

Premio MapBiomass Bolivia – Primera Edición (2025)

Trabajo individual de investigación aplicada

**Dinámica de las zonas de recarga potencial de acuíferos en la
Cuenca del Río Rocha, Cochabamba - Bolivia:**

Análisis multitemporal con el modelo EARLI y datos de MapBiomass (1985–2024)

Alvaro Oliver Crespo Delgadillo

Msc. Hydroscience and Engineering.

Cochabamba – Bolivia

Septiembre, 2025

Contenido

1	Resumen.....	3
2	Introducción	3
2.1	Problemática hídrica y presión sobre los recursos subterráneos en Cochabamba.	4
2.2	Objetivo general y específicos.....	5
3	Método y Materiales	6
3.1	Descripción del modelo EARLI	7
3.2	Procedimiento técnico en SIG	9
3.3	Análisis detallado por variable	10
4	Resultados	28
4.1	Patrones espaciales del índice EARLI (1985–2024)	28
4.2	Cuantificación de las zonas de alta recarga ($RP \geq 3,5$) y tendencias	29
4.3	Relación con las transiciones de uso y cobertura del suelo	31
4.4	Limitaciones y fuentes de incertidumbre.....	32
5	Discusión.....	32
6	Conclusiones y recomendaciones.....	33
6.1	Conclusiones.....	33
6.2	Recomendaciones	¡Error! Marcador no definido.
6.3	Limitaciones y próximos pasos.....	35
7	Bibliografía	35

1 Resumen

La creciente presión sobre los recursos hídricos subterráneos en la Cuenca del Río Rocha (Cochabamba, Bolivia) amenaza la seguridad hídrica, los ecosistemas y la resiliencia climática de la región. En este estudio se aplicó el modelo EARLI (Enhanced Algorithm for Recharge based on Rainfall and Land-cover Inclusion), Rodríguez-Levy, et al. (2023), integrado en un entorno SIG y alimentado con datos históricos de MapBiomias Bolivia (1985–2024), para evaluar la dinámica multitemporal de las zonas de recarga potencial de acuíferos en la Cuenca del Río Rocha.

Los resultados muestran una disminución del 35,9 % en las áreas de alta recarga ($RP \geq 3,5$), especialmente marcada en el periodo 2015–2024, coincidiendo con la expansión urbana y agrícola intensiva. La combinación de información biofísica (suelo, pendiente, litología, precipitación y cobertura vegetal) con las series históricas de uso y cobertura del suelo de MapBiomias constituye una innovación metodológica para Bolivia, al permitir por primera vez vincular la pérdida de capacidad de recarga con transformaciones territoriales de cuatro décadas.

Este análisis no solo ofrece un diagnóstico espacial y temporal, sino también insumos estratégicos para la planificación territorial, la regulación de pozos, la priorización de restauración y la adaptación al cambio climático. En suma, demuestra el potencial de los datos de MapBiomias como herramienta para orientar políticas públicas y soluciones prácticas en torno a la seguridad hídrica en contextos de sobreexplotación y vulnerabilidad climática en Bolivia.

2 Introducción

La presión creciente sobre los recursos hídricos subterráneos en Bolivia —y particularmente en el departamento de Cochabamba— se ha convertido en un problema estructural con impactos ambientales, productivos y sociales. La sobreexplotación de acuíferos, la impermeabilización de zonas de recarga, el cambio intensivo del uso del suelo y el deterioro de ecosistemas reguladores del ciclo hidrológico han reducido la capacidad natural de sostener el abastecimiento hídrico a mediano y largo plazo. En el Valle Central, el Valle Alto, las regiones andinas y las áreas periurbanas, los acuíferos constituyen una reserva estratégica —muchas veces la única fuente confiable durante la estación seca—, pero en varias subcuencas la recarga natural ya no compensa la extracción, con descensos del nivel freático y, en casos, deterioro de la calidad del agua. En el área metropolitana de Cochabamba se estima que alrededor del 65 % del agua para consumo humano proviene de acuíferos, principalmente al oeste del valle (Saavedra et al., 2020).

En este contexto, resulta crítico identificar, cuantificar y proteger las zonas de recarga: territorios donde la lluvia, la escorrentía o el deshielo se infiltran y alimentan los acuíferos. Estas áreas están siendo transformadas por el cambio de uso de suelo (deforestación, expansión urbana e intensificación agrícola), lo que compromete su capacidad de infiltración y almacenamiento. Frente a la escasez de estudios hidrogeológicos detallados, el uso de información espacial consistente y periódica permite abordar el problema de manera operativa y reproducible.

El presente análisis multitemporal evalúa la dinámica de las zonas de recarga potencial de acuíferos en la Cuenca del Río Rocha (Cochabamba, Bolivia) entre 1985 y 2024 mediante el algoritmo EARLI, integrando variables biofísicas en un entorno SIG. Un eje central del estudio es el uso de las series

históricas de MapBiomas para caracterizar el cambio de uso y cobertura de la tierra y analizar su influencia directa en la pérdida, ganancia y persistencia de áreas de recarga. Con ello se busca aportar evidencia espacial y temporal para la planificación territorial, la gestión ambiental y la seguridad hídrica de la cuenca, considerando una creciente explotación del recurso hídrico y la falta de adaptación a los impactos del Cambio Climático en el país.

2.1 Problemática hídrica y presión sobre los recursos subterráneos en Cochabamba.

Cochabamba enfrenta una crisis hídrica creciente, caracterizada por una alta presión sobre sus reservas subterráneas y una marcada descompensación entre la extracción y la recarga. Esta presión se manifiesta de manera diferenciada en las subregiones del departamento:

- En el Valle Alto, existe abundante evidencia científica de sobreexplotación de los acuíferos en el Valle Alto cochabambino, CIPCA Cochabamba. (2023); AGRECOL Andes & (UMSS). (2020); Gonzales, (2019, 2016); Amaya et. Al, (2018); Duran ,2015; Heijstek, A. (2005); Urbañy, S. (1994). Municipios como Punata, Arani, Tolata, Tarata o San Benito comparten un mismo sistema acuífero y han incrementado excesivamente la perforación de pozos para riego agrícola, muchas veces sin estudios técnicos que la respalden.

Investigaciones del Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (UMSS) revelan descensos significativos del nivel freático. En el abanico aluvial de Punata (Valle Alto), la profundidad del agua subterránea aumentó unos 15 metros entre 1998 y 2011, equivalentes a un descenso promedio de ~1,15 m por año. Consecuentemente, los caudales extraídos en esa zona han disminuido más de la mitad; en Punata las norias que en la década de 1990 rendían 10–20 L/s apenas entregan ~5–10 L/s, (Duran ,2015).

Esta sobreexplotación ya se refleja en problemas visibles: pozos que se secan, manantiales naturales que desaparecen y caudales de bombeo en declive. Autoridades locales reportan que hace 20 años el agua subterránea en el Valle Alto se encontraba casi a ras de suelo, mientras que hoy hay que perforar hasta 70 metros de profundidad para encontrarla (Opinión Bolivia, 2011). La extracción intensiva sin suficiente recarga está agotando las reservas, lo que agrava la escasez de agua e incluso genera conflictos entre productores agrícolas del Valle Alto y Valle Bajo por el uso del recurso

- La Región Metropolitana, es una de las zonas más estudiadas, y entre los principales desafíos hídricos del Valle Central de Cochabamba se encuentra la creciente presión sobre los acuíferos subterráneos Kenn, R., Torrico, O., & Kracht, H.-G. (1964); Gouzes, O., & Delpont, G. (1990). alimentados principalmente por infiltración de aguas superficiales y excedentes de riego Neumann-Redlin, et.al (2001).

Ante la falta de monitoreo integral, las estimaciones de la extracción de agua subterránea requieren métodos indirectos, como la extrapolación a partir del número de pozos registrados y caudales promedio por tipo de uso. En 1994, el estudio conjunto SEMAPA/BRGM, estimó que aproximadamente 2.500 pozos en el valle extraían 49,4 millones de metros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$), incluyendo usos domésticos, agropecuarios y lecheros (SEMAPA/BRGM, 1994).

Esta cifra fue confirmada y afinada en un estudio posterior realizado por MERCADO CONSULTANTS (1996), que propuso un balance hídrico integral donde la extracción total estimada (pozos públicos y privados) también se aproximaba a los 49 millones de m³/año.

Según la base de datos actualizada de ELFEC para el año 2025, se han registrado 5.677 pozos con usos directamente relacionados a agua potable y actividades agropecuarias. Al extrapolar la cifra de 49,4 millones m³/año originalmente calculado para 2.500 pozos, se obtiene una extracción estimada actual de 112,2 millones de m³/año. Este valor representa más del doble del umbral considerado sostenible en el balance de MERCADO CONSULTANTS (66,5 millones de m³/año), lo que refuerza las preocupaciones sobre la sobreexplotación de los acuíferos del Valle Central. Si bien esta estimación es indirecta y depende de supuestos generales, ofrece una primera aproximación realista a la magnitud del problema en ausencia de monitoreo volumétrico sistemático.

La convergencia de estos factores ha generado una situación crítica: el agua subterránea se extrae a un ritmo mayor al que se recarga, y muchas zonas clave ya no infiltran debido a impermeabilización, erosión o degradación ecosistémica. Esto se traduce en escasez de agua, conflicto entre usuarios, pérdida de funciones ambientales del subsuelo y vulnerabilidad frente al cambio climático. Por otra parte, es importante destacar que la sobreexplotación de los acuíferos no solo compromete la seguridad hídrica a largo plazo, sino que también puede provocar fenómenos de subsidencia del suelo, generando hundimientos que ponen en riesgo la infraestructura, el entorno urbano y el bienestar de la población Sillerico, E et.al (2010).

La gestión sostenible del agua subterránea en Cochabamba requiere identificar, proteger y restaurar con urgencia las zonas de recarga hídrica, a partir de enfoques científicos, criterios ecológicos e instrumentos de planificación territorial. Este estudio pretende visibilizar y caracterizar la influencia del cambio en el uso de suelo sobre las zonas de recarga hídrica y hacer más evidente el grado de sobreexplotación que se viene suscitando en la ciudad. A su vez, es posible a partir de este estudio, establecer zonas de prioridad y acción de protección y posterior planificación, en conjunto con otros modelos que incluyen los diferentes escenarios de Cambio Climático.

2.2 Objetivo general y específicos

Objetivo general

- Evaluar multitemporalmente la dinámica de las zonas de recarga potencial de acuíferos en la Cuenca del Río Rocha (Cochabamba, Bolivia) durante 1985–2024 mediante la aplicación del modelo EARLI y datos de MapBiomass, para cuantificar la pérdida de zonas de recarga y variación por periodos, debido al cambio en el uso de suelo, generando insumos útiles para la gestión del recurso hídrico.

Objetivos específicos

- Estimar la recarga potencial (RP) para 1985, 1995, 2005, 2015 y 2024 según el algoritmo EARLI a partir de los factores requeridos (pendiente, suelos, geología, precipitación, FVC y uso/cobertura MapBiomass).

- Delimitar y cuantificar las zonas de alta recarga (umbral operativo $RP \geq 3.5$) para cada año.
- Evaluar los cambios por periodos decenales (1985–1995, 1995–2005, 2005–2015 y 2015–2024), cuantificando pérdidas/ganancias (km^2 , %, tasa $\text{km}^2/\text{año}$) y atribuyéndolas al cambio de uso/cobertura mediante cruce con los mapas MapBiomias.
- Identificar zonas con pérdida reciente de alta recarga para orientar acciones de conservación/restauración.

