

DOI: 10.24850/j-tyca-18-01-05

Artículos

Determinación de la recarga potencial a través del uso de teledetección en la microcuenca San Agustín

Determining potential recharge through the use of remote sensing in the San Agustín microbasin

Robert Loaiza-Maldonado¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7330-9338>

Karelys Cevallos-Cisneros², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7466-6345>

Luis Vargas-Collaguazo³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7619-1323>

¹Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, rloaiza2@utmachala.edu.ec

²Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, kcevallos3@utmachala.edu.ec

³Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, lvargas@utmachala.edu.ec

Autor para correspondencia: Robert Loaiza, youloaiza_@hotmail.es



Resumen

El estudio tuvo como objetivo identificar las zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca San Agustín, Ecuador, mediante la aplicación de teledetección pasiva y sistemas de información geográfica (SIG). Se utilizaron imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2 y la ecuación de Matus (2007), integrando variables como pendiente, tipo de suelo, litología, cobertura vegetal y uso del suelo. Los resultados mostraron que el 96,22 % del área corresponde a categorías de recarga moderada a baja, mientras que las zonas de mayor potencial se localizaron en las riberas de la red de drenaje. En el componente de suelo predominan texturas arcillo-arenosas, limitantes para la infiltración, en contraste con los depósitos aluviales de río que, aunque menos extensos, favorecen una recarga eficiente por su alta permeabilidad. A pesar de las limitaciones, esta investigación aporta una herramienta útil para la gestión inicial de los recursos hídricos, orientada a procesos de ordenamiento territorial, la conservación de cobertura vegetal nativa y el control de presiones antrópicas. La zonificación generada representa un insumo para la toma de decisiones y punto de partida para investigaciones futuras que puedan incorporar validaciones en campo y análisis hidrogeológicos que permitan validar el potencial de recarga en el área de estudio.

Palabras clave: agua subterránea, teledetección, sistema de información geográfica, gestión de los recursos hídricos, uso de la tierra, cuenca, microcuenca San Agustín, Ecuador.

Abstract

This study aimed to identify potential groundwater recharge zones within the San Agustín micro-watershed, Ecuador, through the application of



passive remote sensing and geographic information systems (GIS). Multispectral Sentinel-2 imagery and the Matus (2007) equation were employed to integrate key variables, including slope, soil type, lithology, vegetation cover, and land use. The results indicate that 96.22% of the study area corresponds to moderate- to low-recharge categories, whereas the highest recharge potential was concentrated along the margins of the drainage network. The predominant soil textures—clay–sand mixtures—pose limitations to infiltration, in contrast with riverine alluvial deposits which, although spatially limited, enhance recharge due to their high permeability. Despite these constraints, the study provides a valuable preliminary tool for water-resource management, supporting territorial planning processes, the conservation of native vegetation cover, and the mitigation of anthropogenic pressures. The resulting recharge zonation serves as an input for decision-making and as a baseline for future research incorporating field validation and hydrogeological analyses to substantiate the recharge potential within the study area.

Keywords: groundwater, remote sensing, geographical information systems, water resources management, land use, basins, San Agustín microbasin, Ecuador.

Recibido: 25/02/2025

Aceptado: 11/04/2026

Publicado ahead of print: 20/05/2026



1. Introducción

El agua subterránea constituye uno de los recursos naturales más demandados para el consumo humano y, por tanto, uno de los componentes más valiosos del ciclo hidrológico, al almacenarse en los poros y fracturas de rocas y suelos. Sin embargo, el creciente deseo de satisfacer las necesidades humanas y fomentar el desarrollo económico ha originado condiciones de sobreexplotación, reducción de la disponibilidad y deterioro progresivo de las fuentes de agua superficial, lo que agrava la crisis hídrica en diversas regiones (Fatema et al., 2023).

En Ecuador, las aguas subterráneas aportan aproximadamente el 30 % del agua dulce utilizada. El consumo medio nacional alcanza los 18,65 m³ mensuales por habitante ($\approx 620 \text{ L día}^{-1}$), superando ampliamente los 100 L día⁻¹ recomendados por la Organización Mundial de la Salud (INEC, 2023). A pesar de ello, los estudios hidrogeológicos se han centrado mayoritariamente en la vulnerabilidad frente a la agricultura o la industria petrolera, mientras que las investigaciones orientadas a cuantificar la recarga natural son escasas y suelen basarse en balances hídricos o mediciones de campo puntuales (Campoverde-Muñoz et al., 2023). Esta carencia dificulta comprender cómo varía la capacidad de recarga entre cuencas de distintas latitudes y a lo largo del tiempo (Ramírez et al., 2022).

Las técnicas de teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) ofrecen una plataforma geoespacial eficiente y de bajo coste para cartografiar la disponibilidad potencial de agua subterránea (Leipnik et al., 2011). Sin embargo, su aplicación en el territorio ecuatoriano continúa siendo incipiente, lo que deja una brecha de

información crítica para la gestión integral de los recursos hídricos (Lara-Vásquez et al., 2021).

En escenarios con escasa disponibilidad de datos y marcada heterogeneidad climática, geológica y de uso del suelo, la ecuación de Matus (2007) se posiciona como un instrumento ágil y robusto para estimar el potencial de recarga hídrica (Melese & Belay, 2022). Su empleo reduce tiempos y costes de análisis, a la vez que genera insumos críticos para la planificación y la gestión sostenible del recurso (Boughariou et al., 2021).

En este contexto, este modelo se presenta como una herramienta para delimitar zonas potenciales de recarga hídrica en regiones con datos limitados, al integrar de forma cuantitativa variables clave (pendiente, litología, tipo de suelo, cobertura y uso del suelo) dentro de un entorno SIG. Aunque sus ponderaciones fueron definidas mediante consulta a expertos en Centroamérica, distintos estudios latinoamericanos han demostrado su transferibilidad a cuencas con características fisiográficas variadas. No obstante, el componente de cobertura vegetal de la metodología original depende de juicios participativos, introduciendo un grado de subjetividad.

Es importante mencionar que en Ecuador existen pocos estudios relacionados con la vulnerabilidad de los acuíferos, los cuales se han centrado principalmente en el impacto de las actividades agrícolas y petroleras. No obstante, en el ámbito hidrogeológico, los estudios enfocados en determinar la recarga natural son limitados. Los pocos trabajos existentes aplican metodologías como el balance hídrico, la variación del almacenamiento, el uso de trazadores y los infiltrómetros, herramientas fundamentales para evaluar la capacidad de recarga de los acuíferos y entender los procesos hidrológicos subyacentes.

La ecuación de Matus, utilizada en esta investigación para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca San Agustín, resulta particularmente útil en las cuencas y subcuencas de Ecuador debido a su capacidad para integrar diversas variables geográficas y climáticas que influyen en la recarga de aguas subterráneas. Su fortaleza radica en la integración cuantitativa de variables clave y en la facilidad de implementación dentro de un entorno SIG, lo cual la convierte en una herramienta eficiente para estimar zonas de recarga sin requerir análisis extremadamente costosos o complejos. Es pertinente señalar que las ponderaciones de las variables en la ecuación original fueron definidas a partir de un proceso de consulta a expertos, quienes valoraron el nivel de importancia de factores como pendiente, tipo de suelo, litología, cobertura vegetal y uso del suelo en la capacidad de recarga. Posteriormente, dichas valoraciones se promediaron en pesos relativos para cada variable, otorgándole al modelo un sustento metodológico sólido. Esta característica explica la posibilidad de replicar la ecuación en distintos contextos: aunque cada variable presenta valores locales específicos, estos se multiplican por los pesos relativos definidos en el estudio de Matus, garantizando la transferibilidad del modelo a cuencas latinoamericanas con condiciones fisiográficas semejantes, como es el caso de la microcuenca San Agustín.

En contextos con datos limitados y una alta variabilidad en las condiciones climáticas, geológicas y de uso del suelo, la ecuación de Matus proporciona una herramienta sencilla y efectiva para estimar el potencial de recarga. Este enfoque permitirá generar información clave para la toma de decisiones y el aseguramiento hídrico.

El objetivo de este estudio fue identificar y cartografiar las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en la microcuenca San Agustín

mediante la aplicación de la ecuación de Matus (2007), adaptando el componente de vegetación mediante clasificación supervisada de imágenes Sentinel-2, reduciendo así la subjetividad de evaluaciones participativas tradicionales.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La microcuenca San Agustín ubicada en las coordenadas 633663 – 9621735 como zona de descarga tiene un área de 18.635 hectáreas (Figura 1), esta, abarca cuatro cantones: Santa Rosa, Pasaje, Chilla y Atahualpa, y se distribuye a lo largo de las parroquias de Ayapamba, San Juan de Cerro Azul, La Victoria, Pasaje y Chilla. Tiene una variación altitudinal y alcanza alturas extremas que oscilan entre los 3647 metros sobre el nivel del mar (msnm) y los 36 msnm con una elevación promedio alrededor de los 1238 msnm.

Dentro de la microcuenca se encuentran dos fuentes de agua superficial primordiales: el río Dumarí y el río San Agustín. Se caracteriza por tres tipos de clima: "Tropical Megatérmico Húmedo", "Ecuatorial Mesotérmico Húmedo" y "Subtropical Mesotérmico Húmedo", y presenta un rango de precipitación anual acumulada que va desde 1000 a 2000 mm, con una temperatura media anual que oscila entre 12 y 22 °C.

