

Artículo Original

Distribución espacial de las zonas potenciales de Recarga Hídrica en Bolivia

Spatial distribution of potential Water Recharge zones in Bolivia

Neftalí Chapi Siñani^{1*}, Paola Alejandra Padilla Medina² & Beatriz Liboria Canaviri Blanco¹

*Autor de Correspondencia: nefchapi@gmail.com

¹ Ministerio de Medio Ambiente y Agua. La Paz – Bolivia.

² Fondo Nacional de Desarrollo Integral, Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. La Paz - Bolivia.

Recibido: 08/12/2024 Aceptado para publicación: 15/05/2025 Publicado: 30/12/2025

Resumen

En Bolivia, el agua es esencial y un punto clave para el desarrollo; la Constitución Política del Estado la considera un derecho básico. Las leyes N°1333 y N°300 refuerzan su protección, conservación de zonas de recarga y cabeceras de cuenca. Pese a que los municipios han normado su resguardo bajo autonomía de acuerdo a la Ley N°031, aún no existe una zonificación nacional, lo que limita la planificación y gestión de aguas subterráneas. Bajo este marco, el estudio delimitó las Zonas Potenciales de Recarga Hídrica (ZPRH) a escala nacional mediante SIG y teledetección, apoyados en un análisis multicriterio, a través del método de Proceso Analítico Jerárquico. Se evaluaron nueve variables en formato rejilla, revisando que no estuvieran altamente correlacionadas. Los factores que más influyeron fueron la hidrogeología, la precipitación y la capacidad del suelo para retener agua. Se generaron dos modelos de distribución espacial de las ZPRH, con y sin precipitación, que al compararlos se evidenció una redistribución lógica de clases, donde la inclusión climática reduce áreas de muy alto y alto potencial e incrementa clases media, baja y muy baja en zonas con déficit de lluvia, introduciendo sensibilidad espacial y temporal consistente con la hidrología. El análisis a nivel estacional de la precipitación (DEF, MAM, JJA, SON) reveló dinámicas de expansión y contracción de clases muy alta y alta más notorias en verano, especialmente en Amazonas y Llanuras del Beni, mientras que el Altiplano y parte del Chaco mostraron menos recarga debido a la poca lluvia, en contraste en la Chiquitanía esta limitación se debe a la geología de baja permeabilidad.

Palabras clave: ZPRH, recarga, precipitación, Proceso Analítico Jerárquico.

Abstract

In Bolivia, water is essential and a key element for development; the Political Constitution of the State considers it a basic right. Laws No. 1333 and No. 300 reinforce its protection and the conservation of recharge zones and headwaters. Although municipalities have regulated their protection under autonomy (Law No. 031), there is still no national zoning, which limits the planning and management of aquifers. Within this framework, the study delineated Potential Water Recharge Zones (PWRZs) at the national level using GIS and remote sensing, supported by a multi-criteria analysis through the Analytic Hierarchy Process (AHP). Nine variables were evaluated in a grid format, ensuring they were not highly correlated. The most influential factors were hydrogeology, precipitation, and soil water retention capacity. Two spatial distribution models of the ZPRH (Zones with and without precipitation) were generated. Comparing them revealed a logical redistribution of classes, where the inclusion of climate reduces areas of very high and high potential and increases medium, low, and very low classes in areas with rainfall deficits, introducing spatial and temporal sensitivity consistent with hydrology. The seasonal analysis of precipitation (DEF, MAM, JJA, SON) revealed expansion and contraction dynamics of very high and high classes, more pronounced in summer, especially in Amazonas and the Beni Plains. Meanwhile, the Altiplano and part of the Chaco showed less recharge due to low rainfall. In contrast, in the Chiquitanía region, this limitation is due to the low-permeability geology.

Keywords: ZPRH, recharge, precipitation, Analytic Hierarchy Process.

Introducción

El agua es un recurso natural fundamental en el desarrollo sostenible y constituye un gran reto, en relación con las acciones de manejo y conservación (Díaz-Pulido et al., 2009). La Constitución Política del Estado (2009) establece que el agua constituye un derecho primordial para la vida, donde el Estado promoverá el uso y acceso al agua sobre la base de principios de solidaridad, complementariedad, reciprocidad, equidad, diversidad y sustentabilidad. Además de regular el manejo y gestión sustentable de los recursos hídricos.