3 Método y Materiales

El análisis se basa en el modelo EARLI (Enhanced Algorithm for Recharge based on Rainfall and Land-cover Inclusion) Rodríguez-Levy, et al. (2023), una adaptación multicriterio implementada en SIG que integra seis variables biofísicas para estimar recarga potencial: pendiente (S), textura del suelo (T), litología (R), cobertura vegetal (CV), uso/cobertura del suelo (LULC) y precipitación media anual (P). Cada variable se estandariza, reclasifica y pondera para obtener un índice continuo que clasifica el territorio desde muy baja hasta muy alta probabilidad de recarga. La formulación es adecuada para contextos con información hidrogeológica limitada y permite contrastes posteriores con evidencias técnicas o participativas.

Para su implementación multitemporal (1985–2024) se emplean insumos geoespaciales mínimos: MDE ≥ 30 m (SRTM/ASTER), precipitación anual espacializada, cobertura vegetal (NDVI/FVC), uso y cobertura del suelo —con énfasis en la colección 3.0 de MapBiomias para caracterizar los cambios de LULC desde 1985 hasta 2024—, geología ($\geq 1:100.000$) y textura del suelo (p. ej., Poggio 2021, SoilGrids). Estos datos permiten cuantificar la evolución de las zonas de recarga y vincular sus pérdidas o ganancias con las transformaciones del uso del suelo.

El estudio se realiza en la Cuenca del Río Rocha, la cual se localiza en el eje metropolitano del departamento de Cochabamba, Bolivia, con una extensión aproximada de 3.500 km^2 . Limita al norte con las serranías del Tunari y al sur con las provincias del Valle Alto, comprendiendo los municipios de Cochabamba, Sacaba, Quillacollo, Vinto, Colcapirhua, Tiquipaya, Sipe Sipe, Tolata, Punata, Arbieto, entre otros.

Se trata de una cuenca endorreica de importancia estratégica para la región, donde se concentra más del 60 % de la población departamental y las principales actividades económicas e industriales. Hidrológicamente, el río Rocha es un afluente del río Caine y presenta un régimen altamente modificado por la urbanización, la canalización y la contaminación.

La figura 1, muestra la delimitación oficial de la Cuenca del Río Rocha y los principales municipios de su área de influencia, de acuerdo con el Plan Director (MMAyA, 2018).

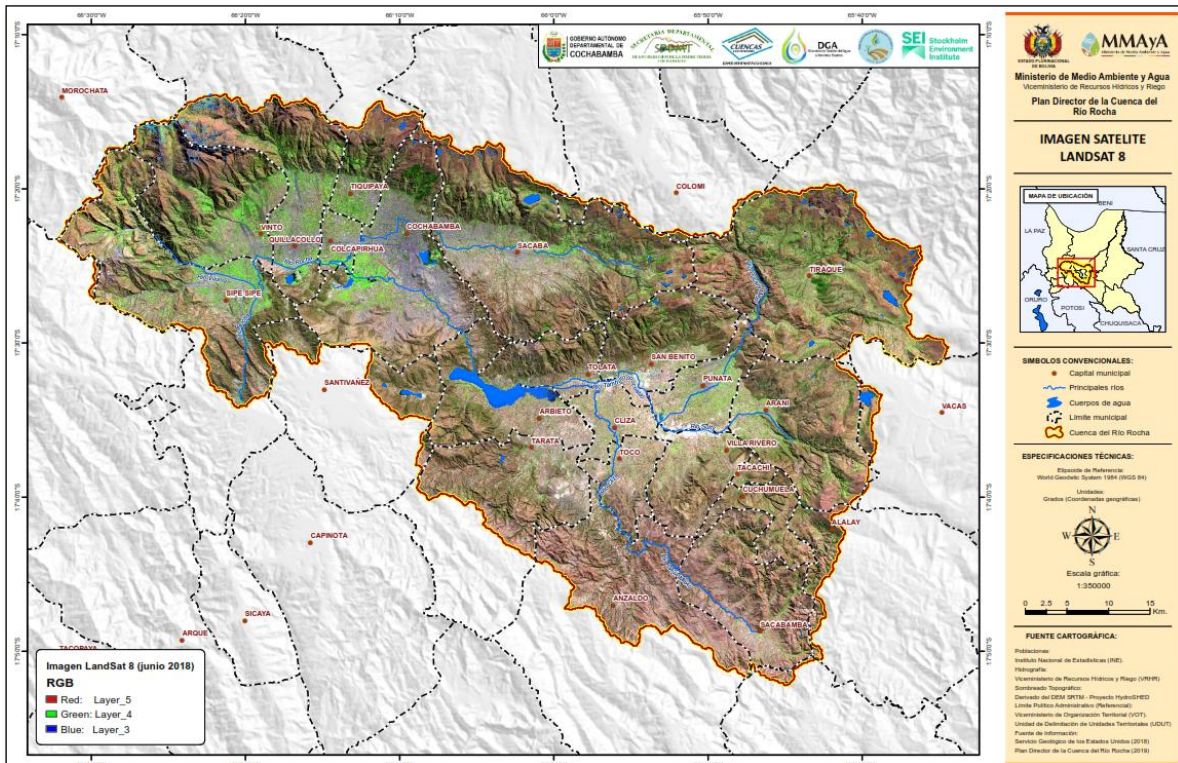


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio: Cuenca del Río Rocha (Cochabamba, Bolivia).

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego – Plan Director de la Cuenca del Río Rocha (2018)

Desde el punto de vista ambiental, la cuenca enfrenta presión sobre los recursos hídricos subterráneos, deforestación de zonas de recarga, expansión agrícola intensiva y acelerado crecimiento urbano. Estos factores la convierten en un espacio crítico para el estudio de la recarga hídrica y la gestión sostenible de los recursos naturales frente al cambio climático.

3.1 Descripción del modelo EARLI

El modelo EARLI es una metodología semicuantitativa diseñada para estimar el potencial de recarga de acuíferos en condiciones donde no se dispone de información hidrogeológica detallada. Su fortaleza radica en integrar datos biofísicos accesibles y técnicamente procesables en SIG, y permitir una evaluación espacial de zonas de recarga relativa.

3.1.1 Variables incluidas

El índice de recarga potencial (RP) se calcula mediante una fórmula ponderada que combina seis variables temáticas clave que influyen directa o indirectamente en el proceso de recarga:

<i>Código</i>	<i>Variable temática</i>	<i>Influencia esperada sobre la recarga</i>
<i>S</i>	Pendiente del terreno	Controla velocidad de escorrentía e infiltración
<i>T</i>	Textura del suelo	Controla capacidad de retención e infiltración
<i>R</i>	Litología	Determina porosidad y permeabilidad del sustrato
<i>CV</i>	Cobertura vegetal (NDVI/FVC)	Modula infiltración por evapotranspiración y protección del suelo
<i>LU</i>	Uso del suelo (LULC)	Influye por compactación, impermeabilización y degradación
<i>P</i>	Precipitación media anual	Fuente primaria de agua para la recarga

Estas variables fueron seleccionadas por su disponibilidad en fuentes secundarias de libre acceso, su relevancia hidrológica y su capacidad de ser tratadas espacialmente. Cada una es procesada en formato raster, reclasificada en una escala ordinal de 1 a 5 según su influencia en la recarga (de muy baja a muy alta), y ponderada con base en su importancia relativa.

La incorporación explícita de la variable uso y cobertura del suelo (LULC) habilita un análisis multitemporal de la recarga potencial. La serie histórica de MapBiomass, por su consistencia temática y espacial, es clave para caracterizar y cuantificar las transiciones de LULC y evaluar su incidencia sobre los procesos de infiltración y la disponibilidad de agua subterránea a escala de cuenca.

3.1.2 Principios del análisis multicriterio espacial (AMC)

3.1.2.1 Enfoque de análisis

El análisis multicriterio espacial (AMC), Malczewski (1999), se emplea para integrar factores con unidades y escalas distintas y generar una salida sintética — en este caso el índice de recarga potencial (RP). En el modelo EARLI, el AMC comprende: (i) estandarización de cada variable en una escala común 1–5 según su efecto sobre la recarga; (ii) normalización espacial (alineación y recorte de capas a 30 m en el área de estudio); (iii) asignación de pesos relativos por importancia hidrológica; y (iv) integración mediante álgebra de mapas en SIG. Para incorporar la dimensión temporal, el componente de uso y cobertura del suelo y la cobertura vegetal se derivaron de MapBiomass en cinco cortes: 1985, 1995, 2005, 2015 y 2024 (intervalos ~decenales), lo que permite evaluar cambios en la recarga asociados a transformaciones del LULC.

3.1.2.2 Cálculo del índice de recarga (RP)

El RP se obtiene por combinación lineal ponderada de seis variables biofísicas:

$$RP = (0.17 * "S") + (0.18 * "T") + (0.10 * "R") + (0.17 * "CV") + (0.16 * "LU") + (0.22 * "P")$$

Donde:

S: pendiente,

T: textura del suelo,

R: litología,

CV: cobertura vegetal,

LU: uso/cobertura del suelo (MapBiomás en 1985, 1995, 2005, 2015 y 2024)

P: precipitación media anual.

Los pesos provienen de Rodríguez-Levy, et al. (2023), validados con el método Delphi. El ráster resultante fue clasificado en cinco clases discretas, para facilitar su interpretación y aplicación en instrumentos de gestión:

<i>Valor RP</i>	<i>Clase de recarga</i>
1.00 – 1.99	Muy baja
2.00 – 2.59	Baja
2.60 – 3.49	Moderada
3.50 – 4.09	Alta
4.10 – 5.00	Muy alta

Esta clasificación puede ajustarse localmente según observaciones de campo o procesos participativos.

3.2 Procedimiento técnico en SIG

La implementación del modelo EARLI se realizó en un entorno SIG, utilizando principalmente QGIS 3.42.2 como plataforma de análisis, por su disponibilidad libre, compatibilidad con múltiples formatos y capacidad de procesamiento ráster. A continuación, se describe el procedimiento técnico seguido para la generación del índice de recarga potencial (RP), a partir de la integración de las seis variables temáticas.

3.2.1 Preprocesamiento y armonización de capas

Cada una de las variables temáticas fue obtenida a partir de fuentes secundarias, en formatos y resoluciones variables. Para garantizar la consistencia espacial y comparabilidad entre capas, se realizó un proceso de homogeneización y preprocesamiento, este paso es crucial para evitar errores de desplazamiento, incompatibilidad de píxeles o resultados distorsionados al aplicar álgebra de mapas.

Las capas temáticas utilizadas en el modelo EARLI provienen de diversas fuentes, formatos y resoluciones espaciales. Por tanto, el primer paso consiste en homogeneizar todos los insumos espaciales, asegurando su compatibilidad técnica. Este proceso comprende:

a) Re proyección geográfica

Todas las capas ráster y vectoriales deben ser convertidas a un mismo sistema de coordenadas proyectadas. Se recomienda utilizar:

Sistema de referencia:

Name: EPSG:32719 (WGS 84 / UTM 19S) - WGS 84 para el departamento de Cochabamba.

b) Recorte del área de estudio

Para evitar cargas innecesarias de datos y garantizar coherencia espacial, cada capa debe ser recortada al polígono de análisis (Cuenca del Río Rocha):

c) Homogeneización de resolución

La resolución de análisis debe definirse según el insumo de mayor detalle disponible. En este caso:

Se adoptó una resolución común de 30 metros, correspondiente a la capa SRTM.

Capas con menor resolución (ej. suelos a 250 m) deben ser reproyectadas o resampladas para ajustar al grid común.

d) Corrección de valores nulos

Celdas sin datos (NoData) deben ser identificadas y corregidas mediante:

- Relleno con valor modal en celdas vecinas (si apropiado)
- Exclusión en la máscara final de análisis.