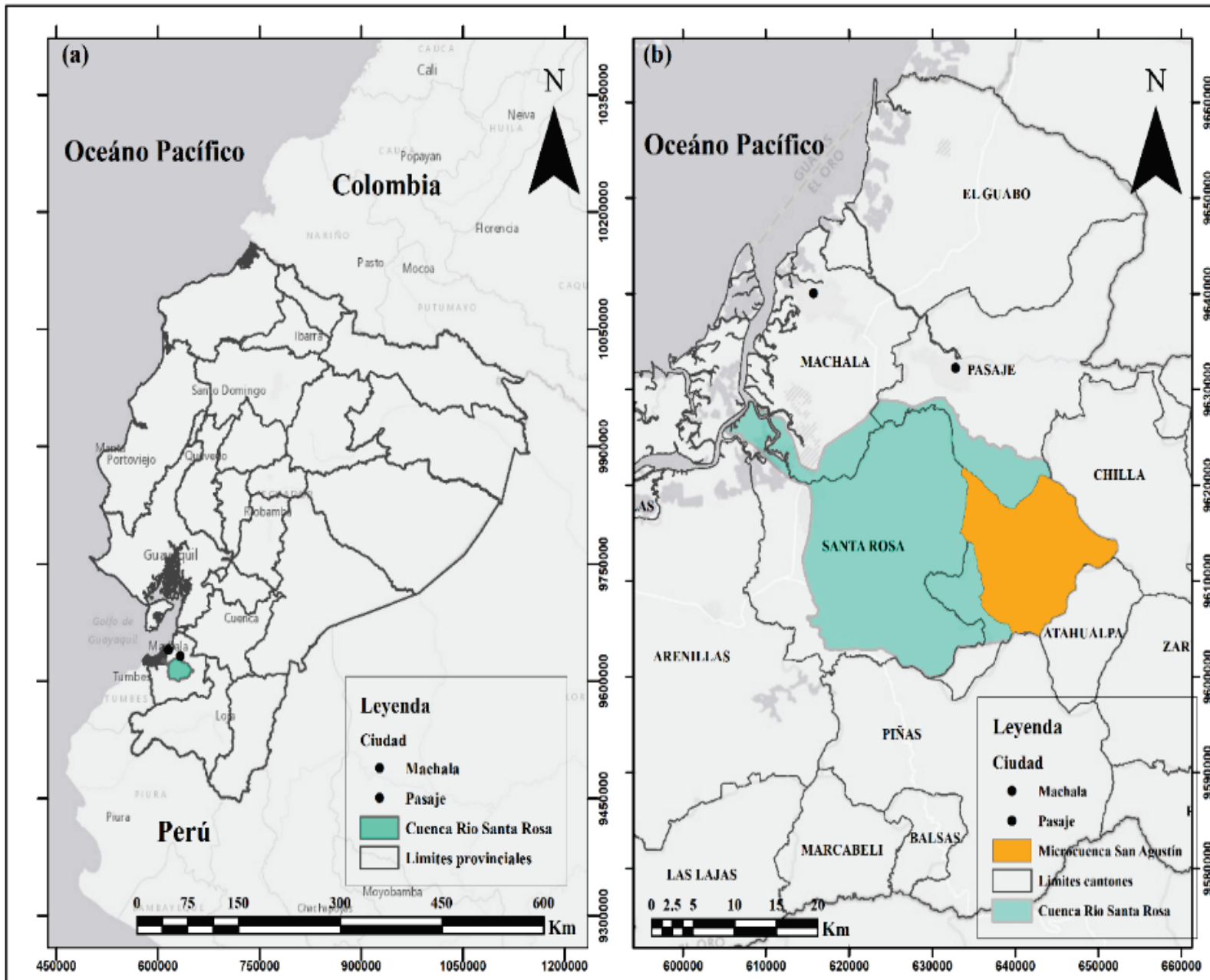


Figura 1. Ubicación de la microcuenca San Agustín. (a) La microcuenca San Agustín, ubicada en la provincia de El Oro, al sur del Ecuador. (b) La microcuenca San Agustín situada al este de la cuenca del río Santa Rosa.

2.2. Métodos

2.2.1. Datos y fuentes

En la microcuenca se caracterizaron las variables geográficas incluyendo la pendiente, litología, tipo de suelo, cobertura vegetal nativa y uso del suelo. Este análisis se realizó mediante la recopilación y procesamiento de datos obtenidos de diversas fuentes de acceso público en Ecuador, como el portal SIGTIERRAS del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el mapa interactivo del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), y de las bases de datos de Copernicus y Alaska específicamente para pendiente y cobertura vegetal (Buchhorn et al., 2020). Los datos recopilados fueron procesados y analizados utilizando herramientas de SIG, lo que permitió una evaluación detallada y precisa de las características geofísicas de la microcuenca (Aguilar et al., 2023). A continuación, en la tabla 1 se adjuntan las imágenes satelitales que se utilizaron para el presente estudio.

Tabla 1. Productos y bandas utilizados en el procesamiento de datos para las zonas potenciales de recarga hídrica

Nombre del producto	Numero de banda	Nombre de la banda	Resolución espectral (um)	Resolución espacial (m)	Fecha de toma de imagen satelital
Sentinel 2B	1	Coastal aerosol	0,43-0,45	60	29-08-2023
Sentinel 2B	2	Blue	0,45-0,52	10	29-08-2023
Sentinel 2B	3	Green	0,54-0,57	10	29-08-2023
Sentinel 2B	4	Red	0,65-0,68	10	29-08-2023
Sentinel 2B	5	Vegetación Red Edge	0,69-0,71	20	29-08-2023
Sentinel 2B	6	Vegetación Red Edge	0,73-0,74	20	29-08-2023
Sentinel 2B	7	Vegetación Red Edge	0,77-0,79	20	29-08-2023
Sentinel 2B	8	NIR (infrarrojo cercano)	0,78-0,90	10	29-08-2023
Sentinel 2B	8a	Vegetación Red Edge	0,85-0,87	20	29-08-2023
Sentinel 2B	9	Water vapor	0,93-0,95	60	29-08-2023
Sentinel 2B	10	SWIR-Cirrus	1,36-1,39	60	29-08-2023
Sentinel 2B	11	SWIR (infrarrojo de onda corta)	1,56-1,65	20	29-08-2023
Sentinel 2B	12	SWIR (infrarrojo de onda corta)	2,10-2,28	20	29-08-2023

Fuente: Copernicus, 2024.

2.2.2. Metodología original (Matus)

La metodología propuesta por Matus Silva, (2007) fue desarrollada en la subcuenca del río Jucuapa en Nicaragua, utilizando un enfoque participativo mediante consulta a expertos, técnicos y pobladores para ponderar cinco variables clave: pendiente, tipo de suelo, litología, cobertura vegetal y uso del suelo. El modelo asignó pesos relativos con base en un análisis de Chi-cuadrado G^2 para construir un índice sintético de recarga hídrica, expresado mediante la ecuación (1), mostrando gran aplicabilidad en contextos con limitaciones de datos.

En este estudio se replicó la estructura general, pero se incorporaron adaptaciones metodológicas, específicamente en la variable de cobertura vegetal, con el fin de reducir una posible subjetividad asociada al enfoque participativo del método original. La elección de la metodología fue producto de una revisión bibliográfica (Figura 2) que evidenció su pertinencia para microcuencas con escasa información y disponibilidad restringida de mediciones directas y datos hidrogeológicos.