La Ley N° 1333 del Medio Ambiente (1992) dispone que su protección y conservación es tarea esencial del Estado y la sociedad. La Ley N° 300 Marco de la Madre Tierra (2012) establece que se debe promover la conservación y protección de las zonas de recarga hídrica, cabeceras de cuenca, franjas de seguridad nacional del país y áreas con alto valor de conservación. En este marco, en los últimos años los Gobiernos Autónomos Municipales en base a sus competencias establecidas en la Ley N° 031 Marco de Autonomías y Descentralización (2010) han venido promulgando leyes municipales respecto a la conservación y protección de zonas potenciales de recarga hídrica.

Peñuela y Carrillo (2013), AGRECOLANDES (2020) y Chamorro-Castillo (2016), señalan que las zonas de recarga hídrica son áreas donde las características del terreno como suelos permeables, baja pendiente, presencia de fracturas/lineamientos, vegetación y aporte de precipitación, ayudan a la infiltración vertical que alimenta acuíferos. A nivel nacional, el territorio se caracteriza principalmente por una alta variabilidad climática, topográfica, de suelos, áreas con alta densidad de cobertura, como bosques, y áreas con baja densidad, como pastizales, matorrales, vegetación dispersa y/o escasa, además de la presencia de acuíferos.

Bajo este contexto, si bien se ha avanzado a nivel nacional y municipal en la parte normativa respecto a la protección y conservación de zonas de recarga hídrica, aún no se cuenta con una zonificación a escala nacional que integre de manera sistemática diferentes variables territoriales para identificar su potencialidad. Esta limitación persiste pese a tener un mapa hidrogeológico, el cual identifica áreas de agua subterránea (SERGEOMIN, 2002).

La ausencia de esta información limita una adecuada planificación hídrica, ordenamiento territorial y gestión eficiente de recursos hídricos superficiales y subterráneos. Conocer las diferentes zonas potenciales y su nivel de prioridad resulta fundamental para prevenir actividades que comprometan su integridad; procesos como la deforestación, agricultura intensiva con uso de agroquímicos, expansión urbana que reducen la infiltración y sobreexplotación de acuíferos en zonas prioritarias de alta recarga. De esta forma, una adecuada zonificación permitirá prevenir determinadas actividades, así como garantizar la disponibilidad futura de agua, tanto para consumo, como para procesos productivos.

Materiales y métodos

Determinación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica

Existen diferentes metodologías que integran variables como litología, pendiente, suelos, cobertura del suelo, densidad de drenaje, precipitación, entre otras, para identificar Zonas Potenciales de Recarga Hídrica (ZPRH), utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y procesos de Teledetección, documentados en estudios como Hsin-FU et al., 2016; IDEAM, 2025; AGRECOLANDES, 2020; CATIE, 2009; Meng et al., 2024; Kaewdum & Chotpantarat, 2016. Con base a estos estudios se definió la siguiente secuencia de pasos para identificar las ZPRH a escala nacional.

- Identificación de variables determinantes que tienen efectos en la recarga hídrica.
- Análisis de correlación para detectar variables altamente correlacionadas.
- Aplicación de análisis multicriterio basado en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP -Analytical Hierarchy Process-), que a su vez se divide en los siguientes pasos:
 - Determinación de pesos a las variables seleccionadas mediante la escala de valoración Saaty.
 - Evaluación de la consistencia de pesos asignados, a través de la relación de consistencia.
 - Establecimiento de un modelo de combinación lineal, integrando las diferentes variables y pesos asignados.
 - Normalización de variables territoriales mediante el método “min-max” con la finalidad de estandarizar a un mismo rango [0,1].
 - Integración de variables territoriales normalizadas a través del modelo de combinación lineal determinado en AHP.

Variables determinantes en la recarga hídrica

Se seleccionaron un total de nueve variables territoriales que tienen efectos en la recarga hídrica, los cuales se especifican en la Tabla 1 y Figura 1.

Evaluación multicriterio - Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico es un marco de toma de decisiones multicriterio desarrollado por Thomas L. Saaty (Saaty, 1987). Se consideró este método puesto que integra procesos tanto cuantitativos como cualitativos, dentro una escala de medición común denominado escala de Saaty (Tabla 2), la cual determina la intensidad que tiene una variable respecto a otra, a través de comparaciones pareadas.