3.3 Análisis detallado por variable

3.3.1 Pendiente del terreno (S)

a) Justificación técnica

La pendiente del terreno influye directamente en la velocidad de escorrentía y en el tiempo de residencia del agua sobre la superficie. Terrenos con pendientes suaves permiten mayor infiltración, mientras que pendientes pronunciadas favorecen el escurrimiento superficial y reducen la oportunidad de percolación hacia capas profundas. Por tanto, la pendiente es una variable clave en el análisis de recarga, especialmente en regiones montañosas e interandinas, como es el caso de la cuenca del Río Rocha.

b) Fuente de datos

Nombre del insumo: Modelo Digital de Elevación (DEM)

Fuente: SRTM – Shuttle Radar Topography Mission (NASA/USGS)

Resolución espacial: 30 metros

Formato: raster GeoTIFF

Proyección: EPSG:32719 (WGS 84 / UTM 19S) - WGS 84

El SRTM es ampliamente utilizado en estudios topográficos e hidrológicos por su cobertura global, resolución adecuada y disponibilidad gratuita. Presenta buena precisión relativa para regiones montañosas y valles, *Farr et al., 2007; USGS, 2024*.

c) Tabla de clasificación

La pendiente fue reclasificada en cinco categorías, asignando valores de 1 a 5 según su influencia relativa sobre la recarga:

<i>Rango de pendiente (°)</i>	<i>Valor EARLI</i>	<i>Influencia esperada</i>
0 – 6°	5	Muy alta recarga
6 – 15°	4	Alta recarga
15 – 45°	3	Moderada recarga
45 – 65°	2	Baja recarga
> 65°	1	Muy baja recarga

Fuente: Rodríguez-Levy et al., 2023; adaptado del caso Virvini.

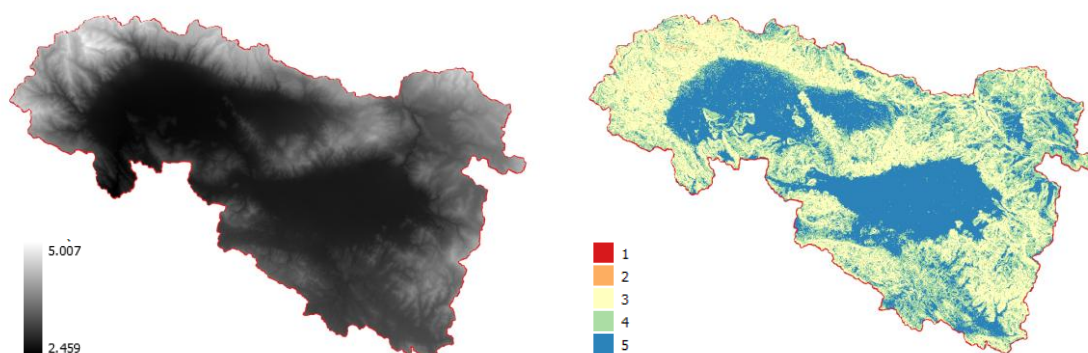


Figura 2. Pendiente en la Cuenca del Río Rocha. (a) Modelo digital de elevación SRTM. (b) Mapa de pendiente reclasificada según el modelo EARLI.

Fuente: Elaboración propia con datos SRTM 30 m (NASA/USGS); clasificación según Rodríguez-Levy et al. (2023).

3.3.2 Textura del suelo (T)

a) Justificación técnica

La textura del suelo es uno de los factores más relevantes para la recarga hídrica, ya que determina su capacidad de infiltración, retención de agua y percolación vertical. Suelos con mayor proporción de arena presentan alta porosidad y permiten una infiltración rápida, mientras que los suelos arcillosos poseen baja permeabilidad y favorecen la escorrentía superficial. Además, la textura regula la cantidad de agua que puede alcanzar la zona vadosa y, eventualmente, el acuífero, *Hillel, 1982; FAO, 2006; Fetter, 2001; Hengl, T. (2018).*

b) Fuente de datos

Nombre del insumo: Soil Texture Class (30 cm depth)

Fuente: OpenGeoHub (SoilGrids v2.0), Poggio et. Al, 2021.

Institución responsable: ISRIC – World Soil Information

Resolución espacial: 250 m

Formato: raster Geo TIFF

Sistema de clasificación original: USDA Soil Texture Triangle

Este insumo contiene la distribución porcentual de arena, limo y arcilla a distintas profundidades. Para este estudio se utilizó la capa correspondiente a los 30 cm de profundidad, Banda 3 del raster, que representa la capa superficial activa en procesos de infiltración.

c) Procedimiento de procesamiento

Descarga de la capa desde el portal de SoilGrids (formato GeoTIFF).

Proyección: EPSG:32719 (WGS 84 / UTM 19S) - WGS 84

Recorte al área de estudio departamental.

Conversión a clases texturales según los porcentajes de arcilla, limo y arena, utilizando reglas del triángulo textural USDA.

Reclasificación temática en QGIS en una escala de 1 a 5, según el siguiente criterio:

d) Tabla de clasificación

<i>Textura</i>	<i>Valor</i>	<i>Clase</i>	<i>Justificación técnica</i>
<i>Cl</i>	1	Arcilla	Alta capacidad de retención de agua pero muy baja permeabilidad; el agua no infiltra.
<i>SiCl</i>	1	Arcilla limosa	Estructura densa y compacta; baja infiltración por dominancia de arcilla.
<i>SaCl</i>	1-2	Arcilla arenosa	Mejora ligera en infiltración por arena, pero aún limitada por la presencia de arcilla.
<i>CIlo</i>	2	Franco arcilloso	Mezcla algo más equilibrada; infiltración moderadamente baja por contenido de arcilla.
<i>SiCIlo</i>	2	Franco arcilloso limoso	Mejora la estructura y aireación, pero aún con limitación por la arcilla fina.
<i>SaCIlo</i>	3	Franco arcilloso arenoso	Buena mezcla; mejor infiltración gracias a la arena, aunque con algo de retención.
<i>Lo</i>	3	Franco	Textura equilibrada entre arena, limo y arcilla; buena infiltración y retención.
<i>SiLo</i>	3	Franco limoso	Buena retención y estructura, aunque el limo puede reducir la velocidad de infiltración.

SaLo	4	Franco arenoso	Mayor proporción de arena mejora significativamente la infiltración.
Si	2-3	Limo	Alta retención de agua, pero infiltración limitada; depende de compactación.
LoSa	4-5	Arena franca	Muy buena infiltración; buena estructura para recarga sin excesiva escorrentía.
Sa	5	Arena	Altísima infiltración por porosidad y baja retención; ideal para recarga subterránea.

Fuente: Clasificación utilizada en Rodríguez-Levy et al., 2023, adaptada a partir de USDA NRCS y FAO, 2006.

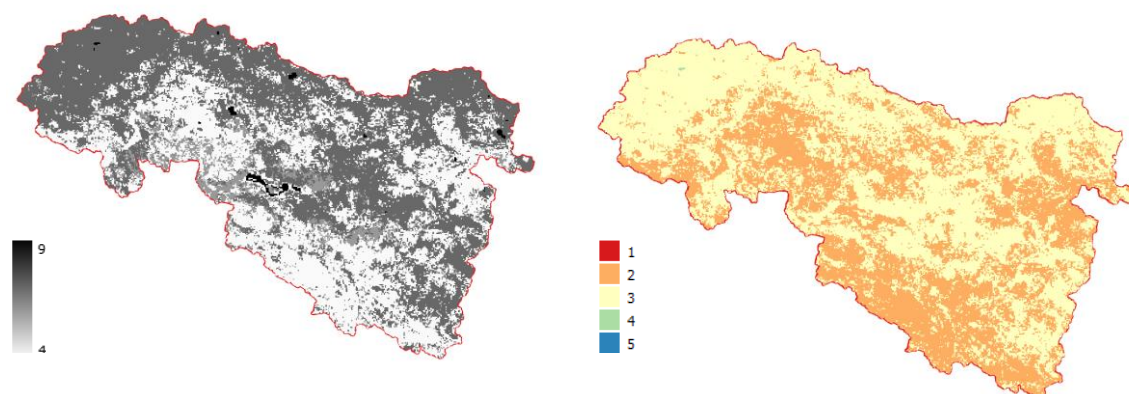


Figura 3. Textura de Suelo en la Cuenca del Río Rocha. (a) Mapa de textura Original SoilGrids. (b) Mapa de textura de suelo reclasificado según el modelo EARLI.

Fuente: Elaboración propia con SoilGrids v2.0 (ISRIC – World Soil Information; Poggio et al., 2021).

3.3.3 Litología (R)

La litología —es decir, la naturaleza y composición de las formaciones geológicas— determina de forma directa la capacidad de almacenamiento, conducción e infiltración de agua en el subsuelo. Algunas litologías, como depósitos aluviales no consolidados, permiten una percolación eficiente del agua hacia los acuíferos debido a su alta porosidad y permeabilidad. En cambio, rocas ígneas compactas o formaciones arcillosas actúan como barreras o zonas de recarga muy limitada.

La litología también influye en la presencia de fracturas y fisuras secundarias, que pueden actuar como vías preferenciales de recarga, especialmente en ambientes montañosos o volcánicos, *Custodio & Llamas, 1983; Fetter, 2001; Rodríguez-Levy et al., 2023.*

b) Fuente de datos

Nombre del insumo: Mapa geológico departamental

Fuentes utilizadas:

- Plan de Ordenamiento Territorial de Cochabamba (PDOT, 2014)
- Plan director de la Cuenca del Río Rocha (MMAyA, 2018)
- Mapas geológicos del Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL), SERGEOTECMIN. (2006).

Escala de referencia: 1:100.000 a 1:250.000

Formato original: vectorial (shapefile), polígonos por tipo de formación

c) Procedimiento de procesamiento

Importación del shapefile geológico al entorno QGIS.

Proyección: EPSG:32719 (WGS 84 / UTM 19S) - WGS 84

Recorte del área de estudio mediante máscara de departamento o municipio.

Asignación de categorías litológicas según su capacidad de infiltración estimada y reclasificación en escala EARLI (1 a 5) según la siguiente tabla:

d) Tabla de clasificación

<i>Secuencia</i>	<i>Sistema</i>	<i>Serie</i>	Tipo de Depósitos o rocas	Características Físicas	Características Hidrogeológicas	COD_PDC	Valor EARLI
<i>Cenozoico</i>	<i>Cuaternario</i>	<i>Holoceno</i>	Depósitos Coluvio-aluviales	Bloques angulosos de tamaño variable con matriz arcillo-arenosa formando acumulaciones caóticas de bastante espesor que cubren amplias superficies en los flancos de la cordillera.	Tienen buena permeabilidad y alimentan pequeñas vertientes con agua de muy baja salinidad.	Qc, Qa, Qca, Qcb, Cdc, Cta, Dca, Cdca, Qaa, Qta	5
			Depósitos Morrénicos	Bloques y pedrones con matriz arcillo-arenosa acumulados caóticamente.	Permeabilidad variable. Poca importancia por su escasa extensión.	Qm, Qmo, Qs, Qd, Qrg, Qd, Qg, Crg, Cda, C d, Cdcafl	3

Terciario	Pleistoceno	Depósitos fluviales	Materiales de grano grueso formados por cantos rodados, pedrones, gravas, con contenido de arenas y arcillas. Formando abanicos aluviales y depósitos de cauce de río.	Permeabilidad que varía de regular a muy buena. Constituyen la zona de recarga de las cuencas. Los pozos pueden producir de 60 a 80 l/s de agua de excelente calidad.	Qta, Qcf, Qt	4
		Depósitos FluvioLacustres	Materiales que comparten características entre los de origen aluvial y lacustre. Arenas finas y arcillosas con contenido de arenas y gravas de grano medio a fino. Textura sumamente heterogénea.	Permeabilidad de moderada a mala, según el contenido de arcilla. Los pozos producen hasta 30L/s de agua, disminuyendo su caudal hasta 1 L/s. A medida que se acercan a la parte central de la cuenca	Qfl, Qda	2
		Depósitos Lacustres	Materiales finos constituidos por arcillas y arcillas arenosas con intercalaciones de horizontes de turba de color azul-oscuro con restos de plantas y animales.	Permeabilidad mala a muy mala. Se presentan pequeñas vertientes en su contacto superior.	Qg, Qgl, Cdg, L, Cdl	1
	Paleoceno	Formación Morochata	Conglomerados de color rojo-violáceo mal seleccionados, con clastos de hasta 0,20 m de diámetro, presentan esporádicamente horizontes delgados de arcilla. En la base se encuentra un conglomerado polimigtico con matriz areno - arcilloso de color rojo.	Afloramiento de reducida extensión permeabilidad moderada a baja	-	
	Formación Sacaba	Arenas y arcillas gris verdosa	Son arenas y arcillas gris verdosas con niveles de tobas. En forma reducida algunos afloramientos están ubicados al sur del aeropuerto de Cochabamba.	Baja a moderada, dependiendo de la proporción de arcilla	Tsb	2