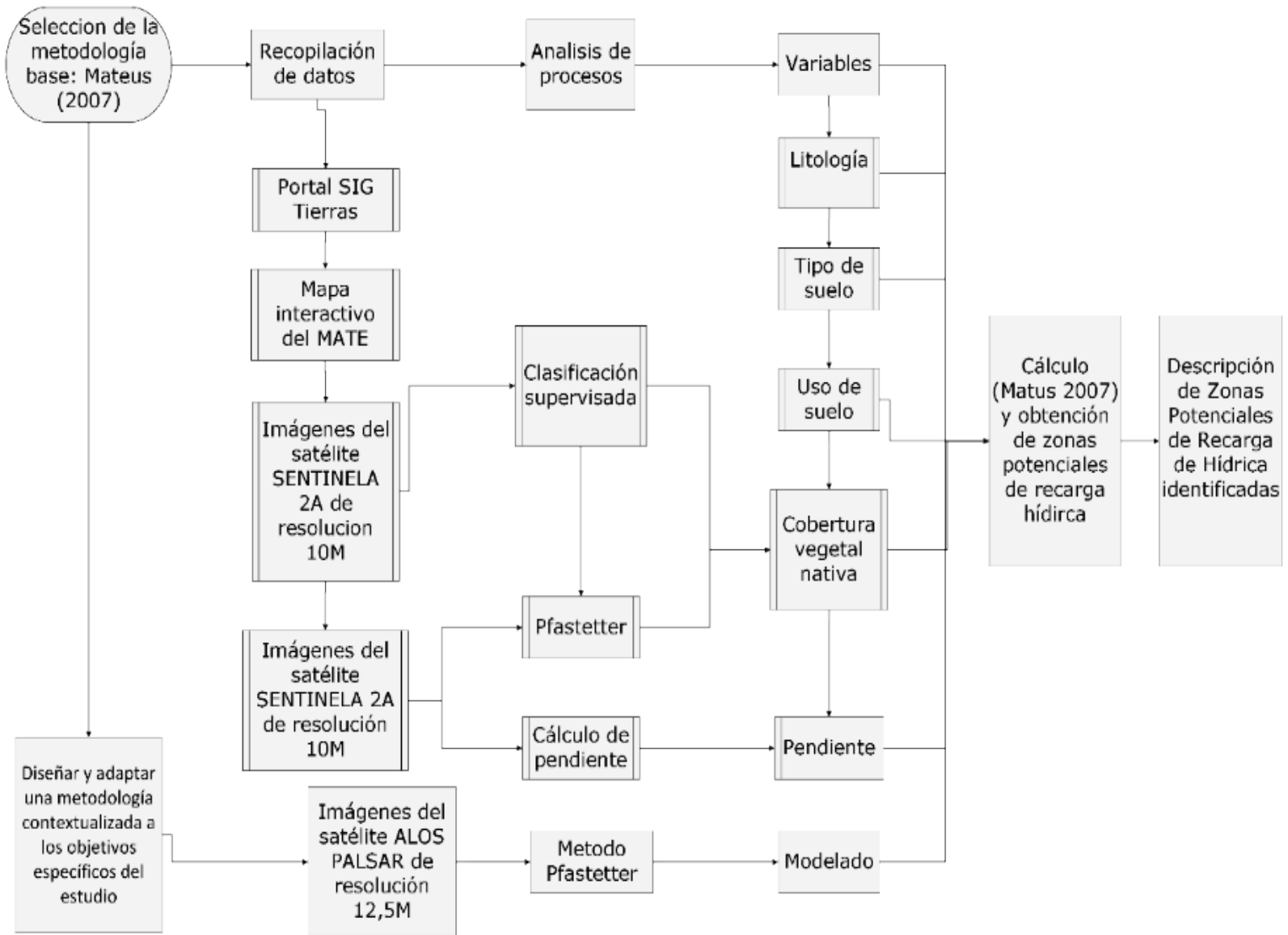


Figura 2. Diagrama metodológico. El diagrama muestra el proceso metodológico para identificar las zonas de recarga hídrica, basado en (Matus Silva, 2007). Utiliza análisis de imágenes satelitales, Sentinel 2A (Puerta Tuesta et al., 2023) herramientas SIG, y el modelo de Pfaffstetter, para calcular pendientes y clasificar variables como tipo de suelo y cobertura vegetal nativa, con el fin de mapear las zonas de recarga hídrica.

Los coeficientes usados en la ecuación de Matus corresponden a la importancia relativa asignada a cada variable en el proceso de recarga hídrica, basándose, en regiones con condiciones similares. Aunque un análisis de componentes principales podría identificar las variables de mayor peso, el modelo utiliza cinco variables (pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo), se mantuvieron las cinco variables originales ya que responden a un equilibrio entre precisión y simplicidad, especialmente en escenarios con datos limitados.

2.2.3. Fases metodológicas

2.2.3.1. Fase 1. Análisis espacial y caracterización del área

En una primera fase se debe realizar un análisis de la cartografía temática empleando sistemas de información geográfica (SIG), con proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) zona 17 Sur y Datum World Geodetic System 1984 (WGS84), con el objetivo de caracterizar geográficamente el área de estudio y preparar las variables en capas geoespaciales de entrada para luego procesarlas.

2.2.3.2. Fase 2. Procesamiento de variables y aplicación de la ecuación de Matus

Las cinco variables biofísicas se convierten en formato ráster y se estandarizan para su integración con la ecuación de Matus (2007). Para establecer subsecciones de la cuenca en donde se puedan interrelacionar las variables de superficie con la cobertura vegetal, se utilizó el método Pfafstetter (Silva et al., 2008) como una herramienta para subdividir la microcuenca en unidades hidrográficas jerarquizadas. Esta subdivisión

facilitó la asignación porcentual de la variable cobertura vegetal a cada unidad, permitiendo una aplicación más precisa y localizada de la metodología de Matus. Para afrontar esta limitación, el presente trabajo incorpora un enfoque objetivo para la variable cobertura vegetal, basado en una clasificación supervisada de imágenes satelitales validada con puntos de control de campo y agregada por unidades hidrográficas jerarquizadas mediante el método Pfafstetter, eliminando así la subjetividad y mejorando la resolución espacial del análisis.

2.2.3.3. Fase 3. Clasificación de zonas potenciales de recarga

El índice sintético obtenido se clasificó en cinco categorías: muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo potencial de recarga. Esta clasificación permitió identificar gradientes espaciales de infiltración y generar el mapa final de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica (ZPRH) para la microcuenca.

En ese contexto, siguiendo la metodología, se recogió la información y se elaboraron grupos de mapas temáticos del área de estudio (considerando resoluciones espaciales de 12.5 m a 30 m) que se presentaron a lo largo de la investigación, de acuerdo con las cinco variables consideradas para la identificación de las zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas.

2.3. Ajustes propuestos

2.3.1. Contribución al método respecto a la variable de cobertura vegetal

A diferencia de la propuesta original de Matus (2007), que emplea talleres comunitarios y encuestas participativas para asignar valores a la variable de cobertura vegetal, en este estudio se adoptó un enfoque técnico basado en teledetección y análisis espacial.

2.4. Procesamiento

En primer lugar, se realizó una clasificación supervisada de la cobertura terrestre a partir de imágenes satelitales, empleando puntos de control levantados en campo para identificar zonas con vegetación nativa. Posteriormente, con el fin de calcular el porcentaje de cobertura vegetal por unidad espacial, se subdividió la microcuenca en unidades hidrográficas jerárquicas mediante el método Pfafstetter (Silva et al., 2008).

Para cada unidad hidrográfica, se estimó el porcentaje de vegetación nativa en relación con su superficie total, obteniendo así un valor porcentual objetivo que reemplaza el criterio participativo. Este ajuste metodológico permitió generar resultados cuantitativos para la variable cobertura vegetal en la estimación del potencial de recarga hídrica.

En términos generales, se llevó a cabo la delimitación empleando el modelo digital de elevación, el cual se ajustó a nivel radiométrico y atmosférico. La corrección radiométrica implica el procedimiento de

modificar las imágenes de forma que los valores de intensidad representen con exactitud las propiedades del suelo, suprimiendo factores como la sombra o la variabilidad en la luz. En cuanto a la corrección atmosférica, su objetivo es reducir los impactos de la atmósfera, como la dispersión y absorción de la luz, con el fin de conseguir una representación más exacta de las propiedades del área en análisis (Camacho-Velasco et al., 2015).

Con el uso de las herramientas Flow Direction, Flow Accumulation y Stream Link en ArcGIS Pro se identificó la posible existencia de escurrimiento superficial del agua, formando corrientes de tercer, segundo y primer orden. Este análisis permitió obtener resultados a nivel micro, enfocados en la aplicación de la clasificación supervisada, lo que contribuyó a generar datos precisos para analizar la incidencia de la cobertura vegetal en la potencialidad de recarga subterránea.

Concluido el proceso de delimitación de las intercuencas, se debe realizar la clasificación supervisada utilizando productos del satélite Sentinel-2 con una resolución espacial de 10 metros (Puerta Tuesta et al., 2023). Luego, se deben seleccionar los puntos de control y entrenamiento, teniendo en cuenta las limitaciones de acceso al área (vías, geografía, condiciones climáticas, etc.), estos puntos de control deben ser visitados en campo y de esta manera permiten georreferenciar las zonas con cobertura vegetal permanente.

Una vez realizada la colocación de puntos de control en el software ArcGIS Pro, se llevó a cabo el geoprocesamiento de las firmas espectrales de las clases obtenidas mediante la opción de clasificación por máxima verosimilitud. En este proceso, se utilizó una fracción de rechazo de 0,5 y se asignaron las celdas correspondientes a cada categoría, como vegetación densa (áreas con alta cobertura de vegetación), vegetación

escasa (zonas con vegetación dispersa o baja densidad), suelo expuesto (terrenos sin vegetación o cubierta superficial) y agua superficial (cuerpos de agua como lagos o ríos). Finalmente, se determinó el porcentaje de cobertura vegetal en el área de estudio.

En el proceso de geoprocésamiento de los puntos de control correspondientes a la clase de cobertura vegetal permanente, se identifican áreas con valores de datos ausentes. Esta situación ocurre porque los puntos de control y los archivos asociados con firmas espectrales se limitan exclusivamente a los píxeles que cumplen con las condiciones definidas por dichos puntos. Específicamente, solo se consideran los píxeles que presentan características espectrales congruentes con las muestras recolectadas en campo, a estos píxeles se les asigna una ponderación específica que refleja su correspondencia con las condiciones establecidas en el modelo de clasificación.

Posteriormente, obtenidos los mapas de entrada fueron rasterizados, recategorizando también sus atributos (1 a 5 por cada variable) según los criterios establecidos por Matus (2007) en función de sus aptitudes respecto a la infiltración de agua.

2.5. Cálculo e identificación de zonas potenciales de recarga hídrica

Configurados los mapas de entrada, se utilizó el álgebra de mapas mediante la ecuación (1) como algoritmo base, en la cual cada valor de celda asignado de cada mapa de entrada se multiplicó por su correspondiente factor de peso (Matus, 2007). Estos factores de peso o coeficientes se obtuvieron mediante un proceso de consulta, entrevistas semiestructuradas dirigidas a tres grupos: especialistas, técnicos y

pobladores locales. El objetivo fue conocer la percepción de cada grupo sobre la influencia relativa de diferentes variables físicas en la recarga de acuíferos.

La pendiente (0,27) tiene el mayor peso debido a su fuerte influencia en la infiltración. El tipo de suelo (0,23) y la cobertura vegetal (0,25) tienen un alto peso por su impacto en la capacidad de retención de agua, mientras que el tipo de roca (0,12) y el uso del suelo (0,13) tienen un peso menor.