Una vez realizada la asignación de intensidades a las diferentes variables, se procedió a determinar los estadísticos de Índice de Consistencia (IC), el Índice de Consistencia Aleatoria (RI -Random Index-) y la Razón de Consistencia (RC), con el fin de evaluar la coherencia de

las intensidades asignadas dentro una matriz cruzada. Se considera que una matriz es consistentemente aceptable cuando $RC \leq 0.1$. Si se cumple el supuesto, los pesos (w) que se obtuvieron de la matriz cruzada respecto a un vector normalizado "z" serán los que se utilizarán para una combinación al momento de identificar las ZPRH.

Índice de Consistencia (IC)

$$CI = \frac{\lambda_{\text{Max}} - n}{n - 1}$$

Donde:

λ_{Max} = Valor propio máximo derivado de la matriz de comparaciones pareadas (A) que permite calcular un vector de pesos (w), y que posteriormente se normalizará para obtener un vector z ($z = A^*w$), a partir del cual se determinar λ_{Max}

n = Número de variables evaluadas.

Razón de Consistencia (RC)

$$RC = \frac{CI}{RI}$$

Donde:

IC = Índice de consistencia.

IR = Índice aleatorio que está en función al "n" tamaño de matriz que corresponde al número de variables utilizadas en AHP.

Valores IR:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

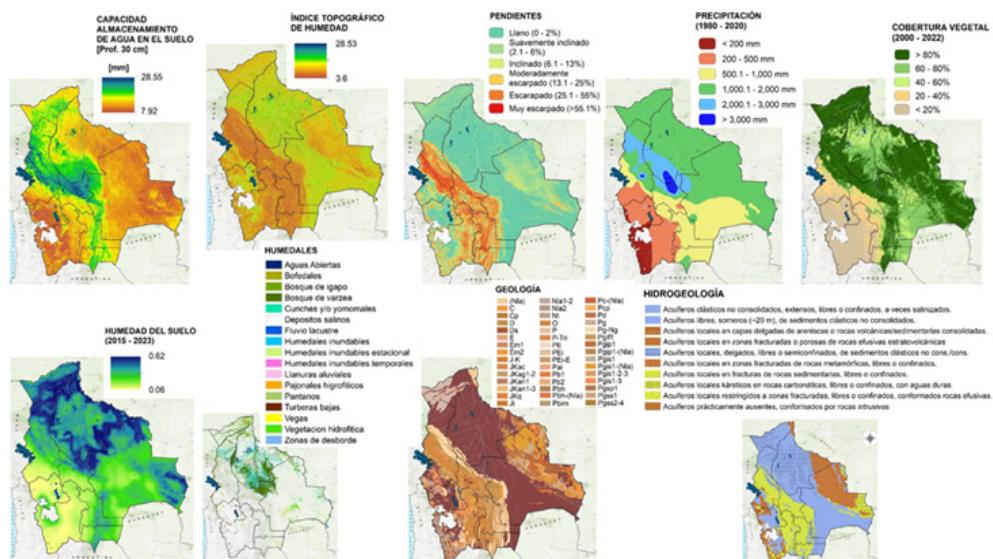


Figura 1 Distribución espacial de variables utilizadas en las ZPRH.

Normalización de variables distribuidas en rejilla espacial

Las nueve variables determinantes fueron convertidas a formato raster. Sin embargo, al corresponder a dos tipos de datos -continuas y categóricas o descriptivas-, a las variables categorías se les asignó una valoración numérica previa entre 1 a 5, con el fin de representar su nivel de importancia al momento de determinar las ZPRH (Chen, 2014; Rodríguez et al., 2016). Esta asignación numérica se basó en criterio de expertos para las variables geología (litología), hidrogeología y bofedales/humedales.

Una vez con valores mínimos y máximos para las variables continuas y categóricas, se aplicó una normalización tipo "min-max" con el propósito de escalar los datos a un rango común entre 0 y 1 (Marinho-Maciel et al., 2015). Procedimiento que fue necesario debido a que las diferentes variables presentaban distintas unidades de medida, lo que impedía su integración directa, a través de

una combinación lineal (Figura 2).

