENSAH, S., BAUMGARTNER, J., ROBINSON, B.E., ARKU, R.E. y EZZATI, M., 2023. Phenotyping urban built and natural environments with high-resolution satellite images and unsupervised deep learning. *Science of The Total Environment*, vol. 893, ISSN 0048-9697. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164794>.

OLIVA CÁCERES, D.Y., 2023. Análisis de la deforestación por actividades agrícolas mediante el uso de imágenes satelitales en el distrito de San Juan Cajamarca. En: Accepted: 2023-05-04T19:30:06Z, *Repositorio Institucional - UCV* [en línea], [consulta: 11 noviembre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/113096>.

PERILLA, G.A., MAS, J.-F., PERILLA, G.A. y MAS, J.-F., 2020. Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones geográficas* [en línea], no. 101, [consulta: 10 septiembre 2023]. ISSN 0188-4611. DOI 10.14350/rig.59929. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-46112020000100111&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

PREM, M., SAAVEDRA, S. y VARGAS, J.F., 2020. End-of-conflict deforestation: Evidence from Colombia's peace agreement. *World Development*, vol. 129, ISSN 0305-750X. DOI

<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104852>.

QUISPE FLORES, E.L., 2023. Análisis espacial de cuerpos de agua generados por la deforestación en la zona la Pampa para el año 2022, Madre de Dios. En: Accepted: 2023-08-24T13:25:56Z, *Universidad Nacional Agraria de la Selva* [en línea], [consulta: 24 septiembre 2023].
Disponibile en: <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/2502>.

ROSALES CEVALLOS MARCO MAURICIO, 2021. La ética en la investigación científica universitaria y su inclusión en la práctica docente. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 5, no. 6, ISSN 2707-2215. DOI https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1454.

RUMPEL, C., 2022. Interactions between soils and climate change. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* [en línea]. S.I.: Elsevier, [consulta: 23 julio 2023]. ISBN 978-0-12- 409548-9. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128229743000355>.

SABINO ROJAS, E., FELIPE-OBANDO, O. y LAVADO-CASIMIRO, W., 2017. Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú. Nota Técnica N° 002 SENAMHI-DHI-2017. En: Accepted: 2020- 02-21T17:41:16Z, *Repositorio Institucional - SENAMHI* [en línea], [consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/261>.

SAHAGÚN-SÁNCHEZ, F.J., REYES-HERNÁNDEZ, H., SAHAGÚN-SÁNCHEZ, F.J. y REYES-HERNÁNDEZ, H.,
2018. Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *CienciaUAT*, vol. 12, no. 2, ISSN 2007-7858.

SHANG, R., ZHU, Z., ZHANG, J., QIU, S., YANG, Z., LI, T. y YANG, X., 2022. Near-real-time monitoring of
land disturbance with harmonized Landsats 7–8 and Sentinel-2 data.

Remote Sensing of Environment, vol. 278, ISSN 0034-4257. DOI <https://doi.org/10.13140/2.1.2883.328310.1016/j.rse.2022.113073>.

TAMARA OTZEN y CARLOS MANTEROLA, 2017. Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. [en línea], vol. 35, no. 1, [consulta: 1 octubre 2023]. ISSN <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-95022017000100037&script=sci_arttext&tIng=pt.

TJIA, D. y COETZEE, S., 2022. Geospatial information needs for informal settlement upgrading – A review. *Habitat International*, vol. 122, ISSN 0197-3975. DOI <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102531>.

VEGA, J.J.P., ZÁRATE-GÓMEZ, R., VELA, R.J.M., BRAÑAS, M.M. y RIOS, J.E.B., 2019. Predicción de la pérdida de la cobertura vegetal por aumento de áreas urbanas en Iquitos, Perú. *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, vol. 7, no. 1, ISSN 2222-7431. DOI <https://doi.org/10.22386/ca.v7i1.263>.

WALEED, M., SAJJAD, M., SHAZIL, M.S., TARIQ, M. y ALAM, Md.T., 2023. Machine learning-based spatial-temporal assessment and change transition analysis of wetlands: An application of Google Earth Engine in Sylhet, Bangladesh (1985–2022). *Ecological Informatics*, vol. 75, ISSN 1574-9541. DOI [10.1016/j.ecoinf.2023.102075](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102075).