La distribución de la lluvia no se incluyó debido a la limitación de los datos disponibles, aunque podría ser considerada en futuros estudios. La metodología se basa en la ecuación de Matus para calcular la probabilidad de recarga, aplicable bajo el supuesto de que las condiciones geográficas y climáticas se mantienen relativamente constantes.

$$ZPRH = [0.27(pend) + 0.23(T) + 0.12(Tr) + 0.25(Cve) + 0.13(Us)] \quad (1)$$

Donde:

ZPRH = Zonas Potenciales de Recarga Hídrica

Pend = pendiente

Ts = tipo de suelo

Tr = tipo de roca

Cve = Cobertura vegetal

Us = uso de suelo

Luego de procesar los datos geospaciales, se debe utilizar un Sistema de Información Geográfica (GIS) para analizar y clasificar las

variables: pendiente, tipo de suelo, litología, cobertura vegetal y uso del suelo. Según Matus, (2007) el resultado del cálculo de la ecuación ponderada permite categorizar el potencial de recarga en cinco rangos: "muy alto", "alto", "moderado", "bajo" y "muy bajo" (Tabla 2). Estas clases representan un índice relativo de potencial de infiltración, no una medida directa en unidades de volumen o área recargada, y facilitan la identificación de zonas con mayores o menor capacidad de favorecer la recarga subterránea. Es importante destacar que estos rangos reflejan la interacción de las características físicas y de cobertura el área en estudio, permitiendo evaluar comparativamente las áreas según su aptitud para la recarga hídrica.

Tabla 2. Potencial de recarga de aguas subterráneas

Potencialidad de recarga	Rango
Muy Alta	4,1-5,0
Alta	3,5-4,09
Moderada	2,6-3,49
Baja	2-2,59
Muy Baja	1-1,99

3. Resultados y discusión

3.1. Pendiente

La pendiente se consideró una variable fundamental para evaluar el potencial de recarga hídrica en la microcuenca San Agustín, dado que influye directamente en los procesos de infiltración y escorrentía. Para su

análisis, se generó un mapa de pendientes a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) y se reclasificó siguiendo los criterios propuestos por Matus (2007). Las categorías se establecieron en rangos porcentuales, diferenciando cinco clases de pendiente con su respectivo microrelieve.

Las pendientes onduladas (15–45 %) representan el 46,61 % del área total de la microcuenca y se distribuyen en toda el área de estudio, mientras que las áreas escarpadas (45–65 %) abarcan el 28,88 % del área y se concentran principalmente en la parte noreste. Las áreas con pendientes suaves (0–6 %) recibieron una ponderación de 5, asociada a una elevada infiltración, mientras que las pendientes de tipo ondulado (15–45 %) se clasificaron con una ponderación de 3, correspondiente a una capacidad de recarga moderada. Estas ponderaciones se integraron en el modelo de álgebra de mapas como insumo para el cálculo del índice de recarga potencial.

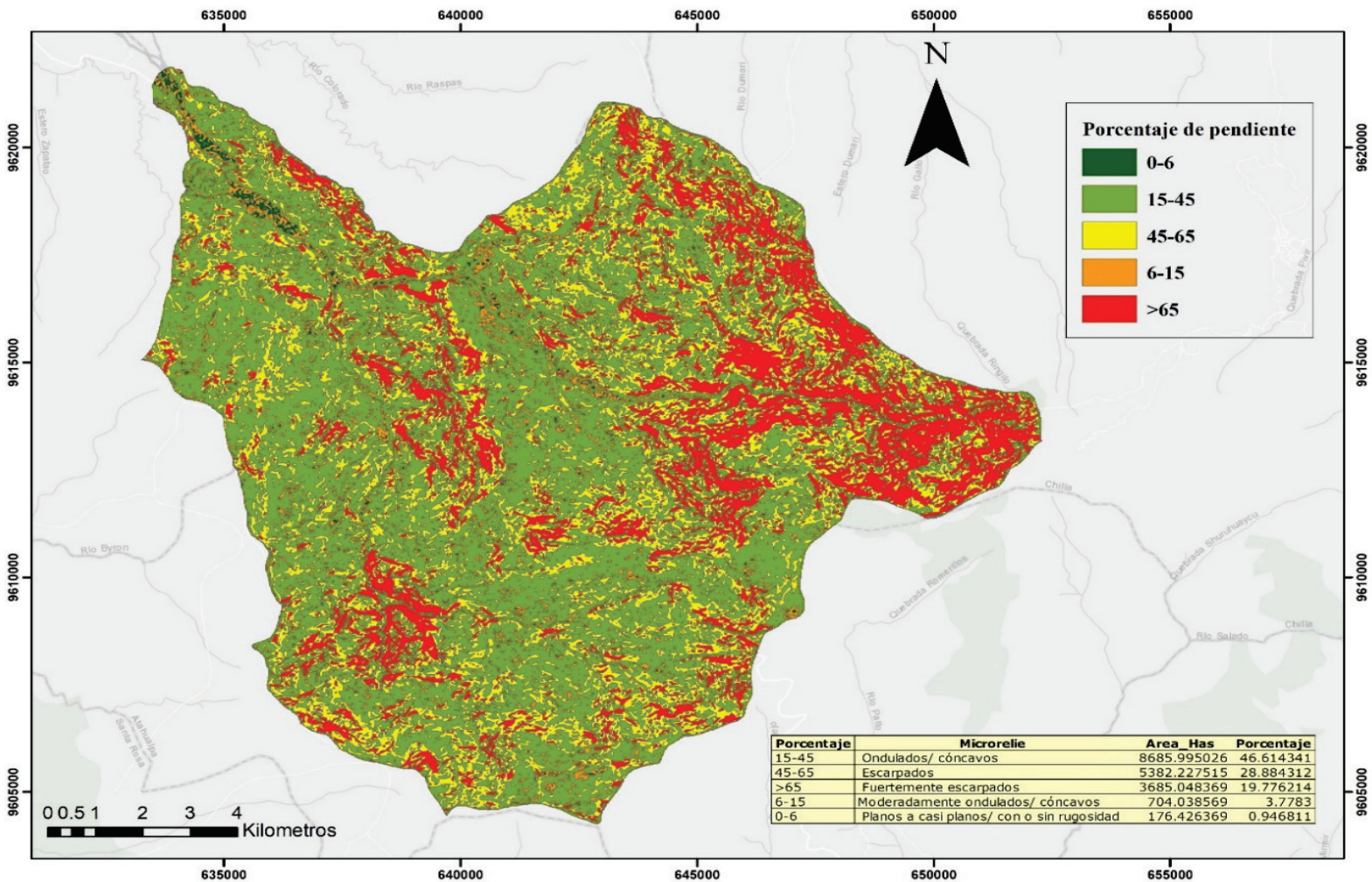


Figura 3. Mapa de porcentaje de pendiente en el área de estudio

Uno de los factores más significativos en este proceso es precisamente la pendiente, ya que juega un papel crucial en los procesos de infiltración y recarga, como se observa en estudios previos. Según (Martínez-Santos et al., 2021b), las zonas con pendientes suaves o planas presentan una mayor capacidad de infiltración, lo que favorece la recarga hídrica. Este hallazgo subraya la importancia de incluir la topografía en los modelos de recarga, ya que determina en gran medida la dinámica del flujo de agua superficial y su capacidad para infiltrarse en el suelo. El tipo

de suelo destaca por ser una de las variables con mayor ponderación en la ecuación, debido a su incidencia en la infiltración y percolación del agua. Los resultados muestran que la mayor parte del área de estudio presenta una textura de suelo arcillo-arenosa, que constituye el 55,54 % del total del área de la microcuenca. En contraste, la textura de suelo de tipo arcilloso es la de menor presencia, con un 1,73 %.