Combinación lineal ponderada

De los pesos (w) obtenidos mediante AHP para las nueve variables, estas se combinaron a través de una sumatoria lineal ponderada; proceso que se realizó mediante álgebra de mapas, lo cual permitió integrar las variables de rejilla normalizada, a partir de la siguiente expresión:

$$ZPRH = \sum_{j=1}^7 W_j * S_j$$

Donde:

ZPRH = Zonas potenciales de recarga hídrica que muestra la potencialidad de cada rejilla (pixel) para favorecer el proceso de recarga de acuíferos.

W_j = Peso individual de cada variable obtenido

mediante AHP.

S_j = Variable normalizada en rejilla.

El raster resultante de las ZPRH fue reclasificado en cinco clases (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) utilizando el método de cuantiles (quantile), el cual permite distribuir de manera equitativa el número de pixeles en

cada clase. Esto resulta útil cuando los valores del ráster presentan distribuciones sesgadas o concentradas en rangos específicos, ya que evita que algunas clases queden sobre-representadas y otras casi vacías o con pocos pixeles, un problema frecuente en métodos alternativos de dispersión de datos.

Tabla 1. Variables utilizadas para determinar las ZPRH.

Variable	Unidad	Fuente
Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (profundidad de 30 cm).	mm	En base a la aplicación de una ecuación de pedotransferencia, a partir de variables en rejilla de textura del suelo, materia orgánica, carbono orgánico y densidad aparente del SoilGrids de la ISRIC WorldSoil (https://soilgrids.org/).
Índice Topográfico de Humedad (ITH o TWI - Topographic Wetness Indices-)	adimensional	Derivado del Modelo de Elevación Digital MERIT Hydro (https://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/).
Pendiente	%	Derivado del Modelo de Elevación Digital MERIT Hydro (https://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/).
Precipitación	mm	Derivado de la rejilla espacial GMET (Gridded Meteorological Ensemble Tool) con promedio de data de 30 años (MMAyA, 2024).
Cobertura de vegetación	%	Derivado del producto MODIS índice de vegetación (MY-D13A3)
Geología	litológica	Proveniente del Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas (SERGEOTECMIN, 2000).
Hidrogeológico	acuífero	Proveniente del Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas (SERGEOMIN, 2002).
Humedales / Bofedales	clases	En base a CIFOR (2017), Vegetación de Navarro & Ferreira (2007), MMAyA (2023).
Humedad del suelo	adimensional	En base a producto L3 (L-band / ascendente-descendente) de SMAP (https://data.nasa.gov/dataset/smap-l3-radiometer-global-daily-36-km-ease-grid-soil-moisture-v009).

Resultados

Con el fin de evitar la multicolinealidad (alta correlación, indicativo de existencia de información redundante), se evaluaron las nueve variables seleccionadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados evidenciaron que ninguno de los coeficientes presentaron una correlación alta ($r \geq 0.8$) con respecto a las demás, lo que indica que cada una aporta información distinta y complementaria al momento de zonificar (Figura 3).

Al no tenerse variables altamente correlacionadas se incluyó a todas en el proceso de valoración mediante el método AHP (comparación pareada) para posteriormente

obtener los pesos correspondientes (Tabla 3 y 4).

Los pesos asignados a las diferentes variables fueron evaluados en su conjunto mediante la razón de consistencia. Los resultados obtenidos indicaron que los pesos definidos cumplen con los criterios de consistencia aceptables, lo que afirma que han sido correctamente estimados y que son adecuados para la delimitación de las ZPRH (Tabla 5 y 6).

A partir de los pesos validados, se estableció la relación final de integración de las variables, mediante el método de combinación lineal ponderada. El modelo para determinar espacialmente las ZPRH se muestra en la ecuación 1.

Ecuación 1

$$\begin{aligned} ZPRH = & 0.19*CA + 0.1*ITH + 0.07*PEN + 0.19*PCP + 0.06*CV \\ & + 0.09*GEO + 0.2*HGE + 0.05*HB + 0.05*HS \end{aligned}$$

Donde:

CA = Capacidad de almacenamiento agua en el suelo.

ITH = Índice Topográfico de Humedad.

PEN = Pendiente.

PCP = Precipitación.

CV = Cobertura de vegetación.

GEO = Geológico.

HGE = Hidrogeológico.

HB = Humedales/Bofedales.