YVETTE SIERRA PRAELI, 2022. Los desafíos ambientales para el Perú en 2022: reducir la deforestación de la Amazonía, proteger a los defensores ambientales y mirar el mar y los ríos. *Noticias ambientales* [en línea]. [consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2022/01/desafios-ambientales-para-el-peru-en-2022/>.

ZEBALLOS, C., 2015. *Estrategias de planeamiento para incrementar la resiliencia urbana. El plan de desarrollo metropolitano de Arequipa* [en línea]. S.I.: XIII CONGRESO MUNDIAL DE LAS CIUDADES DEL PATRIMONIO MUNDIAL. Disponible en:
<https://www.researchgate.net/publication/303114637>.

ZEBALLOS VELARDE, C., 2020. Atlas Ambiental de Arequipa. *Atlas Ambiental de Arequipa*,

ZHANG, Y., HE, X., LIAN, G., BAI, Y., YANG, Y., GONG, F., WANG, D., ZHANG, Z., LI, T. y JIN, X., 2023.

Monitoring and spatial traceability of river water quality using Sentinel-2 satellite images. *Science of The Total Environment*, vol. 894, ISSN 0048-9697. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164862>.

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de Operacionalización de Variables

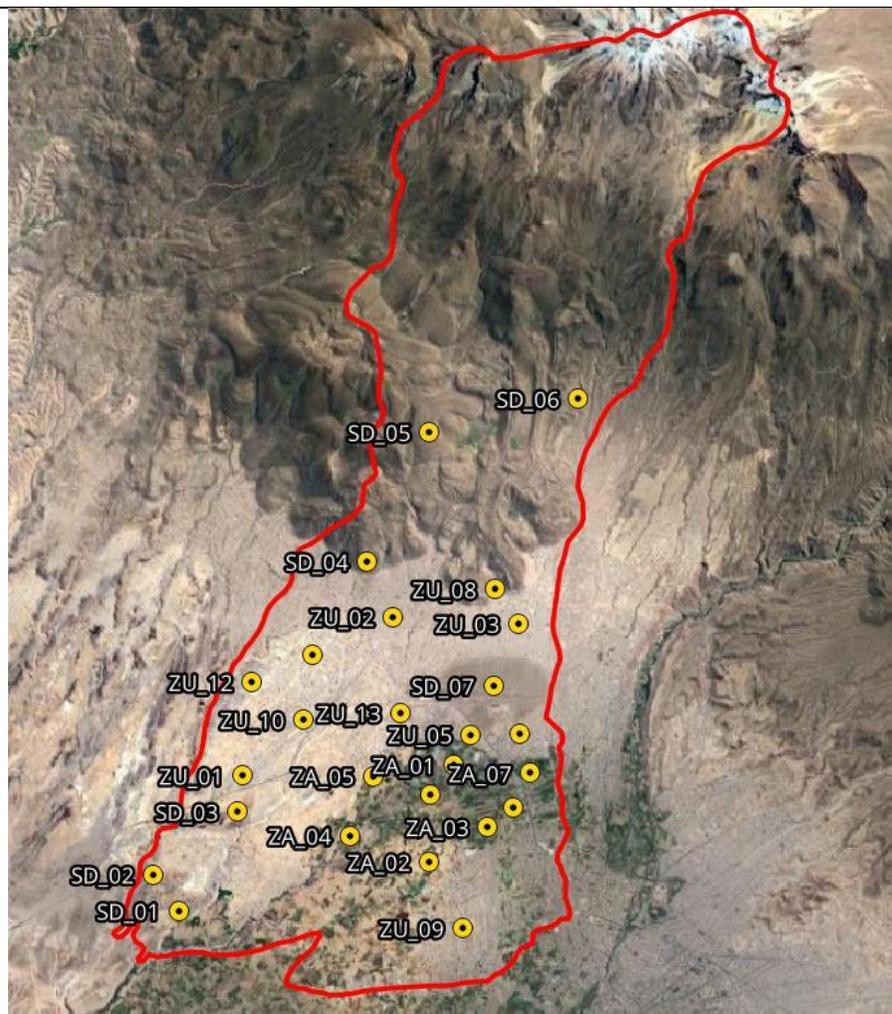
VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Independiente: Deforestación y erosión de suelo	La deforestación es un proceso provocado por el ser humano donde las áreas forestales son destruidas y agotadas con la finalidad que el suelo sea favorable para nuevas actividades.(Prem, Saavedra y Vargas 2020) La erosión del suelo es un fenómeno natural controlado por factores biofísicos e influenciado por el uso del suelo y de forma especial por la cobertura vegetal y actividades agrícolas.Rumpel (2022)	Para cuantificar aquellos impactos provocados a través del tiempo por la deforestación y erosión del suelo se realizarán por medio de imágenes satelitales obtenidas de Google Earth Engine (GEE).	Actividad antropogénica	Agricultura	ha
				Crecimiento demográfico	ha