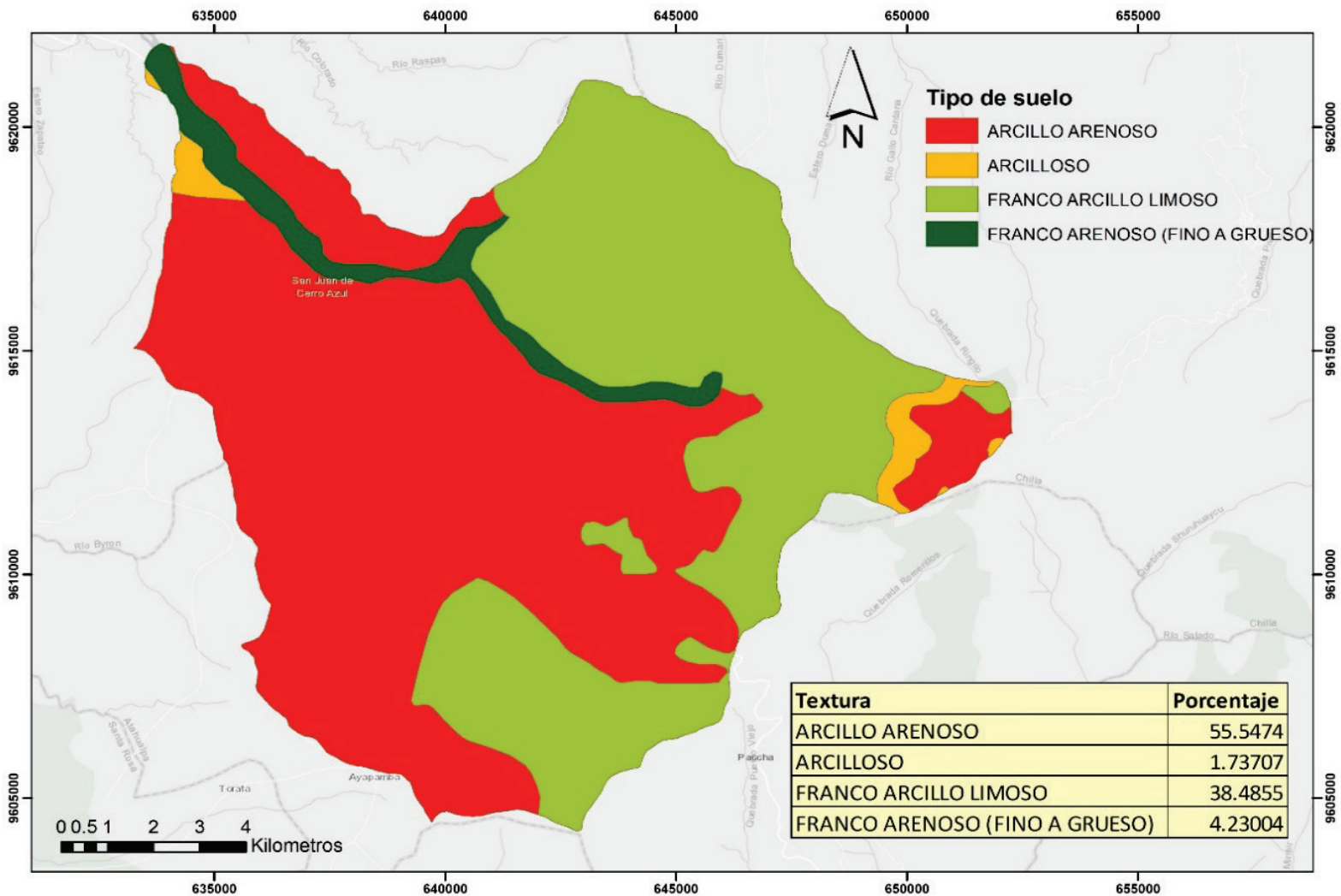


Figura 4. Mapa de tipo de suelo en el área de estudio

Esta distribución textural se relaciona directamente con el tamaño de partícula y su efecto sobre la infiltración. Según Cleophas et al. (2022), el aumento del contenido de arcilla en el suelo tiende a incrementar la materia orgánica, lo que aumenta la capacidad de la arcilla para unirse eficazmente a las moléculas de agua, reduciendo así la capacidad de infiltración del suelo. Las partículas más pequeñas y las mayores áreas superficiales de la arcilla crean poros de pequeño tamaño que retienen el agua con mucha fuerza, afectando las condiciones previas de humedad del suelo y ralentizando la velocidad de infiltración.

En términos de potencial de recarga, estas condiciones indican que una proporción considerable de la microcuenca se encuentra limitada por su textura de suelo, lo que contribuye a explicar la predominancia de categorías de recarga moderada a baja en el índice final.

3.2. Litología

En la variable litológica, la categoría "depósito aluvial de río" es la más destacada desde el punto de vista de la recarga, aunque solo representa el 1,53 % del total del área de estudio. Las ponderaciones obtenidas con relación a la posibilidad de recarga muy alta se expresan precisamente en esta categoría, debido a su alta permeabilidad, que favorece la infiltración y recarga de las aguas subterráneas. La capacidad de los depósitos aluviales para permitir el paso del agua con mayor facilidad los convierte en zonas clave para la recarga efectiva de los acuíferos.

Este comportamiento es coherente con lo reportado por Hassaballa & Salih (2024) quienes observaron que las zonas de alta recarga se

correlacionan directamente con la presencia de arroyos y cuerpos de agua superficiales asociados a sedimentos permeables.

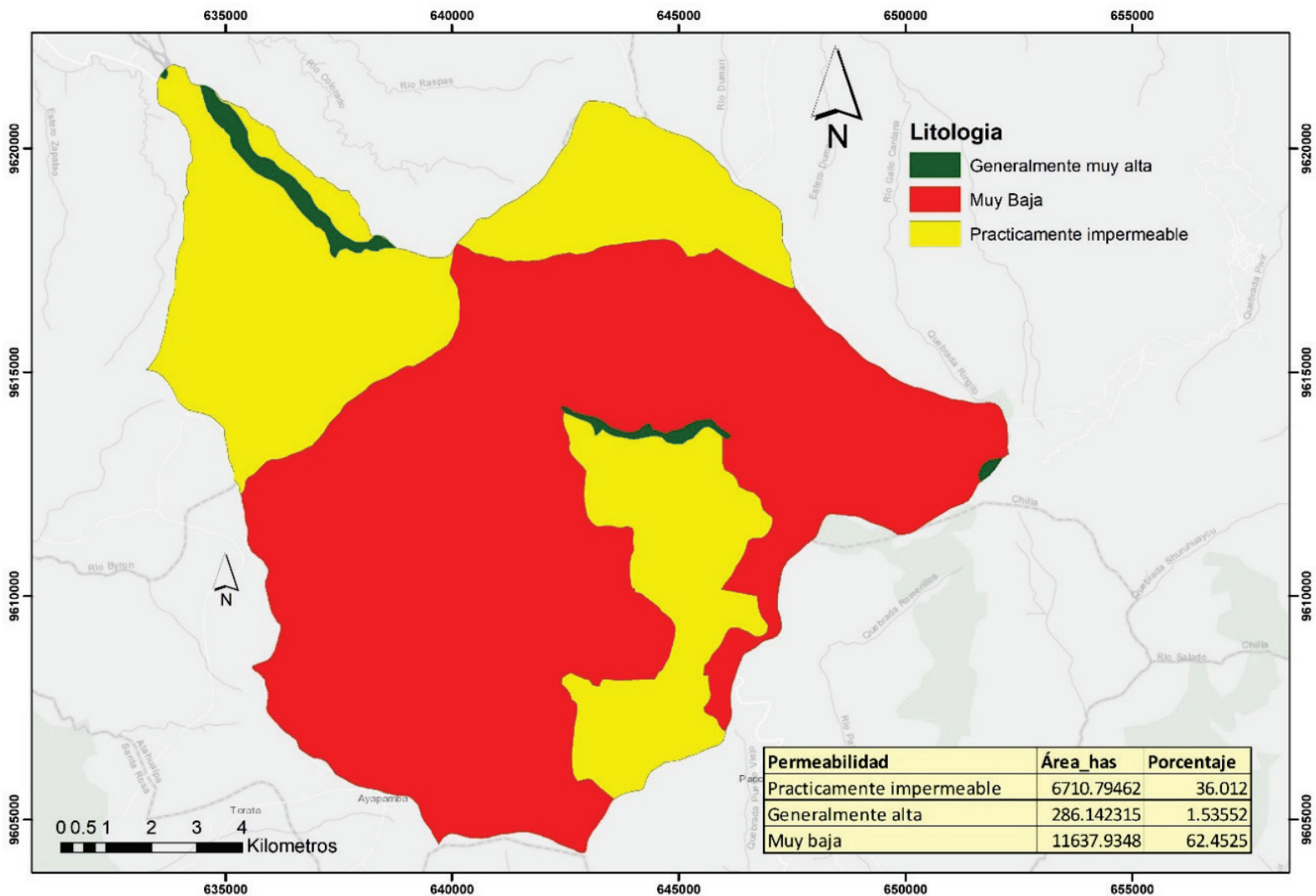


Figura 5. Mapa de litología en el área de estudio

3.3. Cobertura vegetal

Se identificaron las clases de vegetación densa, vegetación escasa, suelo expuesto y cuerpos de agua. Para mejorar la representación espacial de la cobertura vegetal permanente, la microcuenca San Agustín fue subdividida en unidades hidrográficas utilizando el método Pfafstetter, el cual permite jerarquizar la red de drenaje y organizar el territorio en subunidades coherentes con la dinámica del flujo. Como resultado, se delimitaron dos unidades de tipo cuenca (cuencas principales) y tres unidades de tipo intercuenca, definidas en función de la topografía y la dirección del escurrimiento superficial. Esta subdivisión, realizada mediante herramientas SIG, permitió calcular de manera más precisa el porcentaje de vegetación dentro de cada unidad hidrográfica, reduciendo la subjetividad asociada al enfoque participativo de la metodología original.