Mesozoico

Cretacico	Maestrichtiano	Daniano	Arcillas Margas Areniscas Calcareas	Arcillas y Margas con vetillas de yeso fibroso, de color marrón - violáceo a marrón - verdoso. Areniscas calcareas de color amarillo - rojizo, de grano medio a fino, arcillas y margas multicolores	Escasa importancia hidrológica por la reducida extensión de los afloramientos	Tsl, Crcac	2
	Senoniano	Maestrichtiano	Margas y Calizas Calizas Oolíticas Calizas Compactas Areniscas Calcareas	Margas multicolores intercaladas con calizas de color amarillo - grisaseo. Calizas oolíticas fosilíferas de color gris - blanquesino, duras, compactas y calizas muy duras de color gris - oscuro. Areniscas calcareas de color marrón - amarillento grano medio a fino	Permeabilidad primaria baja, se incrementa localmente por efectos secundarios de disolución	Kem	2
	Senoniano	Campaniano	Areniscas ferruginosas, arcillas rojas, tobas, yeso	Rocas sedimentarias continentales depositadas en ambientes fluviales, lacustres y aluviales. Sus principales características físicas incluyen una coloración rojiza o violácea, producto de la oxidación del hierro en condiciones semiáridas, y estructuras sedimentarias como estratificación horizontal o entrecruzada, gradación de granulometría desde conglomerados basales hasta capas más finas, presencia de vetillas de yeso en ambientes lacustres, y huellas fósiles, especialmente en las areniscas más compactas.	Permeabilidad baja, predominan arcillas y lutitas (barrera natural). Las areniscas no siempre están bien conectadas ni sueltas. Su estructura laminar limita el flujo vertical. Solo en algunos sectores con fracturas, areniscas gruesas poco cementadas o mayor espesor arenoso continuo puede alcanzar permeabilidad moderada, con importancia hidrogeológica local.	Kpu	2

Paleozoico

<i>Devonico</i>				
Lochkoviano – Praguiano Formación Huamampampa Areniscas y Lutitas	En el núcleo de algunos sinclinales, descansando concordantemente sobre la formación Icla, se encuentra el Huamampampa, compuesto por areniscas blanquecinas, en partes con estratificación cruzada intercaladas con bancos delgados de lutitas.	Moderada, especialmente en niveles de areniscas bien desarrolladas o fracturadas	Dhu, Olia	3
Eifelense – Givetense Formación Icla Lutitas y limolitas	En la base se presentan lutitas en parte arenosas y limolitas gris oscuras; luego siguen lutitas de color gris verdusco en superficie fresca y gris amarillento en alterada, intercaladas por unos pocos bancos delgados de areniscas de grano fino a medio del mismo color.	Baja, debido al predominio de lutitas compactas y la escasa presencia de areniscas	Dic, Dev	2
Frasniense Formación Santa Rosa Areniscas	Compuesta por areniscas bien estratificadas, de color gris blanquecino, intercaladas con escasos niveles de lutitas. Son frecuentes los horizontes con marcas de oleaje y estratificación cruzada.	Moderada, especialmente en los niveles arenosos si no están fuertemente cementados	Dsr, Oa	3

Silurico	Lochkoviano Pridoliano	Formación Tarabuco	<p>Lutitas Limolitas y Areniscas grises</p> <p>Está compuesta por una alternancia de lutitas y limolitas oscuras finamente laminadas, intercaladas con capas decimétricas de areniscas grises de grano fino a medio. Estas rocas presentan estratificación bien marcada, estructuras sedimentarias como laminación paralela y cruzada, y zonas de cizalla. Su composición refleja un ambiente de depósito marino transicional (deltaico-costero), con características físicas que indican baja competencia mecánica y moderada fracturación en los niveles arenosos.</p>	<p>Permeabilidad baja a moderada, con capacidad acuífera muy limitada. El agua subterránea puede circular solo localmente en bancos de arenisca fracturados o mal cementados, mientras que el resto de la formación actúa como barrera o sello debido al predominio de materiales pelíticos compactos (lutitas y limolitas)</p>	Si-Tb	2
	Luddloviano	Formación Kirusillas	<p>Lutitas y limolitas</p> <p>La Formación Kirusillas está compuesta principalmente por limolitas y lutitas finamente laminadas de tonos oscuros, con capas subordinadas de areniscas, lo que indica un dominio pelítico en su litología. Presenta estructuras sedimentarias como marcas de oleaje, tempestivas y bioturbación, lo que sugiere un ambiente de depósito marino somero. Su escasa competencia mecánica a nivel regional ha llevado a que actúe como superficie de despegue tectónica en algunos sectores.</p>	<p>Unidad de baja permeabilidad, debido al predominio de rocas perlíticas compactas (lutitas y limolitas), con porosidad muy baja y poco conectada. Los escasos niveles de arenisca no son lo suficientemente continuos ni frecuentes como para generar acuíferos importantes, por lo que la circulación de agua subterránea en esta unidad es muy limitada</p>	Si-Ki	-

	Gotlandico	Formación Uncia	Lutitas	Lutitas friables, predominantemente de color gris-oscuro en superficie fresca y marrón con tonos rojizos en alterada, exfoliación con alto contenido de mica en los planos de estratificación.	Debido a sus características litológicas, la permeabilidad de esta formación es muy baja	Sun	1
		Formación Cancañiri	Clay Grits y Cuarцитas	Sedimentos glacial - marinos. "Claygrits" de color gris pardusco en superficie fresca y marrón - rojiza en alterada. Intercalado esporádicamente con areniscas - cuarcitas de color gris - oscuro	Por su pequeña extensión, hidrogeológicamente carece de importancia.	Qrg, Scc	2
Ordovícico	Caradociano	Formación Capinota	Lutitas y limolitas	Se presenta en la base del Ordovícico que aflora en la zona y se compone de lutitas de color gris oscuro intercaladas con limolitas gris verdosas y hacia el tope con delgados bancos de areniscas que contienen geódas fosilíferas.	Muy baja, por la dominancia de lutitas compactas	Ocp, Cl	1
		Formación San Benito	Areniscas Cuarцитas	Areniscas cuarcíticas micáceas de color gris-blancuecino con tonos oscuros, de grano fino a medio, en bancos de 0,20 a 0,80 m. Areniscas cuarcíticas de color blanco con tono rojizo, estratificadas en bancos de 0,80 a 1,5m.	El sistema de fisuras que presenta esta formación, le confiere una permeabilidad secundaria, que permite el alumbramiento de pequeñas vertientes en su parte basal.	Osб, Oac, Oc, Oaic	2
		Formación Anzaldo	Limolitas Gris y Areniscas	Ocupa la mayor parte de la cordillera al norte, oeste y sur del valle. Está conformada por limolitas gris verduscas intercaladas con areniscas duras y compactas del mismo color que se alteran a	Permeabilidad (limolitas): Muy baja, por su textura fina y compactación Permeabilidad (areniscas): Baja a moderada, especialmente si hay fracturación	Oan, Taar	2

			marrón claro, de grano medio a grueso.			
	Formación Cuchu - Punata	Limolitas y Areniscas y Limolitas y Lutitas	Limolitas gris - verdosas, intercaladas con areniscas del mismo color, de grano medio a grueso, duras y compactas, de aspecto sacaroidal. Se alternan esporádicamente delgadas capas de areniscas cuarcíticas, micáceas, de grano fino a medio, de color blanquecino. Intercalación de Lutitas marrones con Limolitas gris - verdosas	Por sus características litológicas, esta formación tiene muy baja permeabilidad	OCu, Ol, Oail, Cail	1

Fuente: Adaptado de Rodríguez-Levy et al., 2023; Neumann-Redlin, H., Tunnell, G., & Scholz, D. (2001); Custodio & Llamas, 1983.

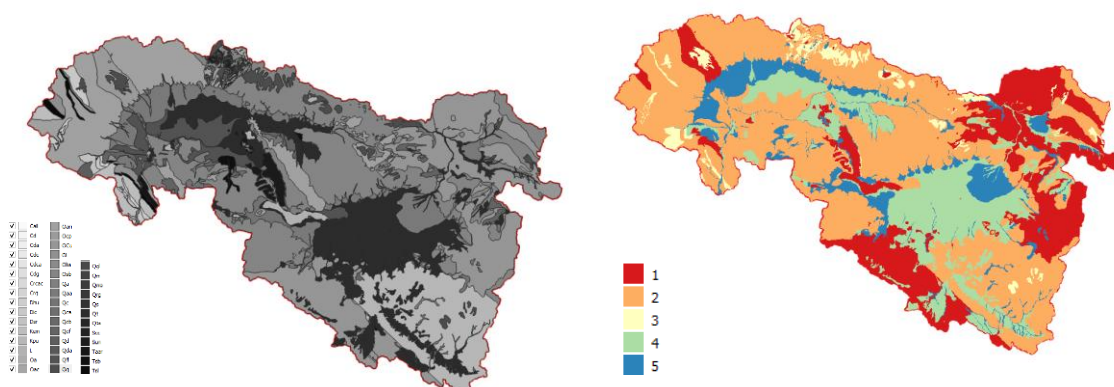


Figura 4. Litología en la Cuenca del Río Rocha. (a) Mapa Litológico original. (b) Mapa litológico reclasificado según el modelo EARLI.

Fuente: Elaboración propia con PDOT Cochabamba (2014), Plan Director MMAYa (2018) y mapas geológicos GEOBOL/SERGEOTECMIN

3.3.4 Cobertura vegetal (CV – NDVI/FVC)

a) Justificación técnica

La cobertura vegetal influye en la recarga de acuíferos por varias razones:

- Regula la infiltración mediante la protección del suelo frente a la erosión.
- Reduce la escorrentía superficial y aumenta el tiempo de residencia del agua sobre la superficie.
- Facilita la percolación del agua en suelos con raíces profundas o estructuras porosas.
- Puede aumentar o disminuir la evapotranspiración, dependiendo del tipo de cobertura. Estudios recientes han demostrado que una cobertura vegetal intermedia o alta, compuesta por especies nativas o sistemas agroforestales, favorece la recarga en mayor medida que coberturas densas de especies exóticas (como *Eucalyptus* spp.) o áreas degradadas, *Ilstedt et al., 2016; Scanlon et al., 2002; Rodríguez-Levy et al., 2023*.

b) Fuente de datos

Nombre del insumo base: NDVI – Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Sensor utilizado: Sentinel-2 (MSI)

Resolución espacial: 10 metros

Fuente de descarga: Plataforma Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>)

Proyección: EPSG:32719 (WGS 84 / UTM 19S) - WGS 84

Fecha de imagen utilizada: Temporada seca 2024 (sin cobertura nubosa)

Preprocesamiento: Corrección atmosférica aplicada

c) Procedimiento de procesamiento

Posterior a la descarga de imagen Sentinel-2 con baja cobertura nubosa se realizó el cálculo del NDVI con la fórmula:

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$$

B8: infrarrojo cercano (NIR)

B4: rojo (Red)

Posteriormente se realizó la conversión a Fracción de Cobertura Vegetal (FVC) mediante el método de Carlson y Ripley (1997):

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2$$

$NDVI_{\min}$ = valor típico de suelo desnudo (~0.2)

$NDVI_{\max}$ = valor típico de cobertura densa (~0.85)

La clasificación temática de la capa FVC en cinco categorías ordinales se realizó utilizando la siguiente tabla.

d) Tabla de clasificación

<i>Fracción de cobertura vegetal (FVC)</i>	<i>Valor EARLI</i>	<i>Influencia esperada en recarga</i>
> 80 %	5	Muy alta
70 – 80 %	4	Alta
50 – 70 %	3	Moderada
30 – 50 %	2	Baja
< 30 %	1	Muy baja

Fuente: Carlson & Ripley, 1997; adaptado por Rodríguez-Levy et al., 2023.