<p>Dependiente: Análisis espacio temporal mediante Google Earth Engine (GEE)</p>	<p>Es una herramienta de programación considerada como una plataforma tecnológica, la cual brinda al usuario una colección de datos espaciales además de imágenes satelitales los mismos que permiten efectuar monitoreos sobre modificaciones ocurridos en el suelo.(Castro Camacho 2022)</p>	<p>Las imágenes satelitales descargadas de la plataforma GEE, serán procesadas en QGIS a través de la combinación de bandas espectrales con la finalidad de determinar las modificaciones ocurridas en el área de estudio.</p>	<p>Landsat 7 Sentinel 2</p>	<p>Bandas espectrales</p>	<p>Resolución especial (m)</p>
---	--	--	---------------------------------	---------------------------	--------------------------------

Fuente: Elaboración propia

Anexo 02: Levantamiento de puntos in situ

Puntos de muestra en el distrito de Cerro Colorado para la clasificación supervisada en QGIS



ZU_05 162059S - 573423W



ZA_01 162123S – 713437W



ZU_06 162058S – 613344W



ZA_07 162130S – 713336W



ZA_ 162213S – 713410W



ZU_07 162185S – 713349W



ZU_09 162324S – 713430W



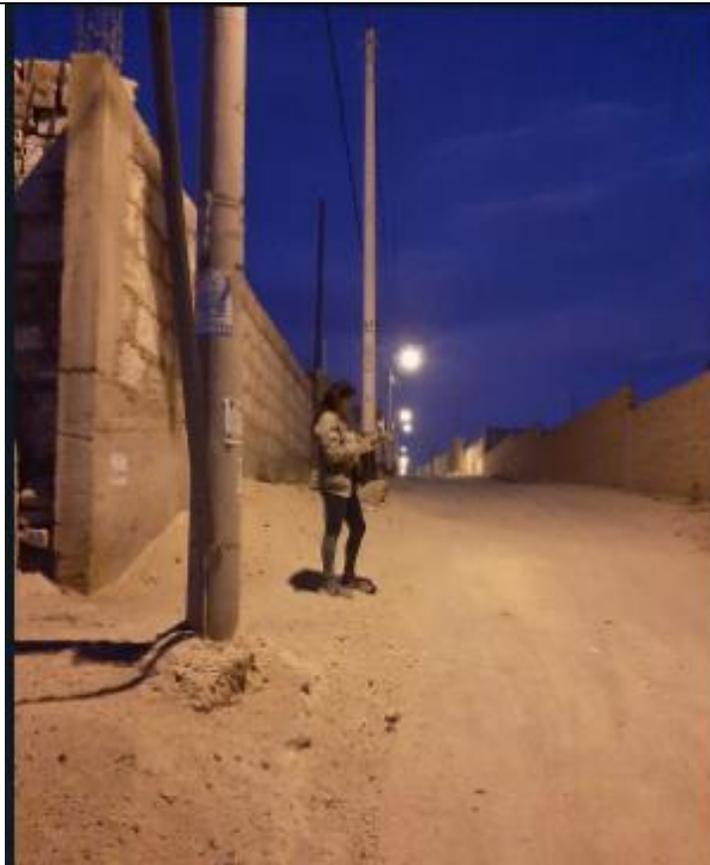
ZA_02 162241S – 713430W



ZA_04 162220S – 713600W



ZU_13 162185S – 713349W



ZU_05 16°20'59"S 71°34'23"W



ZU_06 16°20'58"S 71°33'44"W



Anexo 03: Instrumentos de recolección de Datos

Zona de estudio: _____

Elaborado por: _____

Fecha: _____

Responsable: _____

Anexo 01: Ficha de campo

TITULO: Análisis espacio temporal de la deforestación y erosión de suelo mediante GEE del distrito de Cerro Colorado Arequipa, 2010-2021				
PUNTOS DE MUESTRA PARA LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA				
ID	PUNTO DE MUESTRA	ESTE	NORTE	DESCRIPCIÓN