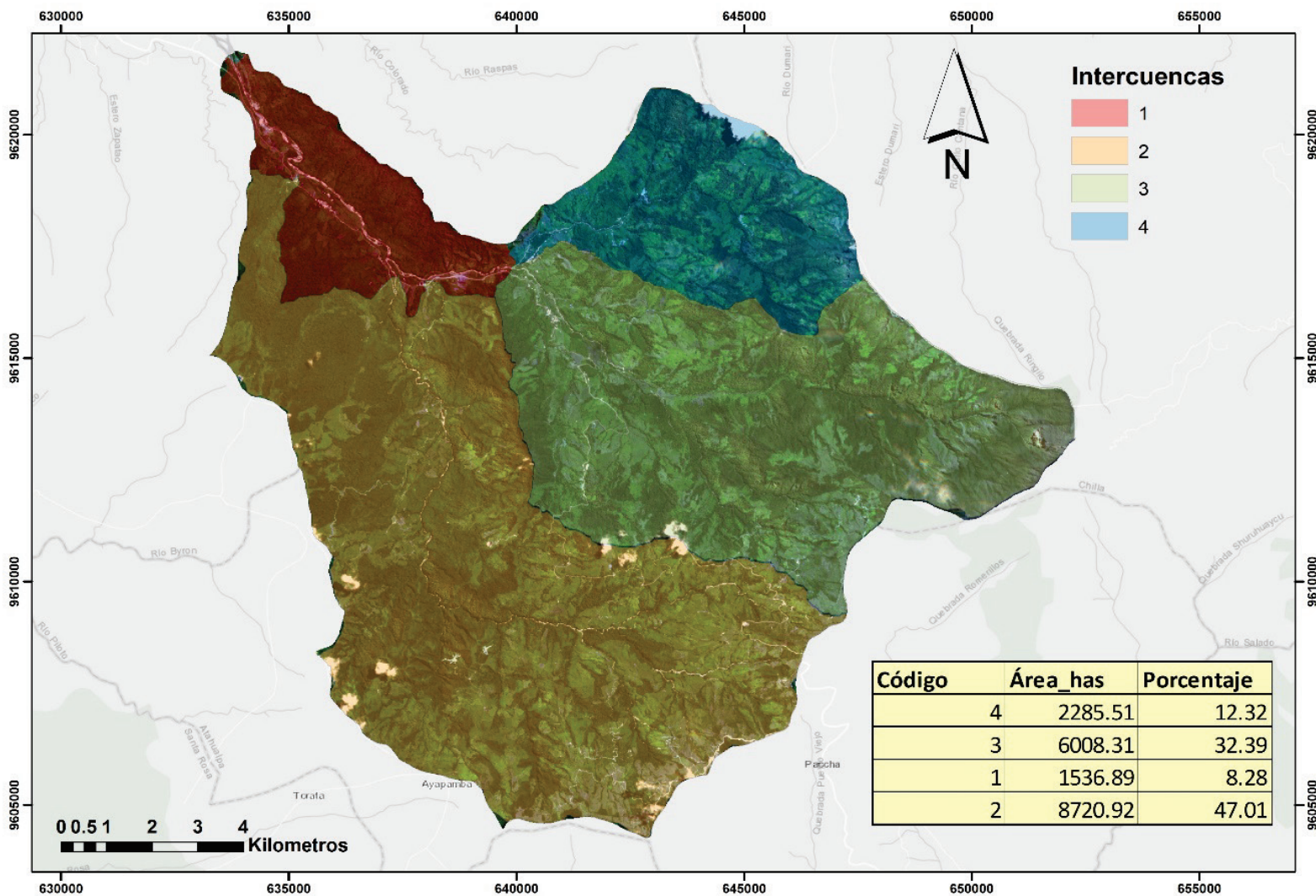


Figura 6. Mapa de cobertura vegetal en el área de estudio a través de imágenes satelitales.

Posteriormente, se traspuso el vector obtenido de la variable de cobertura vegetal, lo que permitió identificar que las cuencas número 1 y 2 concentran entre el 47 % y el 55 % del total de cobertura vegetal del área de estudio, mientras que las cuencas número 3 y 4 presentan valores entre el 32 % y el 44 %. La cobertura vegetal es una variable clave en el

modelo de Matus, con un peso relativo de 0,25, pues favorece la infiltración y reduce la escorrentía.

No obstante, la cobertura vegetal nativa juega un papel cuya influencia puede variar según las especies presentes. El modelo de Matus, al centrarse únicamente en el porcentaje de cobertura vegetal sin considerar las características específicas de la vegetación, presenta limitaciones. Castaño et al. (2018) señalan que, si bien la cobertura vegetal es un indicador importante, las especies presentes y sus características fisiológicas también influyen en la capacidad de recarga. Especies como Eucalyptus son conocidas por su alta demanda de agua debido a la evapotranspiración y a la absorción de agua por las raíces, lo que puede inhibir la recarga subterránea (Mattos et al., 2019).

La integración de la clasificación supervisada y el sistema de Pfafstetter mejora la precisión en la identificación de la cobertura vegetal nativa, permitiendo una clasificación más detallada de las zonas de recarga. Sin embargo, el coeficiente de 0,25 asignado a la cobertura vegetal en la ecuación de Matus no cambia, ya que este valor refleja el impacto general de la vegetación en la recarga hídrica, basado en estudios previos. Aunque la técnica mejora la precisión del mapeo de la cobertura vegetal, no impacta directamente en el coeficiente, que permanece como un parámetro global que representa el papel de la vegetación en la infiltración y recarga Martínez-Santos et al. (2021b).

3.4. Uso de suelo

En cuanto al uso de suelo, se determinaron cinco clases, siendo el bosque nativo la dominante, con un 89 % del total. Le siguen los pastizales con un 7,34 %. El área poblada, distribuida en la parte norte, centro y noroeste de la microcuenca, representa el 1,93 % del área total. El área sin cobertura vegetal ocupa el 0,73 % del terreno y, finalmente, la tierra agropecuaria representa el 0,028 %.

La investigación coloca en evidencia cómo el cambio en el uso del suelo y la degradación de los ecosistemas influyen en la capacidad de recarga de los acuíferos. Las zonas de baja y muy baja recarga están fuertemente vinculadas con la transformación del paisaje debido al crecimiento de actividades económicas, especialmente la expansión agrícola. Boughariou et al., (2021), destacan que la actividad humana contribuye a la disminución de la recarga hídrica, y (Morell Bayard & Luna, 2024) señalan que las alteraciones en el uso del suelo y la degradación de los ecosistemas reducen la capacidad del suelo para retener agua y, por tanto, limitan la recarga de los acuíferos.

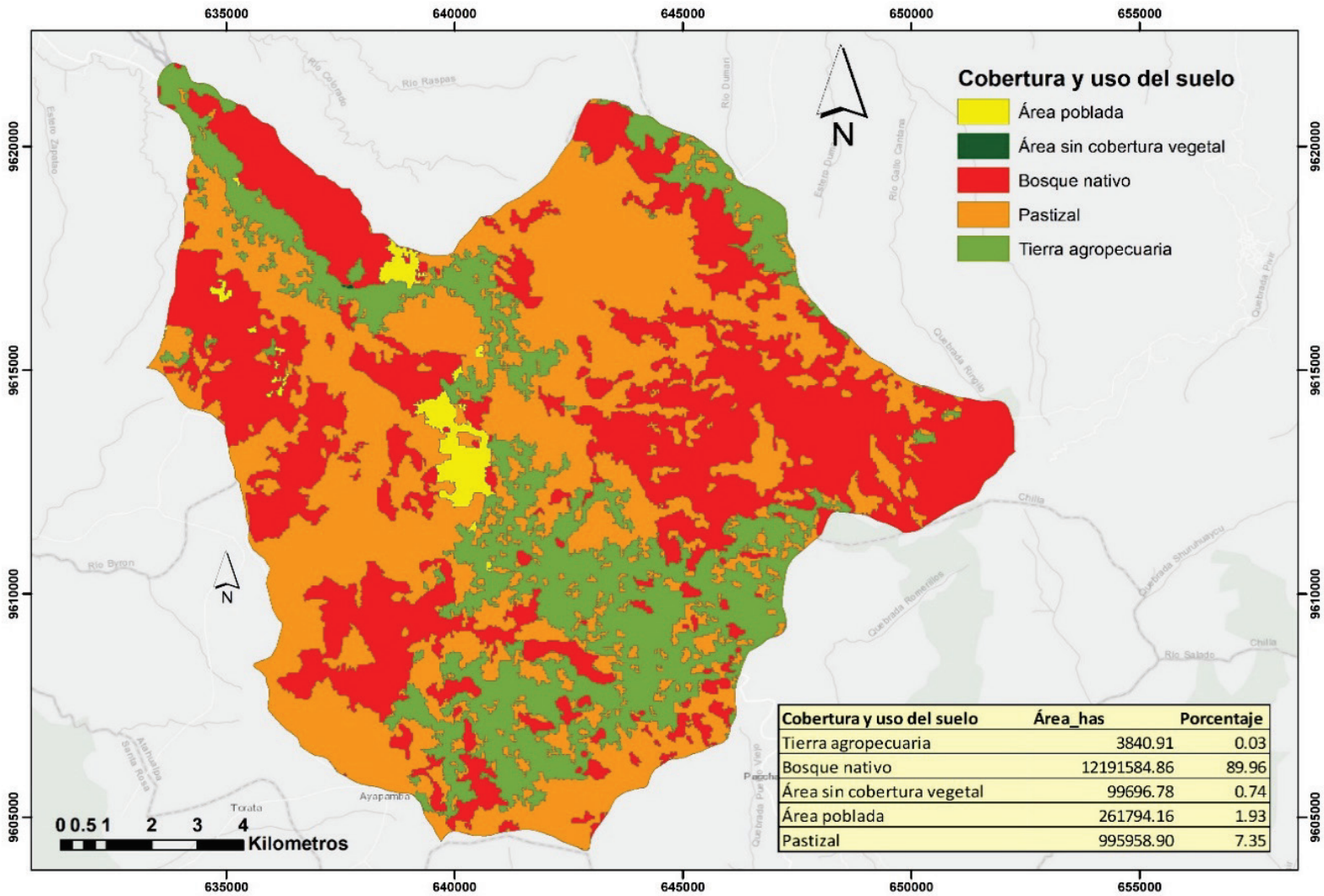


Figura 7. Mapa de uso y cobertura del suelo vegetal en el área de estudio.