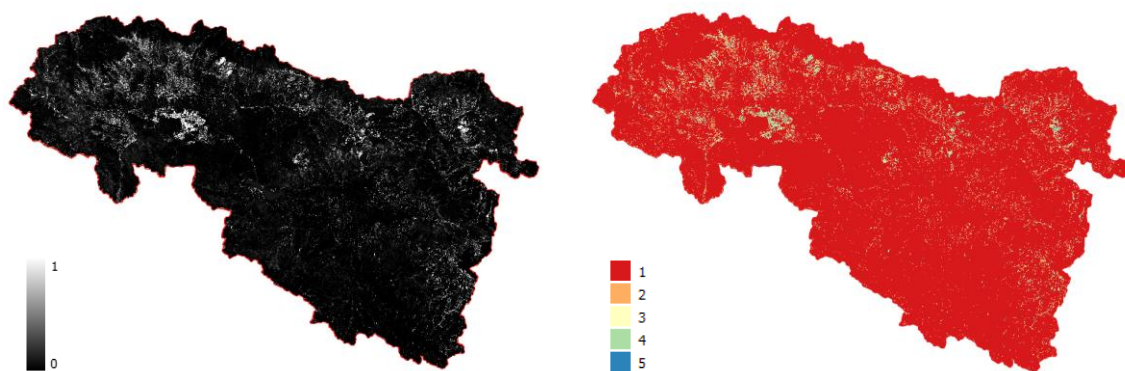


Figura 5. Fracción de cobertura Vegetal (FVC) en la Cuenca del Río Rocha. (a) FVC derivada del NDVI obtenido a partir de una imagen Sentinel (b) Mapa FVC reclasificado según el modelo EARLI.

Fuente: Elaboración propia con Sentinel-2 (Copernicus Open Access Hub) y método Carlson & Ripley (1997)

3.3.5 Uso y Cobertura de Suelo (LULC)

a) Justificación técnica

El uso del suelo es un factor determinante en la recarga de acuíferos, ya que afecta directamente la permeabilidad superficial, el grado de compactación, la presencia de coberturas artificiales o impermeables y la capacidad del ecosistema para permitir la infiltración.

Algunos usos del suelo, como los bosques nativos o las coberturas naturales, favorecen la recarga al mantener la estructura del suelo, reducir la escorrentía y mejorar la infiltración. En cambio, las áreas urbanizadas, las plantaciones exóticas (ej. *Eucalyptus* spp.) o los suelos intensamente cultivados suelen reducir drásticamente la infiltración por compactación, sellado superficial y aumento de la escorrentía, *Iltstedt et al., 2016; Scanlon et al., 2002; Rodríguez-Levy et al., 2023.*

b) Fuente de datos

Nombre del insumo: Uso y cobertura del suelo – MapBiomias Bolivia

Colección utilizada: MapBiomias Bolivia, Colección 3.0 – Años 1985, 1995, 2005, 2015 y 2024

Fuente oficial: <https://mapbiomas.org>

Resolución espacial: 30 metros

Formato: raster GeoTIFF categórico

Proyección: EPSG:32719 (WGS 84 / UTM 19S) - WGS 84

Se realizó una adaptación a las diferentes categorías de uso y cobertura de suelo de MapBiomias, con base a los estudios realizados por *Rodríguez-Levy et al., 2023*.

c) Tabla de clasificación

<i>Clase MapBiomias</i>	<i>Valor EARLI</i>	<i>Justificación técnica</i>
<i>Bosque (ID 3)</i>	5	Cobertura continua, suelos poco alterados, buena infiltración.
<i>Otra formación no forestal (ID 13)</i>	3	Variabilidad alta, depende del contexto.
<i>Pastura (ID 15)</i>	2	Puede permitir infiltración si el pastoreo es moderado a bajo.
<i>Agricultura (ID 18)</i>	2	Suelo perturbado, labranza frecuente, poca retención hídrica.
<i>Mosaico de usos (ID 21)</i>	2	Cobertura heterogénea; baja infiltración, incluye ganadería y pantanales
<i>Infraestructura urbana (ID 24)</i>	1	Impermeabilización total.
<i>Otras áreas antrópicas sin vegetación (ID 25)</i>	1	Compactación, suelo degradado o expuesto.
<i>Cuerpo de agua (ID 26)</i>	2	No infiltran directamente, pero alimentan recarga lateral.
<i>Playa / duna / arena (ID 23)</i>	2	Zonas heterogéneas que según descripción detallada de Mapbiomas, se asocian a zonas de baja infiltrabilidad.
<i>Río / lago (ID 33)</i>	3	Potencial de recarga lateral desde el cauce.
<i>Afloramiento rocoso (ID 29)</i>	1	Baja porosidad; escasa infiltración.
<i>Otra área natural sin vegetación (ID 68)</i>	2	Rocas, suelo desnudo o erosionado.
<i>Matorral (ID 66)</i>	3	
<i>Pajonal/arbustal andino (ID 81)</i>	2	Dependiendo del manejo ganadero, pueden ser zonas de recarga eficiente.
<i>Pajonal/arbustal andino (ID 82)</i>	5	Zonas clave para recarga y almacenamiento temporal (FAO, 2016).

Fuente: Adaptación a partir de MapBiomias Bolivia (2024) y clasificación de Rodríguez-Levy et al., 2023.

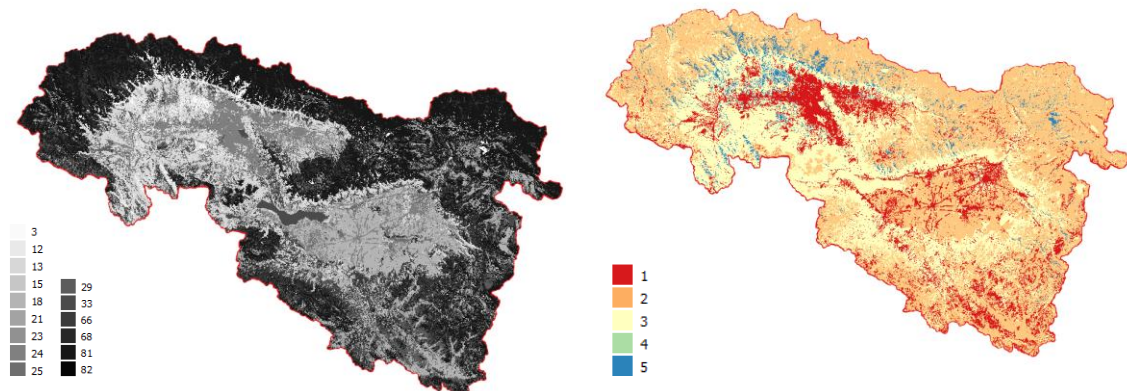


Figura 6. Uso y Cobertura de suelo (LULC) en la Cuenca del Río Rocha 1985. (a) Mapa de Uso y Cobertura de suelo MapBiomas 1985 (b) Mapa de uso y cobertura de suelo reclasificado según el modelo EARLI.

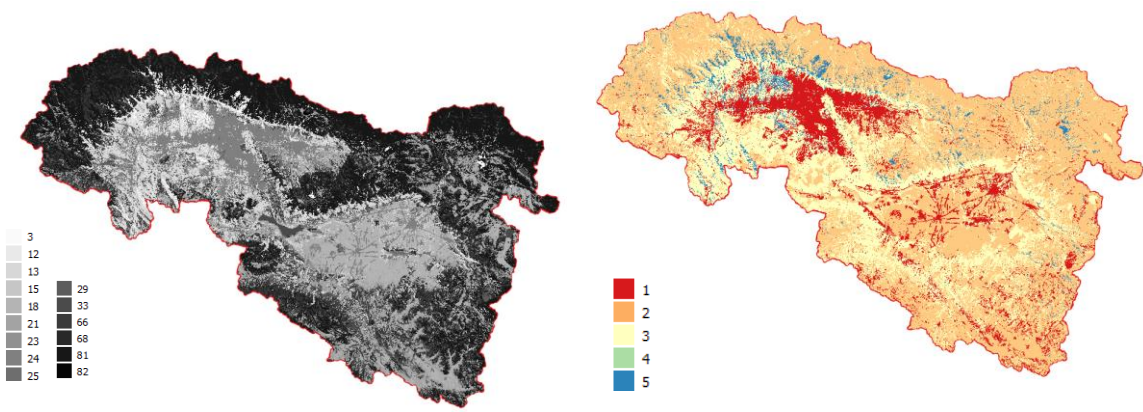


Figura 7. Uso y Cobertura de suelo (LULC) en la Cuenca del Río Rocha 1995. (a) Mapa de Uso y Cobertura de suelo MapBiomas 1995 (b) Mapa de uso y cobertura de suelo reclasificado según el modelo EARLI.

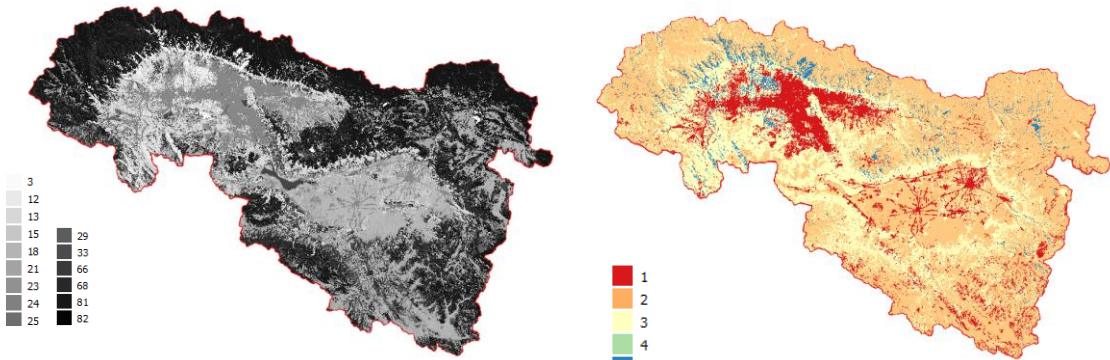


Figura 8. Uso y Cobertura de suelo (LULC) en la Cuenca del Río Rocha 2005. (a) Mapa de Uso y Cobertura de suelo MapBiomás 2005 (b) Mapa de uso y cobertura de suelo reclasificado según el modelo EARLI.