--	--	--

Anexo 04: Instrumentos de recolección de Datos

Zona de estudio: _____

Elaborado por: _____

Fecha: _____

Responsable: _____

Anexo 02: Ficha de recolección de datos

TITULO: Análisis espacio temporal de la deforestación y erosión de suelo mediante GEE del distrito de Cerro Colorado Arequipa, 2010-2021										
ID	CATEGORÍA	OBSERVACIÓN	LATITUD	LONGITUD	COD-GPS	PRECISIÓN	ZONAS URBANAS		SUELO	
							CONSOLIDADO	NO CONSOLIDADO	OCUPADO	DESOCUPADO

--	--	--

Anexo 05: Correlación de Pearson

CORRELACIÓN DE PEARSON

	n	zu	sd	VAR00007	ZONAS_URB	C_BOSQU	VAR00010	VAR00011	VAR									
1	2010	2855.35	12329.51		285535.00		.00											
2	2021	4841.15	10378.00		484115.00		.00											
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		

LISTADO DE DATOS EN SPSS

Correlaciones bivariadas

Variables:

- zU
- sd
- VAR00007
- VAR00010
- VAR00011

ZONAS_URB

C_BOSQUES

Coeficientes de correlación

Pearson Tau-b de Kendall Spearman

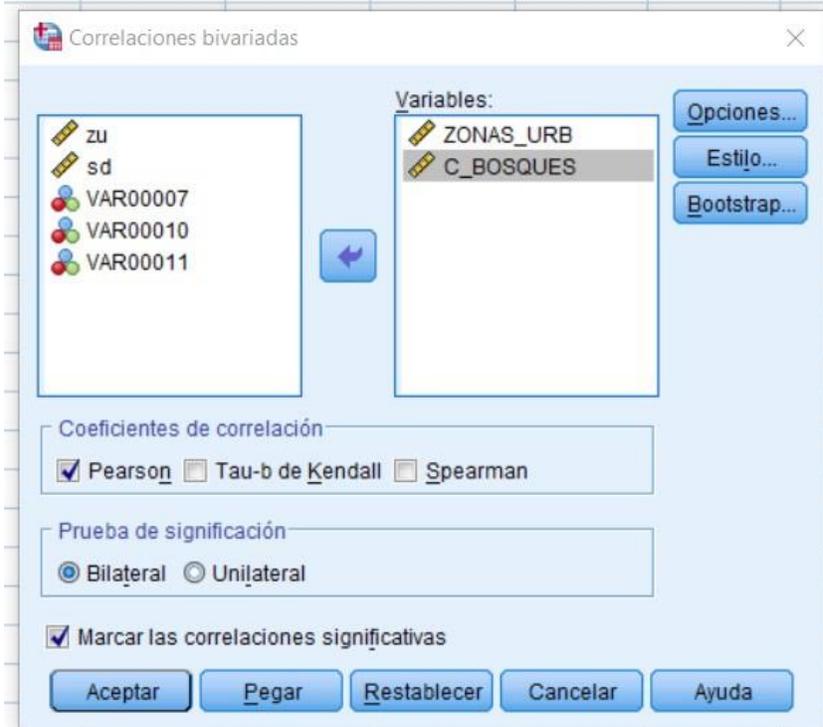
Prueba de significación

Bilateral Unilateral

Marcar las correlaciones significativas

Aceptar Pegar Restablecer Cancelar Ayuda

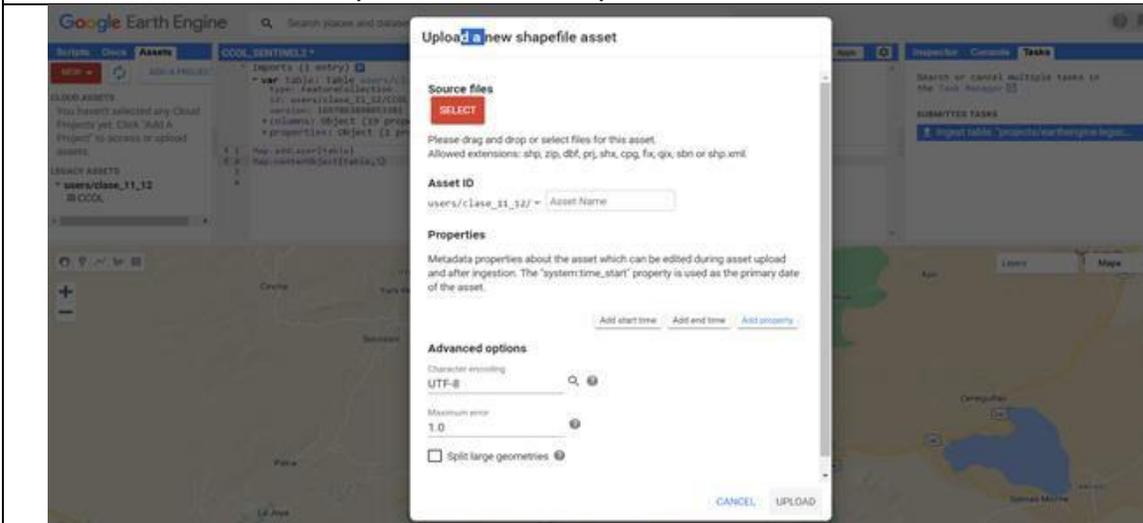
APLICACIÓN DE PRUEBA PEARSON



RESULTADOS DE LA PRUEBA APLICADA EN SPSS

Anexo 06: Definición de variables de programación en Google Earth Engine

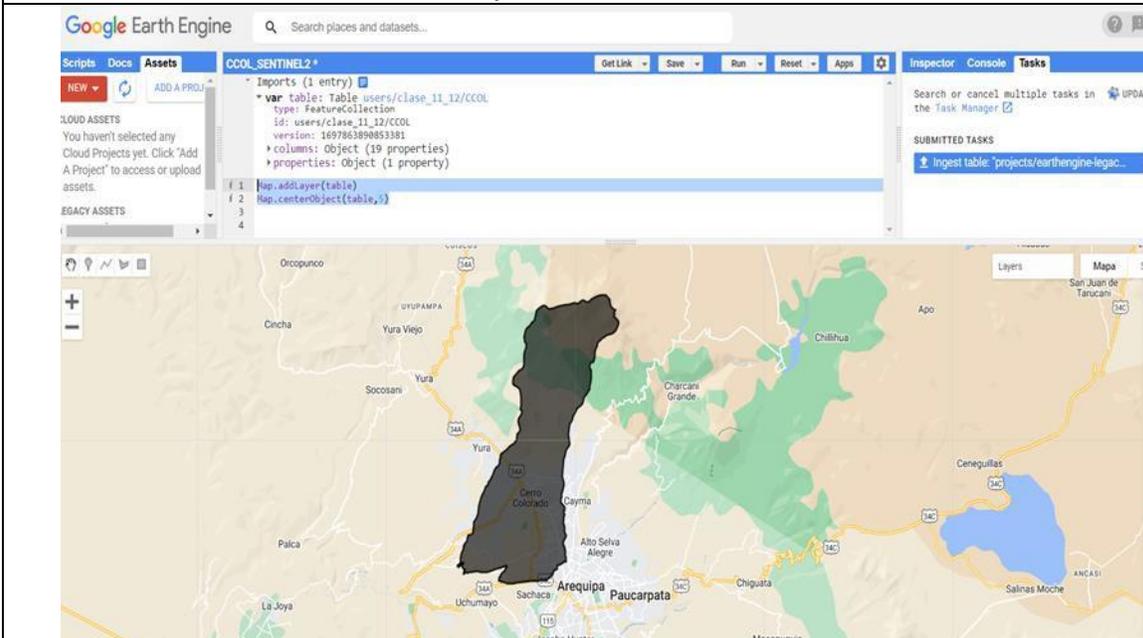
Proceso de importación del shapefile de cerro colorado en GEE.



Variable del shapefile de cerro colorado en GEE.