HS = Humedad del suelo.

Con la finalidad de separar el efecto intrínseco del suelo (capacidad de almacenamiento y humedad), la topografía, la cobertura, la geología, la hidrogeología y la presencia de humedales/bofedales respecto a la influencia de la precipitación, se formuló la Ecuación 2, que cuantifica el potencial de estas características como variables determinantes de la recarga, de forma independiente

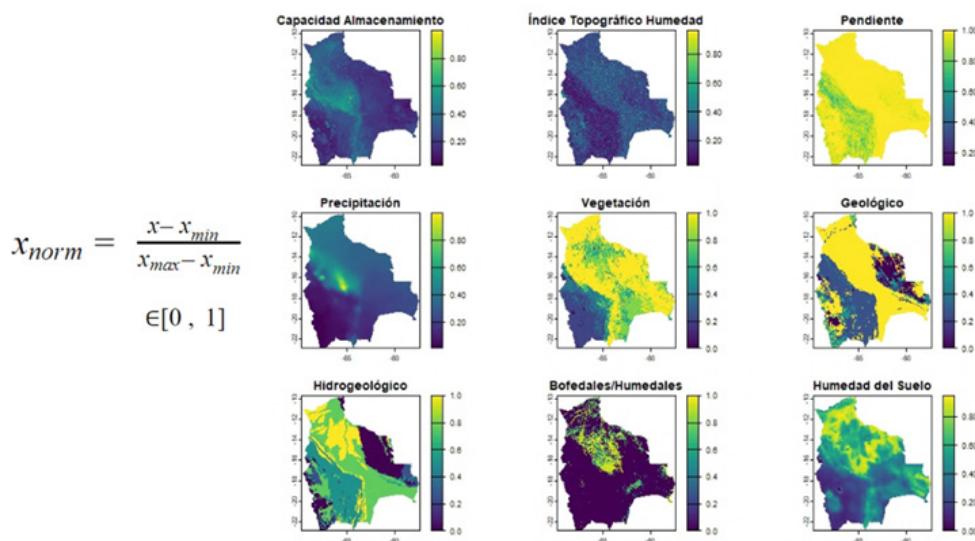


Figura 2 Normalización de variables en rejilla espacial.

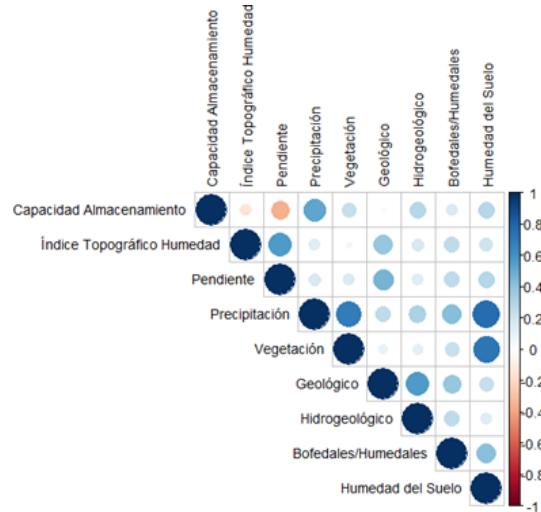


Figura 3 Gráfica de correlación de variables utilizadas en las ZPRH

Tabla 2. Escala de Intensidad de valoración de acuerdo con Saaty.

Intensidad		Definición
1		De igual importancia
3		Moderada importancia
5		Importancia fuerte
7		Muy fuerte o demostrada
9		Extrema
2,4,6,8		Valores intermedios
Recíprocos		$a_{ij} = 1/a_{ij}$

Tabla 3. Matriz cruzada de valoración pareada.

Variables	Capacidad de Almacenamiento	Índice Topográfico de Humedad	Pendiente	Precipitación	Cobertura Vegetal	Geológico	Hidrogeológico	Bofedales / Humedales	Humedad del Suelo
Capacidad Almacenamiento	1	2	3	1	3	2	1	4	4
Índice Topográfico de Humedad	1/2	1	2	1/2	2	1	1/2	2	2
Pendiente	1/3	1/2	1	1/3	1	2	1/3	1	1
Precipitación	1	2	3	1	3	2	1	4	4
Cobertura Vegetal	1/3	1/2	1	1/3	1	1	1/3	1	1
Geológico	1/2	1	2	1/2	1	1	1/2	2	2
Hidrogeológico	1	2	4	1	3	2	1	4	4
Bofedales / Humedales	1/4	1/2	1	1/4	1	1/2	1/4	1	1
Humedad del Suelo	1/4	1/2	1	1/4	1	1/2	1/4	1	1

Tabla 4 Matriz normalizada por columna.