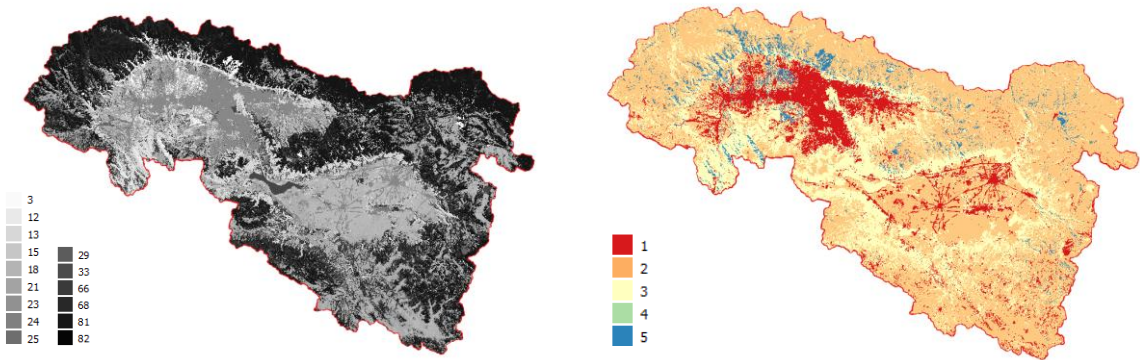


Figura 9. Uso y Cobertura de suelo (LULC) en la Cuenca del Río Rocha 2015. (a) Mapa de Uso y Cobertura de suelo MapBiomás 2015 (b) Mapa de uso y cobertura de suelo reclasificado según el modelo EARLI.

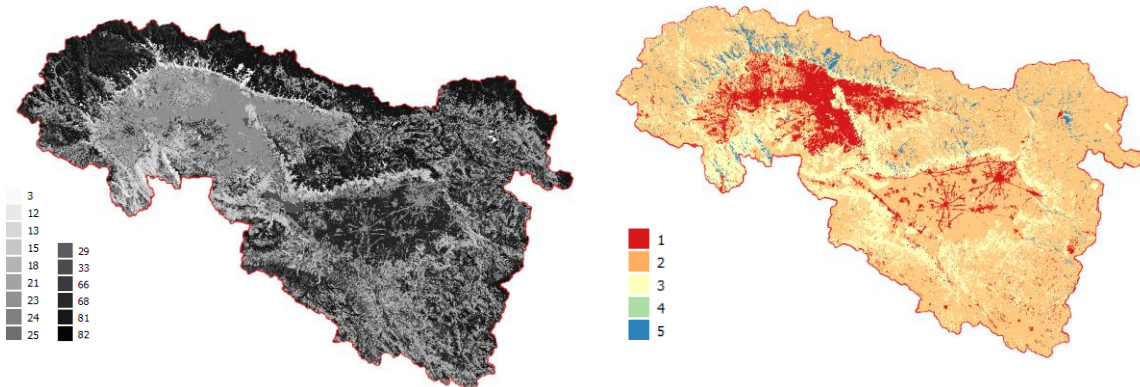


Figura 10. Uso y Cobertura de suelo (LULC) en la Cuenca del Río Rocha 2024. (a) Mapa de Uso y Cobertura de suelo MapBiomias 2024 (b) Mapa de uso y cobertura de suelo reclasificado según el modelo EARLI.

Fuente: Figuras 6–10, Elaboración propia con MapBiomias Bolivia, Colección 3.0 (1985–2024); reclasificación según Rodríguez-Levy et al. (2023).

3.3.6 Precipitación (P)

La precipitación es el insumo hidrológico primario para los procesos de recarga de acuíferos, especialmente en sistemas no confinados. Su comportamiento espacial y temporal determina la cantidad de agua disponible para infiltración, aunque su efectividad depende de factores complementarios como textura del suelo, cobertura vegetal, pendiente y litología.

En el modelo EARLI, la precipitación es incorporada como una variable climática continua, representada mediante una superficie interpolada a partir de registros de estaciones pluviométricas. Su inclusión en el índice RP permite distinguir áreas con mayor disponibilidad hídrica y evaluar la interacción entre clima y condiciones biofísicas del terreno.

3.3.7 Interpolación y tratamiento espacial

a) Fuente de datos

Base utilizada: Estaciones de precipitación DECADE, Andrade, et. Al. (2018).

Periodo de referencia: 1970–2018

Cobertura espacial: 81 estaciones distribuidas en el departamento

Formato original: puntos vectoriales (shapefile), con valores medios anuales (mm/año)

Este conjunto de datos ofrece una cobertura razonable a nivel departamental y permitió capturar patrones altitudinales y zonales consistentes con la topografía y las unidades ecológicas de Cochabamba.

b) Interpolación IDW

El mapa de precipitación se generó mediante Interpolación Inversa Ponderada por la Distancia (IDW) Shepard (1968), que estima cada celda como un promedio ponderado de las estaciones más cercanas (las más próximas tienen mayor influencia que las lejanas). Para ello se utilizaron estaciones pluviométricas ubicadas en y alrededor de la cuenca del río Rocha, provenientes de DECADE, Andrade, et. Al. (2018) (series previamente revisadas y depuradas). Con el fin de representar el régimen climático medio, la variable de entrada fue el promedio multianual de precipitación de cada estación.

Previo al cálculo se trabajó en CRS proyectado (UTM) para medir distancias en metros y se recortó el resultado al límite de la cuenca. La IDW se configuró con parámetros habituales (potencia y vecindad) para evitar artefactos y mantener gradientes realistas; posteriormente se verificó la

coherencia espacial del campo interpolado con el relieve local. El producto final es una superficie continua de precipitación media anual que alimenta el modelo EARLI.

c) Clasificación del mapa de precipitación

La superficie interpolada de precipitación media anual (mm/año) fue clasificada temáticamente en función de su influencia potencial sobre la recarga, considerando la gran variabilidad pluviométrica del departamento de Cochabamba.

Dado que el modelo se aplica sobre un territorio con zonas áridas y subhúmedas se utilizó una clasificación diferenciada. A continuación, se presenta la reclasificación aplicada para la zona altoandina, cuyos valores de precipitación se concentran principalmente entre 400 y 1000 mm/año.

Altitud: > 2.500 - 4500 m s.n.m.
 Precipitación típica: 400 – 1000 mm/año

Rango y reclasificación aplicada:

<i>Rango (mm/año)</i>	<i>Valor EARLI</i>
≤ 450	2
450 – 499	3
500 – 550	3.5
551 – 600	4
601 – 950	5

Este rango refleja la necesidad de capturar gradientes sutiles en zonas de baja precipitación, donde pequeñas diferencias de aporte pueden marcar la diferencia entre zonas activas o marginales de recarga.

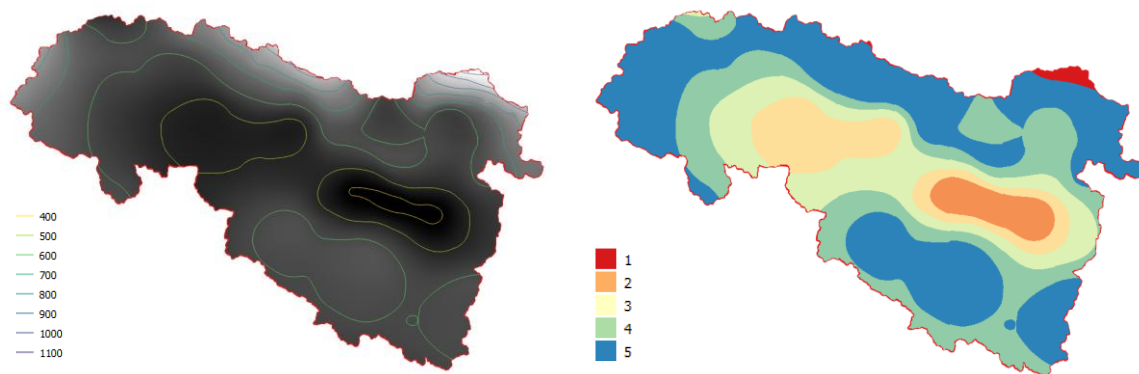


Figura 11. Precipitación media anual en la Cuenca del Río Rocha (promedio multianual).
 (a) IDW (DECADE). (b) Precipitación reclasificada (EARLI).

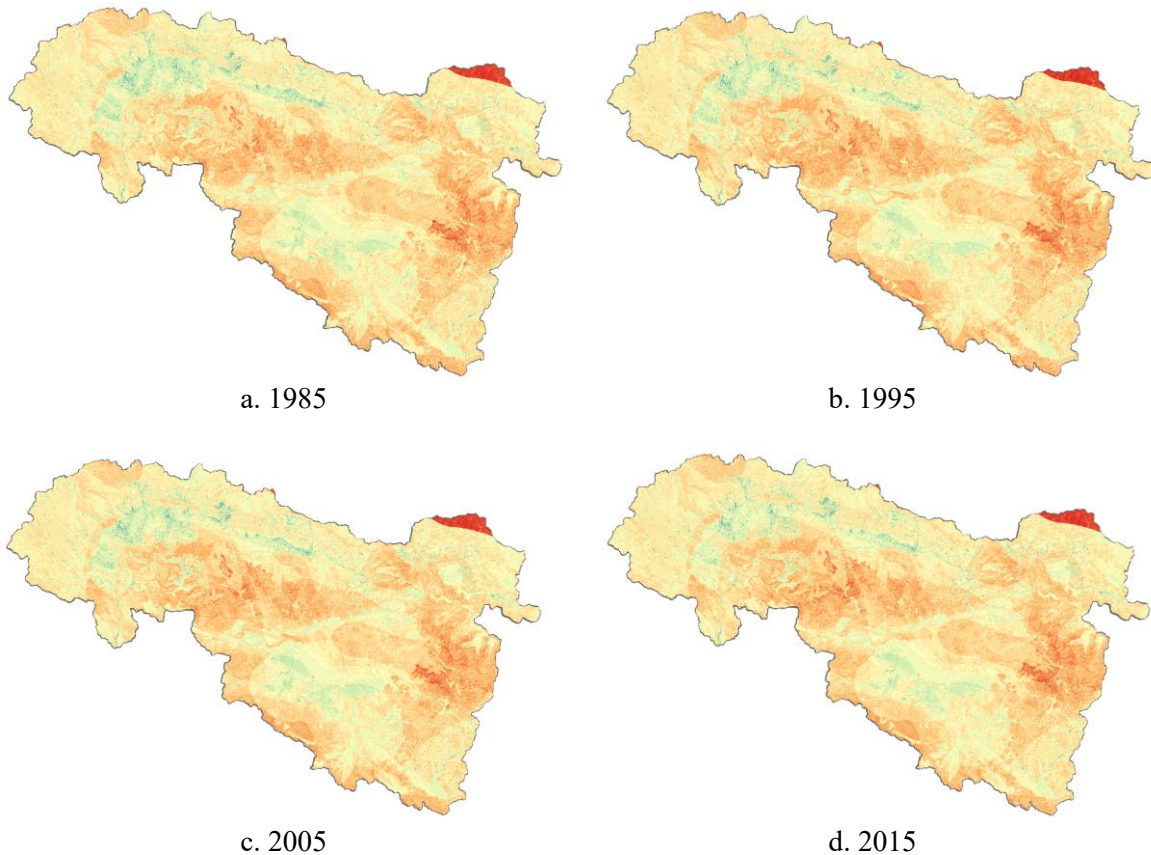
Fuente: Elaboración propia con estaciones DECADE (Andrade et al., 2018); interpolación IDW (Shepard, 1968) y reclasificación EARLI

Con estos insumos se generaron mapas EARLI por año (1985, 1995, 2005, 2015, 2024) y mapas binarios $RP \geq 3.5$. La superficie anual de alta recarga se obtuvo por conteo de píxeles y conversión a km^2 ; el cambio se evaluó por periodos (85–95, 95–05, 05–15, 15–24) en términos de pérdida/ganancia, cambio neto, % respecto al inicio y tasa anual, además de persistencia y primer periodo de pérdida.

4 Resultados

4.1 Patrones espaciales del índice EARLI (1985–2024)

Los mapas anuales del índice EARLI muestran un patrón recurrente: las zonas de recarga potencial muy alta y alta se concentran en áreas con pendientes suaves, texturas de suelo permeables, litología favorable y coberturas naturales o semi-naturales. En contraste, los valores bajos se ubican en el valle central y en las franjas urbanas o agrícolas, donde la superficie se encuentra impermeabilizada o compactada. A lo largo del periodo 1985-2024 se observa una reducción y fragmentación gradual de los parches con recarga potencial alta, particularmente marcada en la década más reciente, lo que sugiere una pérdida de continuidad ecológica y una mayor exposición a procesos erosivos.