3.5. Zonas potenciales de recarga hídrica delimitadas y categorizadas

La Figura 8 ilustra los resultados obtenidos después de aplicar la ecuación de Matus a la microcuenca San Agustín. El mapa muestra la probabilidad de recarga de aguas subterráneas, destacando áreas con diferentes niveles de recarga: muy alta (azul), alta (verde), moderada (amarillo) y baja o muy baja (rojo). Estas categorías permiten identificar las zonas con mayor potencial para recargar los acuíferos subterráneos, información esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

Las zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas se localizan principalmente en lugares con pendiente nula o casi nula y con una alta cobertura vegetal, lo que resulta coherente con las variables consideradas en el modelo: pendiente, litología, tipo de suelo, cobertura vegetal y uso del suelo, que explican la infiltración del agua y su posterior percolación hacia los acuíferos. Por el contrario, las zonas categorizadas con valores bajos de probabilidad de recarga coinciden mayoritariamente con pendientes pronunciadas, escasa cobertura vegetal y usos del suelo desfavorables.

El análisis de las variables biofísicas de la microcuenca evidencia que el potencial de infiltración se concentra mayoritariamente en las categorías de recarga moderada a baja. En términos cuantitativos, el 96,21 % de la superficie se ubica dentro de estos rangos (Tabla 3), lo que indica que, aunque la precipitación constituye una fuente importante de aporte hídrico, solo una fracción limitada logra infiltrarse en el suelo. Esta baja capacidad de infiltración restringe la recarga efectiva de los acuíferos subyacentes. En conjunto, la dinámica hidrológica de la microcuenca se

caracteriza por una recarga reducida, condicionada por las propiedades físicas del suelo y por las condiciones ambientales que regulan la percolación hacia los estratos más profundos.

Tabla 3. Potencial de recarga de aguas subterránea en la microcuenca San Agustín

Potencialidad de recarga	Área (ha)	Porcentaje %
Moderada	10399,5	55,806
Baja	7544,43	40,485
Muy Baja	380,73	2,043
Alta	206,01	1,105
Muy Alta	1,43	0,008

Además, se observó que las zonas de alta y muy alta recarga hídrica están estrechamente asociadas con las riberas de la red de drenaje, lo cual es consistente con los hallazgos de Hassaballa & Salih (2024) quienes concluyeron que estas áreas se correlacionan directamente con la presencia de arroyos y cuerpos de agua superficiales. Sin embargo, a pesar de su importancia, estas zonas representan una fracción relativamente pequeña del área total de recarga en la microcuenca. La mayor parte de la superficie está clasificada como de recarga moderada, lo que refleja las limitaciones de infiltración en áreas no adyacentes a la red hídrica (Bohn & Mastrandre, 2024)

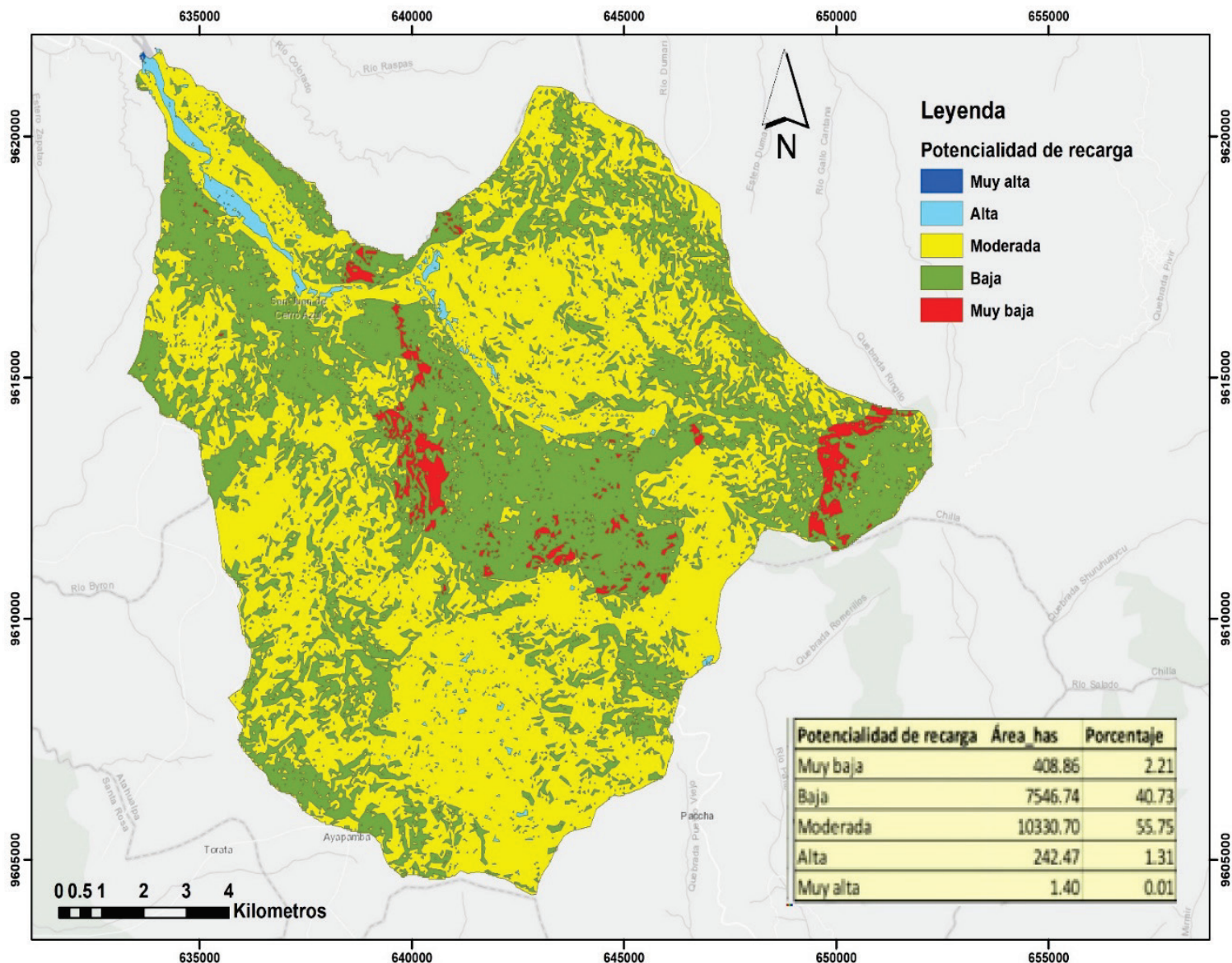


Figura 8. El mapa muestra la probabilidad de recarga de aguas subterráneas en la microcuenca San Agustín, destacando áreas con diferentes niveles de recarga: muy alta (azul), alta (verde), moderada (amarillo) y baja o muy baja (rojo). Estas categorías permiten identificar las zonas con mayor potencial para recargar los acuíferos subterráneos. Esta información es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

3.6. Evaluación del modelo aplicado y sus limitaciones

El modelo propuesto en este estudio, basado en la metodología de Matus (2007), ha demostrado ser eficaz para la identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca San Agustín, a pesar de las limitaciones inherentes al uso de datos secundarios de acceso libre. Esta estrategia ha permitido optimizar los recursos disponibles, tanto en términos de tiempo como de costos. La validez del modelo elegido se refuerza con estudios previos como el de Gurjar et al. (2019) que ofrecen una herramienta eficaz para la simulación de la recarga gestionada de acuíferos y el tratamiento y recuperación de estos, permitiendo optimizar la gestión hídrica y el transporte de contaminantes. Asimismo, se ha identificado que más del 40 % de las variables utilizadas en esta investigación se consideran relevantes en diversas partes del mundo (Martínez-Santos et al., 2021a).

En cuanto a la distribución de la lluvia, aunque es un factor clave en los procesos de recarga, no se la incluyó en la ecuación de Matus, debido a que, en este estudio, los datos de precipitación disponibles eran limitados. La ecuación se enfoca en variables como la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura vegetal, que tienen un impacto más directo sobre la infiltración en la microcuenca. No obstante, la distribución espacial de la lluvia podría complementar esta metodología en el futuro, si se cuenta con datos más detallados sobre la variabilidad temporal y espacial de la precipitación, ya que la lluvia influye directamente en la cantidad de agua disponible para infiltrarse en el suelo y recargar los acuíferos (Lara-Vásquez et al., 2021).

Aunque esta metodología se desarrolló en Nicaragua, su enfoque conceptual permite adaptarla a contextos con condiciones eco hidrológicas similares, como la cuenca evaluada en Ecuador; sin embargo, se reconoce como una limitación el uso de coeficientes externos, por lo que se sugiere replicar estudios participativos locales para su futura validación y ajuste, sobre todo si las condiciones de las cuencas varían en zonas áridas, semiáridas o húmedas.

La aplicación del modelo de Matus (2007) en la microcuenca San Agustín mostró limitaciones relacionadas con la resolución de los datos, la precisión de la información sobre suelo y cobertura vegetal, y la falta de integración de variables climáticas dinámicas, lo que puede afectar la exactitud y reproducibilidad de los resultados. También debe discutirse una posible limitación asociada al uso del suelo: en la ecuación de Matus, el uso del suelo se considera una constante, cuando en una década pueden producirse cambios significativos, incluyendo degradación de ecosistemas. Si bien el uso del suelo puede variar significativamente a lo largo del tiempo, la ausencia de información detallada sobre estos cambios impide su inclusión dinámica en el modelo.

Futuras investigaciones podrían incorporar esta variable de manera más dinámica, utilizando datos satelitales o análisis de series temporales para observar cómo las modificaciones del uso del suelo afectan la recarga hídrica a lo largo del tiempo (Loaiza-Delgado et al., 2020). Del mismo modo, la incorporación de datos más detallados y modelos climáticos predictivos, así como estudios comparativos de metodologías de mapeo de recarga hídrica, permitiría evaluar con mayor precisión la influencia de los cambios en la cobertura y el manejo del suelo en la infiltración y la disponibilidad de agua subterránea.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que las variables analizadas (pendiente, litología, tipo de suelo, uso del suelo y cobertura vegetal) constituyen insumos adecuados para la determinación del potencial de recarga hídrica mediante la ecuación de Matus (2007), aún en escenarios donde la disponibilidad de información primaria es limitada. La integración de teledetección y SIG permitió caracterizar de forma eficiente las condiciones biofísicas de la microcuenca San Agustín, demostrando la utilidad del enfoque en territorios con restricciones de acceso a datos hidrogeológicos.