Variable del shapefile de cerro colorado en GEE

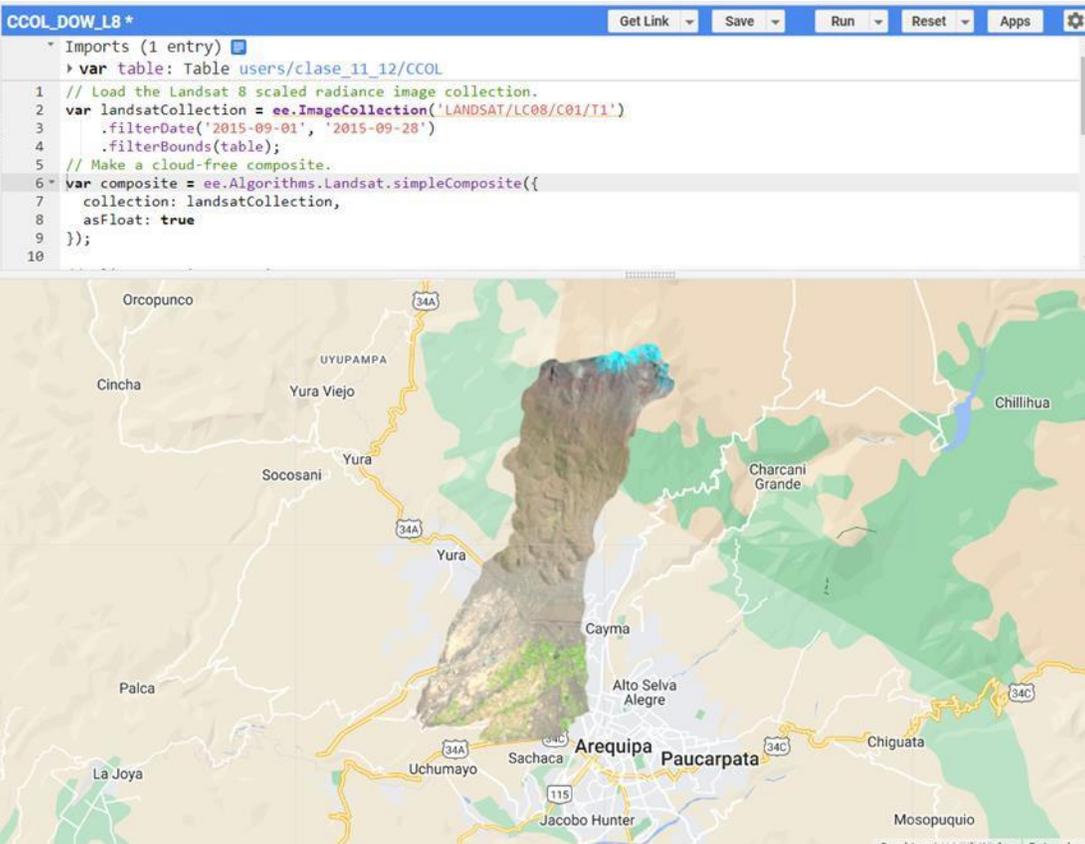


Anexo 07: Combinación de bandas satelitales Landsat 7 en Google Earth Engine para el año 2010.

Script GEE para la combinación de bandas satelitales Landsat 7 en GEE

```
CCOL_DOW_L8 *
Imports (1 entry)
var table: Table users/clase_11_12/CCOL
1 // Load the Landsat 8 scaled radiance image collection.
2 var landsatCollection = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1')
3   .filterDate('2015-09-01', '2015-09-28')
4   .filterBounds(table);
5 // Make a cloud-free composite.
6 var composite = ee.Algorithms.Landsat.simpleComposite({
7   collection: landsatCollection,
8   asFloat: true
9 });
10
11 // Clip composite to aoi
12 var clipped_composite = composite.clip(table);
13 // Visualize the Composite using different spectral band combinations to help you identify object
14 Map.addLayer(clipped_composite, {bands: ['B6', 'B5', 'B4'], max: 0.5, gamma: 2}, 'Natural color', true);
15 // Center map on the clipped composite
16 Map.centerObject(clipped_composite);
```