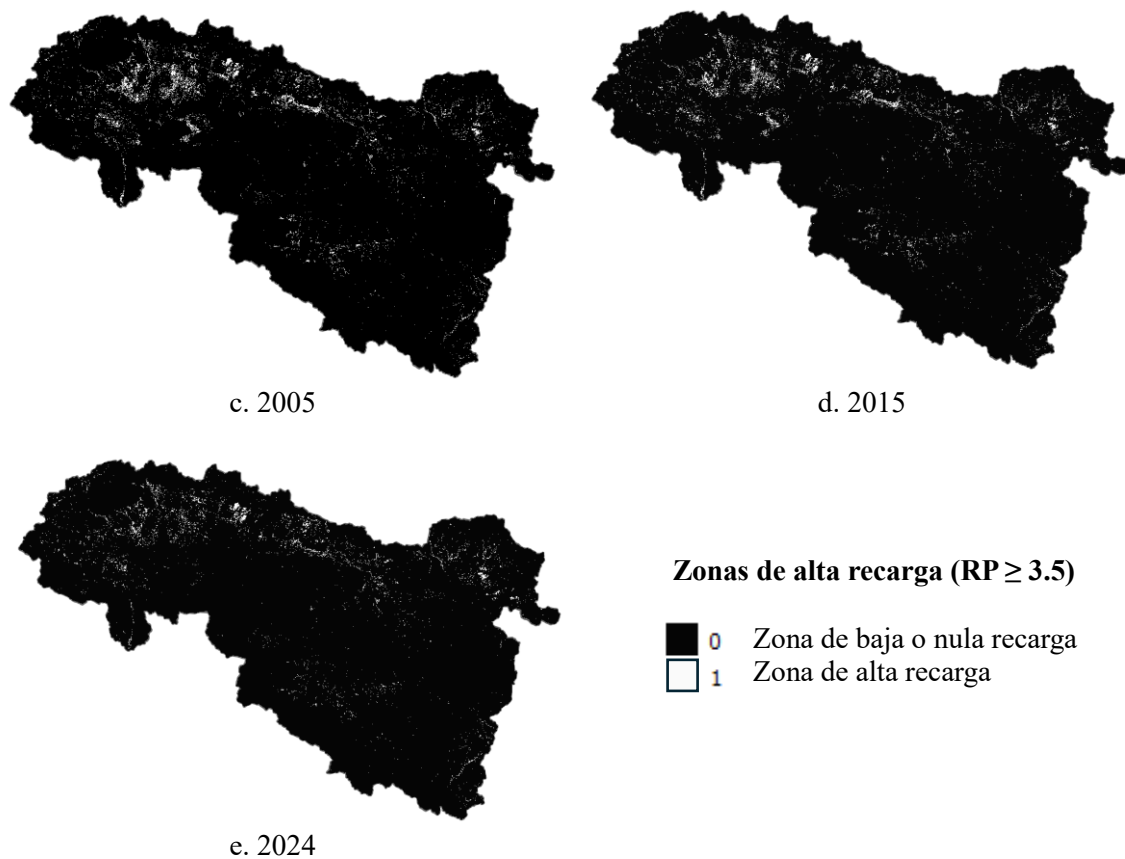


Figura 13. Zonas de alta recarga ($RP \geq 3.5$) en la Cuenca del Río Rocha (1985–2024). Paneles anuales con la misma simbología (1 = alta recarga; 0 = no alta). Datos MapBiomias/EARLI; resolución 30 m; CRS UTM 19S.

Fuente: Elaboración propia a partir del índice EARLI (insumos: SRTM, SoilGrids, geología PDOT/MMAyA/GEOBOL, FVC Sentinel-2, LULC MapBiomias C3.0, precipitación DECADE).

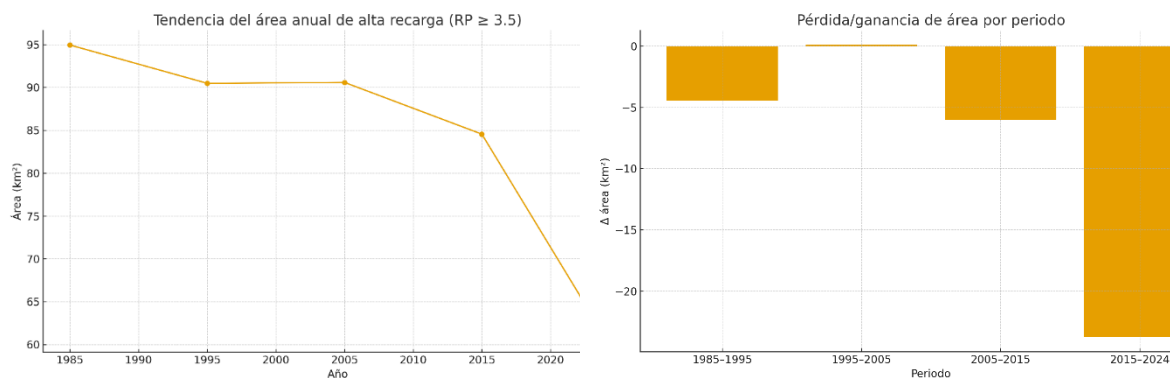
La siguiente tabla resume la evolución:

<i>Año</i>	<i>Píxeles $RP \geq 3,5$</i>	<i>Área (km^2)</i>	<i>% área válida</i>	<i>Δ vs. 1985 (km^2)</i>	<i>Δ vs. 1985 (%)</i>
1985	105 499	94,95	2,60	—	—
1995	100 535	90,48	2,47	−4,47	−4,7
2005	100 650	90,59	2,48	−4,36	−4,6
2015	93 949	84,55	2,31	−10,40	−10,9
2024	67 562	60,81	1,66	−34,14	−35,9

Entre 1985 y 2024 la superficie de alta recarga disminuyó 34,14 km² (−35,9 %), con una pérdida acumulada de casi un punto porcentual relativo. El análisis por periodos muestra cuatro fases distintivas:

- 1985–1995: reducción moderada (−4,47 km²; −4,7 %). La expansión de la agricultura de subsistencia y el crecimiento de pequeñas localidades explican parte de esta pérdida temprana.
- 1995–2005: estabilidad aparente con ligera ganancia (+0,10 km²; +0,1 %). Este resultado sugiere que en la década de 1990 hubo pocas transformaciones profundas en las zonas de mayor infiltración, aunque es posible que se deba a compensaciones locales entre pérdidas y recuperaciones (por ejemplo, abandono temporal de parcelas marginales).
- 2005–2015: nueva contracción (−6,03 km²; −6,7 %), asociada a la consolidación de sistemas de riego tecnificado, cultivos de exportación y ampliación de la frontera periurbana.
- 2015–2024: pérdida marcada (−23,75 km²; −28,1 %), concentrando casi el 70 % de la disminución total. Este descenso coincide con un boom de urbanizaciones en las laderas occidentales y con un aumento de cultivos intensivos (hortalizas, forraje) en sectores previamente naturales.

La Figura 14 a) muestra la trayectoria temporal; b) desagrega la variación por periodos y evidencia la aceleración reciente. Este patrón anticipa menor infiltración efectiva y mayor presión sobre los acuíferos si no se gestionan los cambios de uso del suelo.



a. Tendencia del área anual de alta recarga (RP $\geq 3,5$), 1985–2024. b. Pérdida/ganancia neta de área de alta recarga por periodo (km²).

Figura 14. Representación gráfica de la dinámica de zonas de recarga por periodos
Fuente: Elaboración propia con resultados del índice EARLI y series MapBiomias (C3.0).

4.3 Relación con las transiciones de uso y cobertura del suelo

Aunque no se realizó un análisis cuantitativo detallado por transición, una inspección del cruce entre los mapas de pérdida de recarga (especialmente 2015–2024) y las transiciones MapBiomias indica que los mayores retrocesos corresponden a:

- Conversión de vegetación natural o bosque a áreas agropecuarias (cultivos de secano, horticultura intensiva y pasturas). Estos cambios reducen la infiltración por laboreo frecuente y compactación.
- Expansión de áreas urbanas y de infraestructura, sobre todo en torno a la ciudad de Cochabamba y las rutas principales. La impermeabilización y el sellado del suelo disminuyen drásticamente la recarga.
- En menor medida, transformación de pastizales naturales a matorrales degradados o zonas con escasa cobertura vegetal, lo que favorece la escorrentía superficial.

Estas transiciones coinciden con la pérdida de parches de alta recarga en las zonas periurbanas y en los abanicos aluviales del Valle Central, lo que refuerza la hipótesis de que el cambio de uso de suelo es el principal detonante de la disminución de la recarga potencial.

4.4 Limitaciones y fuentes de incertidumbre

Los resultados deben interpretarse con cautela debido a varias limitaciones:

- Resolución y homogeneidad de datos: el análisis se realizó a 30 m; procesos hidrogeológicos pueden variar a escala más fina. Además, las clases de suelo y geología provienen de mapas a 1:100 000 y se generalizan al raster, lo que puede introducir errores de representatividad.
- Interpolación de la precipitación: se utilizó un IDW basado en un número limitado de estaciones. Este método no incorpora explícitamente gradientes altitudinales ni sombras orográficas y puede suavizar extremos de lluvia. La asignación de rangos de precipitación en la reclasificación podría variar si se usaran métodos que integren altitud (e.g. regresión-kriging) o técnicas de Machine Learning.
- Clasificación de MapBiomas: aunque MapBiomas Bolivia ofrece series consistentes, algunas clases pueden confundirse (p.ej., matorrales vs. pastizales), especialmente en zonas andinas con cobertura esparcida. Cualquier error se propaga al índice EARLI.
- Umbral de alta recarga: el valor $RP \geq 3,5$ es operativo y se basa en un balance entre minimizar falsos positivos y capturar zonas con buena aptitud. Ajustar ligeramente el umbral (3,4–3,6) podría cambiar el área de alta recarga en $\pm 5\%$, aunque no alteraría la tendencia de disminución.
- Naturaleza del índice: EARLI entrega una aptitud relativa de recarga, no un volumen real (mm/año). Por lo tanto, las áreas con RP alto no garantizan un flujo de agua específico y requieren complementarse con campañas de campo e información hidrogeológica.

5 Discusión

Los resultados demuestran que la pérdida acelerada de zonas con alta aptitud de recarga en la Cuenca del Río Rocha se ha concentrado en los últimos nueve años. Esto coincide con el auge de la urbanización y el crecimiento de la frontera agrícola, factores que reducen la capacidad de infiltración mediante sellado o compactación del suelo. Estudios previos en el Valle Alto ya advertían descensos

de niveles piezométricos y agotamiento de pozos (Durán, 2015), pero no habían vinculado explícitamente esta tendencia con la evolución espacial del uso del suelo. Al integrar el modelo EARLI con series de MapBiomias, este trabajo proporciona la primera evidencia cartográfica de que la transformación de coberturas naturales a usos agropecuarios y urbanos es la principal causa de la reducción de recarga potencial.

Comparado con investigaciones en otras cuencas bolivianas, la magnitud de la pérdida (−35,9 % en cuatro décadas) es significativa y sugiere que la cuenca del río Rocha podría pasar de ser un sistema de recarga moderada a uno de recarga limitada si no se interviene. En regiones similares (e.g. Valle de Punata–Cliza), se han propuesto estrategias de recarga artificial y revegetación para contrarrestar la disminución; sin embargo, su implementación depende de identificar zonas estratégicas de infiltración. El presente análisis aporta precisamente esa localización.