El estudio destacó la importancia de analizar la influencia de la cobertura vegetal, sus características y su impacto en la recarga de aguas subterráneas. Es fundamental priorizar la reclasificación de la categoría de cobertura vegetal, ya que, de no hacerlo, podrían generarse sesgos en la delimitación de las áreas con potencial de recarga hídrica. Se recomienda realizar una revisión exhaustiva de las clasificaciones iniciales, actualizando las categorías de vegetación de acuerdo con las condiciones actuales del terreno, y considerar la validación de las imágenes para garantizar la precisión de los resultados.

En la zona de estudio se identificó que, existen 5 tipos de zonas potenciales de recarga hídrica, las cuales van desde muy alta con el menor porcentaje siendo este de 0.0008% del total de la superficie de la microcuenca, y moderada con el 55.80% del total de la superficie. Dicho esto, se determinó que la microcuenca posee mayor territorio entre las categorías de moderada y baja, abarcando el 96.22% del total del área de estudio. A través de verificación en campo se encontró que las parroquias de La Victoria, San Juan de Cerro Azul, Pasaje, Chilla, Paccha,

Ayapamba y Piñas existen zonas de recarga potencial alta y muy alta, siendo La Victoria la que destaca con las mayores áreas de recarga.

La vegetación nativa y los suelos característicos de estas áreas contribuyen significativamente a su alto potencial de recarga, especialmente en riveras de esas zonas. Sin embargo, las áreas con recarga alta y muy alta están bajo presión antropogénica, debido a la presencia de actividades agrícolas (particularmente cacaoteras), ganaderas y mineras en la parte alta de la microcuenca, las cuales están impactando considerablemente los ecosistemas y sus bosques nativos.

Finalmente, el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica podría constituir una herramienta clave para la gestión del uso y ocupación del suelo en las cuencas hidrográficas, por eso recomendamos considerar este ajuste metodológico para aplicar este modelo en aquellos sitios en donde la información sea escasa y los recursos económicos no estén a disposición.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Técnica de Machala por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación científica, especialmente por la provisión de equipos y las instalaciones necesarias.

6. Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.



7. Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

8. Declaración de uso de IA

Los autores declaran que no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial en la elaboración de este artículo.

9. Referencias

Aguilar, E., Espinoza, P., & Wiese, K. (2023). Estudio del Riesgo ante amenazas hidrometeorológicas en Nicaragua utilizando herramientas SIG: Período del 2022. *Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción Del Riesgo de Desastres REDER*, 7(2), 219–232. <https://doi.org/10.55467/REDER.V7I2.134>

Bohn, V. Y., & Mastrandre, A. (2024). Estimación y análisis espacial de la susceptibilidad hídrica en cuencas hidrográficas de llanura (Argentina). *Cuadernos Geograficos*, 63(2), 92–109. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v63i2.28403>

Boughariou, E., Allouche, N., Ben Brahim, F., Nasri, G., & Bouri, S. (2021). Delineation of groundwater potentials of Sfax region, Tunisia, using fuzzy analytical hierarchy process, frequency ratio, and weights of evidence models. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 14749–14774. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01270-x>

- Buchhorn, M., Lesiv, M., Tsendbazar, N. E., Herold, M., Bertels, L., & Smets, B. (2020). Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2. *Remote Sensing*, 12(6), 1044. <https://doi.org/10.3390/RS12061044>
- Camacho-Velasco, A., Vargas-García, C. A., Rojas-Morales, F. A., Castillo-Castelblanco, S. F., & Arguello-Fuentes, H. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. *Revista Facultad de Ingeniería*, 24(40), 17–29. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5191731>
- Campoverde-Muñoz, P., Aguilar-Salas, L., Romero-Crespo, P., Valverde-Armas, P. E., Villamar-Marazita, K., Jiménez-Oyola, S., & Garcés-León, D. (2023). Risk Assessment of Groundwater Contamination in the Gala, Tenguel, and Siete River Basins, Ponce Enriquez Mining Area—Ecuador. *Sustainability (Switzerland)*, 15(1), 403. <https://doi.org/10.3390/su15010403>
- Castaño, S., de la Losa, A., Martínez-Santos, P., Mediavilla, R., & Santisteban, J. I. (2018). Long-term effects of aquifer overdraft and recovery on groundwater quality in a Ramsar wetland: Las Tablas de Daimiel National Park, Spain. *Hydrological Processes*, 32(18), 2863–2873. <https://doi.org/10.1002/HYP.13225>
- Cleophas, F., Isidore, F., Musta, B., Mohd Ali, B. N., Mahali, M., Zahari, N. Z., & Bidin, K. (2022). Effect of soil physical properties on soil infiltration rates. *Journal of Physics: Conference Series*, 2314, 012020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2314/1/012020>
- Fatema, K., Joy, M. A. R., Amin, F. M. R., & Sarkar, S. K. (2023). Groundwater potential mapping in Jashore, Bangladesh. *Heliyon*, 9(3), e13966. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E13966>

- Gurjar, S., Ghosh, N. C., Kumar, S., Sharma, A., & Singh, S. (2019). Process Based Integrated Models for Managed Aquifer Recharge and Aquifer Storage Treatment and Recovery. *Water Resources Management, 33*, 387–400. <https://doi.org/10.1007/S11269-018-2108-0>
- Hassaballa, A., & Salih, A. (2024). Mapping Groundwater Potential (GWP) in the Al-Ahsa Oasis, Eastern Saudi Arabia Using Data-Driven GIS Techniques. *Water, 16*(2), 194. <https://doi.org/10.3390/w16020194>
- INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales - Gestión de Agua Potable y Saneamiento 2023*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios/2023/Agua_potable_alcantarillado/Documento_Metodologico_APA_2023_ACT2.pdf
- Lara-Vásquez, N. X., Cushquicullma-Colcha, D. F., Guaiña-Yungán, J. I., Espinoza, V. M., & Ati-Cutiupala, G. M. (2021). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio. *Polo Del Conocimiento, 6*(6), 122–148. <https://www.polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2745/0>

- Leipnik, M. R., Ye, X., & Gong, G. (2011). Geo-spatial technologies and policy issues in China: status and prospects. *Regional Science Policy & Practice*, 3(4), 339–356. <https://doi.org/10.1111/J.1757-7802.2011.01047.X>
- Loaiza-Delgado, F., Freire-Paredes, K., Galarza-Matamoros, I., Jaramillo-Loaiza, M., Jaramillo-Loaiza, C., Torres-Pérez, M. & Moreira-Córdova, M. (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. GADPR de Ayapamba*. <https://ayapamba.gob.ec/wp-content/uploads/2024/02/PDOT-AYAPAMBA.pdf>
- Martínez-Santos, P., Aristizábal, H. F., Díaz-Alcaide, S., & Gómez-Escalonilla, V. (2021a). Predictive mapping of aquatic ecosystems by means of support vector machines and random forests. *Journal of Hydrology*, 595. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126026>
- Martínez-Santos, P., Díaz-Alcaide, S., De la Hera-Portillo, A., & Gómez-Escalonilla, V. (2021b). Mapping groundwater-dependent ecosystems by means of multi-layer supervised classification. *Journal of Hydrology*, 603(Part A), 126873. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126873>
- Mattos, T. S., de Oliveira, P. T. S., Lucas, M. C., & Wendland, E. (2019). Groundwater Recharge Decrease Replacing Pasture by Eucalyptus Plantation. *Water*, 11(6), 1213. <https://doi.org/10.3390/w11061213>
- Morell Bayard, A. de la C., & Luna, L. G. (2024). La significación práctica de la Ecohidrología: un análisis de su potencial para el estudio de cuencas hidrográficas. *Agua y Territorio / Water and Landscape*, (24), e7127. <https://doi.org/10.17561/AT.24.7127>

Matus Silva, J. L. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3299>

Melese, T., & Belay, T. (2022). Groundwater Potential Zone Mapping Using Analytical Hierarchy Process and GIS in Muga Watershed, Abay Basin, Ethiopia. *Global Challenges*, 6(1), 2100068. <https://doi.org/10.1002/GCH2.202100068>

Puerta Tuesta, R. H., Iannacone Oliver, J. A., Reátegui Inga, M. E., Puerta Tuesta, R. H., Iannacone Oliver, J. A., & Reátegui Inga, M. E. (2023). Una revisión del uso de imágenes Sentinel-2 para el monitoreo de la cobertura boscosa a nivel global. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3). <https://doi.org/10.25100/IYC.V25I3.12708>

Ramírez, S. G., Williams, G. P., & Jones, N. L. (2022). Groundwater Level Data Imputation Using Machine Learning and Remote Earth Observations Using Inductive Bias. *Remote Sensing*, 14(21), 5509. <https://doi.org/10.3390/rs14215509>

Silva, N. D. S., Ribeiro, C. A. A. S., Barroso, W. R., Ribeiro, P. E. Á., Soares, V. P., & Silva, E. (2008). Sistema de otto-codificação modificado para endereçamento de redes hidrográficas. *Revista Árvore*, 32(5), 891–897. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000500014>