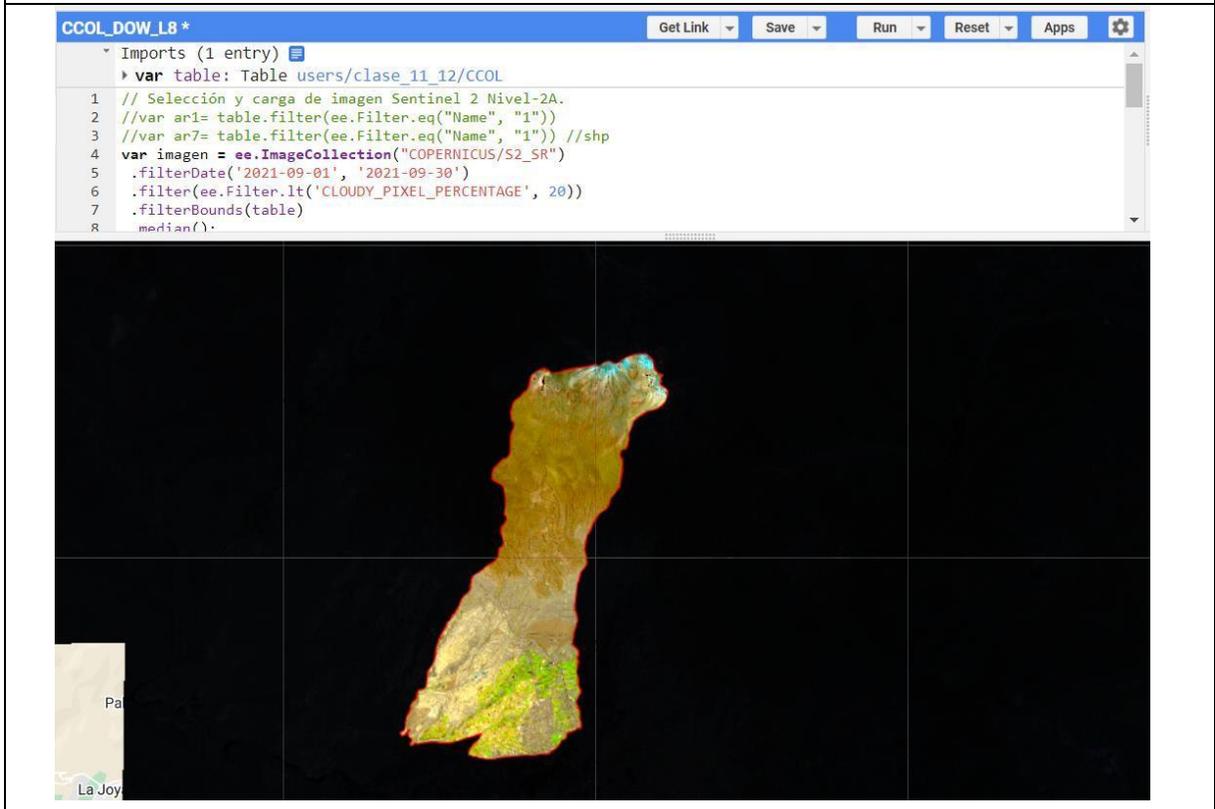
Visualización de la combinación de bandas satelitales Landsat 7 en GEE