Desde el punto de vista metodológico, la innovación radica en el uso combinado de un índice semi-cuantitativo (EARLI) con datos de cambio de uso/cobertura de MapBiomias para un periodo largo (1985–2024). En Bolivia no se habían hecho estudios de recarga a escala de cuenca que compararan la evolución temporal de forma tan detallada. La integración de MapBiomias no solo facilita replicar el enfoque en otras cuencas, sino que también permite relacionar las pérdidas con políticas territoriales y tendencias socioeconómicas (e.g. crecimiento urbano descontrolado, expansión de la agricultura comercial).

Finalmente, el potencial de impacto de los resultados es alto. La identificación de sectores donde la recarga se mantiene estable o ha disminuido drásticamente puede orientar:

- La zonalización de protección y restricciones de uso del suelo en las áreas de recarga persistente.
- La priorización de restauración (reforestación, obras de infiltración) en los parches degradados.
- La regulación de pozos y programas de ahorro de agua en subzonas donde la recarga no compensa la extracción.
- El diseño de infraestructura verde y drenaje urbano sostenible para mitigar la impermeabilización en expansión.

En suma, el análisis multitemporal con EARLI y MapBiomias ofrece no solo un diagnóstico, sino una herramienta de planificación y de toma de decisiones que puede ser replicada en otras cuencas bolivianas para apoyar una gestión más resiliente y sostenible del recurso hídrico subterráneo.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- 1985 y 2024, las áreas con $RP \geq 3,5$ disminuyeron de 94,95 km² a 60,81 km², con un ritmo de pérdida particularmente alto en la última década.

- La integración del modelo EARLI con las series históricas de MapBiomás Bolivia constituye un aporte inédito en el país, replicable en otras cuencas y escalas, y adaptable a condiciones de información hidrogeológica limitada.
- La conversión de coberturas naturales a usos agropecuarios y urbanos se identifica como el principal detonante de la reducción de la recarga potencial.
- Los hallazgos permiten delimitar zonas prioritarias de conservación y restauración, orientar estrategias de recarga artificial, promover infraestructura verde y apoyar la regulación de la explotación subterránea.
- Más allá del diagnóstico técnico, los hallazgos constituyen insumos estratégicos para la gestión del agua (reglamentación de pozos y proyectos de recarga artificial), la planificación territorial (identificación de áreas de restauración y protección hídrica) y la adaptación al cambio climático, aportando evidencia espacial para respaldar políticas locales y nacionales de resiliencia. Estos aportes fortalecen además los avances hacia los ODS 6 y 13 en Bolivia, Naciones Unidas, (2015), IPCC (2021,2022a).

A) Gestión y protección del territorio

- Zonificación de recarga: incorporar los mapas EARLI y la máscara $RP \geq 3.5$ en el Plan de Uso de Suelo municipal/metropolitano; declarar “unidades de protección de recarga” con restricciones a cambio de uso, sellado y movimiento de suelo.
- Criterios de factibilidad: condicionar habilitaciones urbanas/industriales a balance de infiltración (superficies permeables mínimas, drenaje sostenible).
- Restauración: revegetación con coberturas nativas, zanjas/bermas de infiltración, franjas de protección en abanicos aluviales y cauces.

B) Infraestructura verde y prácticas de infiltración

- En zonas urbanas: pavimentos permeables, pozos/zapatitas de recarga, techos verdes, drenaje urbano sostenible (SUDS) y desconexión de pluviales hacia áreas de infiltración.
- En agro-paisajes: siembra en contorno, rotación, cobertura permanente, subsolado selectivo y micro-reservorios con campo de infiltración.

C) Gestión de la demanda subterránea

- Metas de extracción coherentes con la recarga potencial; ajuste progresivo de permisos y caudales en zonas con mayor pérdida.
- Medición y reporte: conteo y registro de pozos activos, volúmenes y usos, priorizando sistemas de bombeo eficiente y reúso donde sea viable.

D) Monitoreo y actualización del análisis

- Repetición bienal del índice EARLI con datos actualizados de MapBiomás y precipitación, para seguir la tendencia y verificar la eficacia de medidas.
- Validación focal: campañas de infiltración (doble anillo) y piezometría en sitios críticos para ajustar umbrales y pesos (ej. sensibilidad RP 3.4–3.6).

E) Gobernanza y articulación institucional

- Mesa técnica metropolitana (gobiernos locales, EPSAs, academia, actores productivos) para coordinar prioridades, inversiones y control de usos.
- Instrumentos normativos: ordenanzas/leyes municipales de protección de zonas de recarga, con incentivos (ej. prediales verdes) y fiscalización.

6.2 Próximos pasos

El índice EARLI ofrece aptitud relativa (no mm/año reales); su lectura debe integrarse con balances y modelación (MODFLOW, etc.).

La atribución cuantitativa por transición de LULC puede profundizarse (p. ej., cruzando pérdida 2015–2024 con cambios MapBiomass); no afecta la conclusión principal de pérdida neta y acelerada.

Priorizar una línea base de monitoreo (pozos, niveles, calidad) que permita contrastar el estado del acuífero con los mapas de recarga.

7 Bibliografía

- Amaya, A. G., Ortiz, J., Durán, A., & Villazón, M. (2018). *Hydrogeophysical methods and hydrogeological models: Basis for groundwater sustainable management in Valle Alto (Bolivia)*. *Sustainable Water Resources Management*, 5(3), 1179–1188. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0293-x>
- Andrade, M. F., I. Moreno, J. M. Calle, L. Ticona, L. Blacutt, W. Lavado-Casimiro, E. Sabino, A. Huerta, C. Aybar, S. Hunziker, and S. Brönnimann (2018) Atlas - Clima y eventos extremos del Altiplano Central Perú-boliviano / Climate and extreme events from the Central Altiplano of Peru and Bolivia / 1981-2010. *Geographica Bernensia*, 188 pp., doi: [10.4480/GB2018.N01](https://www.geography.unibe.ch/research/climatology_group/research_projects/decade/index_eng.html). https://www.geography.unibe.ch/research/climatology_group/research_projects/decade/index_eng.html
- Archivo ELFEC. (2025). *Puntos de elfec_2025.csv*: Base de datos con pozos conectados a red eléctrica.
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252.
- CIPCA Cochabamba. (2023). *Diagnóstico de estudio de área de recarga hídrica y balance hídrico en 2 microcuencas de la provincia Esteban Arze*. Términos de referencia.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ed. Omega.
- Durán Núñez del Prado, A. (2015, octubre). *Gestión del conocimiento de las aguas subterráneas: Aportes a su gobernanza*. Ponencia presentada en la 7ma Reunión WATERLAT-GOBACIT, Guadalajara, México.
- FAO. (2006). *Evaluación de la infiltración y recarga en suelos con cobertura forestal*.
- FAO & SELA. (1985). *Evaluación del balance hídrico y posibilidades de riego en el abanico aluvial de Punata, Cochabamba – Bolivia*. Proyecto SELA/FAO/BOL/83/001. Roma: FAO.
- Fetter, C.W. (2001) *Applied Hydrogeology*. 4th Edition, Pearson, Higher Education, New Jersey.

- Fundación AGRECOL Andes & Universidad Mayor de San Simón (UMSS). (2020). *Modelación hidrogeológica y balance hídrico del acuífero Punata-Cliza*. Documento interno del Proyecto CABAS.
- GEOBOL & Naciones Unidas. (1978). *Investigaciones de aguas subterráneas en las cuencas de Cochabamba*. Servicio Nacional de Geología, con apoyo de ONU.
- Gobierno Autónomo Municipal de Anzaldo. (2024). *Ley Municipal 060/2024 de Protección y Conservación de Zonas de Recarga Hídrica*.
- Gonzales Amaya, G., et al. (2016). *Evaluación de recarga en acuíferos de Cochabamba*.
- Gonzales Amaya, G., et al. (2019). *Variación del relleno sedimentario y zonas de recarga en Cochabamba*.
- Gouzes, O., & Delpont, G. (1990). *Evaluación de los recursos de agua y abastecimiento en Cochabamba, Bolivia*. Informe técnico BRGM/SEURECA.
- Heijstek, A. (2005). *Evaluación de recursos hídricos subterráneos y potencial de recarga en el Valle Alto de Cochabamba*. BASIS–CRSP, Universidad de Wisconsin-Madison.
- Hengl, T. (2018). *Clases de textura del suelo (sistema USDA) para 6 profundidades del suelo (0, 10, 30, 60, 100 y 200 cm) a 250 m (versión v02) [Conjunto de datos]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1475451>
- Hillel, D. (1982). *Introduction to Soil Physics*. Academic Press.
- Ilstedt, U., Bargués-Tobella, A., Bazié, H., et al. (2016). Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports*, 6, 21930. <https://doi.org/10.1038/srep21930>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC. (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Kenn, R., Torrico, O., & Kracht, H.-G. (1964). *Estudio del agua subterránea para abastecimiento de agua potable en la ciudad de Cochabamba*. Servicio Nacional de Geología (GEOBOL).
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
- MapBiomias Bolivia. (2024). Colección 3.0 – Cobertura y uso del suelo 1985–2024. Recuperado el 29/08/2025 de <https://bolivia.mapbiomas.org/en/colecciones-mapbiomas-bolivia>
- MERCADO CONSULTANTS. (1996). *Evaluación del balance hídrico y recomendaciones de explotación del acuífero*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2012). *Lineamientos para la gestión integral del recurso hídrico en Bolivia*. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego – Plan Director de la Cuenca del Río Rocha (2018)

- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015 (A/RES/70/1). Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Neumann-Redlin, H., Tunnell, G., & Scholz, D. (2001). *Geología e hidrogeología básica del Valle Central de Cochabamba*. Proyecto GTZ–ProAgua. Cochabamba: UMSS–DEA.
- Poggio, Laura & Batjes, Niels & Heuvelink, Gerard & Kempen, Bas & Ribeiro, Eloi & Rossiter, David. (2021). SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*. 7. 217-240. 10.5194/soil-7-217-2021. *Global gridded soil information – 250m resolution, 30cm depth layer*. OpenGeoHub Foundation. <https://soilgrids.org>
- Renner, R., & Velasco, W. (2000). *Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba*. Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería N°34.
- Rodríguez-Levy, I. E., et al. (2023). Development and application of a methodology for the identification of potential groundwater recharge zones: A case study in the Virvini Micro-Basin, Tiraque, Bolivia. *Water*, 15(7), 1268. <https://doi.org/10.3390/w15071268>
- Saavedra, J. T., Rosales, L. A., & Saavedra, O. (2020). Modelación de aguas subterráneas del valle de Cochabamba utilizando MODFLOW. *Investigación & Desarrollo*, 20(1), 81–88. <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-6i>
- Sentinel-2 / ESA (misión y producto L2A)
- Drusch, M., et al. (2012). Sentinel-2: ESA’s optical high-resolution mission for GMES. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18–39.
- SEMAPA/BRGM. (1994). *Estudio hidrogeológico del Valle Central de Cochabamba*.
- SENAMHI. (2020). *Boletines climáticos históricos y datos de estaciones meteorológicas del departamento de Cochabamba*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. <https://www.senamhi.gob.bo>
- SERGEOTECMIN. (2006). *Mapa geológico departamental de Cochabamba (1:100.000)*. Servicio Geológico Técnico Minero de Bolivia.
- Sillerico, E., Marchamalo, M., Ayuga, J., & Marín, R. (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. *Informes de la Construcción*, 62(519), 47–53. <https://doi.org/10.3989/ic.09.063>
- Shepard, D. (1968). *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data*. In *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference* (pp. 517–524). ACM. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- SRTM (paper + producto): Farr, T. G., et al. (2007). *The Shuttle Radar Topography Mission*. *RSE*, 106, 32–66. USGS/NASA SRTM 1 Arc-Second Global, acceso 15/08/2025.
- Urbañy, S. (1994). *Estudio hidrológico del Valle Central de Cochabamba* (Tesis de licenciatura). Universidad Mayor de San Simón.