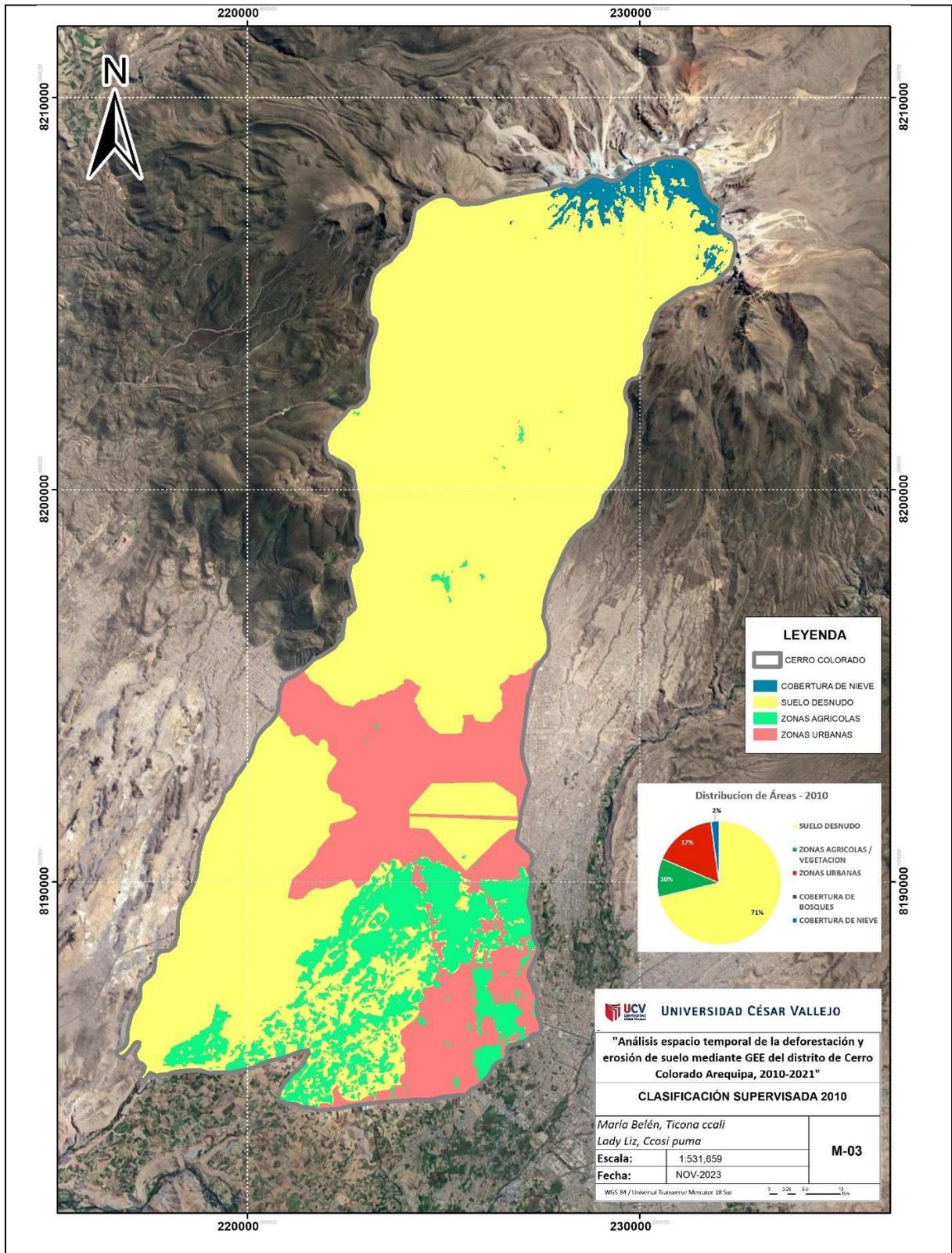
Script GEE para la combinación de bandas satelitales Sentinel 2 en GEE.

```
CCOL_DOW_L8 *
Get Link Save Run Reset Apps
Imports (1 entry)
var table: Table users/clase_11_12/CCOL
1 // Selección y carga de imagen Sentinel 2 Nivel-2A.
2 //var ar1= table.filter(ee.Filter.eq("Name", "1"))
3 //var ar7= table.filter(ee.Filter.eq("Name", "1")) //shp
4 var imagen = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR")
5 .filterDate('2021-09-01', '2021-09-30')
6 .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
7 .filterBounds(table)
8 .median();
9 print(imagen)
10 Map.addLayer(imagen)
11 Map.addLayer(table, {color:"red"});
12 //
13 var imagenClip = imagen
14 .clip(table);
15 //Parámetros de visualización de la imagen.
16 var paramsVisual = {bands: ['B11', 'B8A', 'B2'], min: 1000, max: 5000, gamma: 2.1}; //2.1
17 // Despliegue de la imagen Sentinel 2.
18 //Map.setCenter(-76.516946, 3.427947, 10);
19
20 Map.addLayer(imagenClip, paramsVisual, 'Sentinel 2 Nivel-2A');
21 var sentinelhyo = imagenClip.select(['B11','B8A', 'B2']); //
```

Visualización de la combinación de bandas satelitales Sentinel 2 en GEE.



Anexo 08: Mapa de la clasificación supervisada Landsat 7 - 2010.



Anexo 09: Mapa de la clasificación supervisada Sentinel 2- 2021.