Variables	Capacidad de Almacenamiento	Índice Topográfico de Humedad	Pendiente	Precipitación	Cobertura Vegetal	Geológico	Hidrogeológico	Bofedales / Humedales	Humedad del Suelo	Peso ω
Capacidad Almacenamiento	0.19	0.20	0.17	0.19	0.19	0.17	0.19	0.20	0.20	0.19
Índice Topográfico de Humedad	0.10	0.10	0.11	0.10	0.13	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10
Pendiente	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.17	0.06	0.05	0.05	0.07
Precipitación	0.19	0.20	0.17	0.19	0.19	0.17	0.19	0.20	0.20	0.19
Cobertura Vegetal	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06
Geológico	0.10	0.10	0.11	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10	0.09
Hidrogeológico	0.19	0.20	0.22	0.19	0.19	0.17	0.19	0.20	0.20	0.20
Bofedales / Humedales	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
Humedad del Suelo	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05

Tabla 5 Variables y valores λ_{max} .

Variables de las ZPRH	Valor Z	Valor ω	Valor Z/ ω
Capacidad Almacenamiento	1.76	0.19	9.30
Índice Topográfico de Humedad	0.94	0.10	9.35
Pendiente	0.66	0.07	9.47
Precipitación	1.76	0.19	9.30
Cobertura Vegetal	0.57	0.06	9.37
Geológico	0.88	0.09	9.39
Hidrogeológico	1.83	0.20	9.37
Bofedales / Humedales	0.47	0.05	9.35
Humedad del Suelo	0.47	0.05	9.35

Tabla 6 Relación de consistencia del vector de pesos (w).

Estadístico	Valor
CI	0.045
RI	1.45
RC	0.031
RC < 0.1 [Consistente]	

a las fluctuaciones temporales de la precipitación. Este tipo de enfoque es valioso porque distingue entre lo que depende del clima (temporal y variable) y lo que depende de la configuración física del territorio (más estable en el tiempo).

Ecuación 2

$$\begin{aligned} ZPRH = & 0.19*CA + 0.1*ITH + 0.07*PEN + 0.06*CV \\ & + 0.09*GEO + 0.2*HGEO + 0.05*HB + 0.05*HS \end{aligned}$$

De esta forma, al separar la variable clima, es posible identificar con mayor precisión las áreas que, por su condición física y estructural, tienen mayor capacidad natural de generar recarga aun cuando las precipitaciones sean intensas, moderadas o escasas (Hernández-Juárez et al., 2020). Estudios y herramientas de balance suelo-agua documentan la ventaja de separar los efectos climáticos de los atributos físicos del terreno para obtener una interpretación más estable y transferible de la capacidad de recarga espacial (USGS, 2018).

Al aplicar las Ecuaciones 1 y 2 se obtuvieron dos mapas de las ZPRH. El primero integra el efecto de la influencia climática y permite valuar el comportamiento general de la recarga bajo las condiciones climáticas registradas y para análisis a escala regional donde interesa cuantificar

el aporte climático (Figura 4). El segundo representa el potencial intrínseco, destacando la aptitud física superficiales y subterráneas para recibir y retener agua, aunque las lluvias sean moderadas o escasas, por lo que es útil al momento de identificar áreas óptimas para medidas de recarga artificial o intervenciones de manejo del suelo (Figura 5).

De la información en rejilla de los mapas se derivó la tabla 7 que permite comparar la distribución porcentual y en extensión territorial (Km^2) de las distintas clases de las ZPRH. Esta comparación facilita identificar los cambios en superficie del potencial de recarga hídrica asociados a la influencia de la precipitación.

La inclusión de la precipitación en las ZPRH redistribuye las superficies de las diferentes clases, donde las clases muy alto y alto presentan una disminución total de 72,500 km^2 , correspondiendo 60,442 km^2 a muy alto y 12,085 km^2 a alto. Contrariamente las clases medio, bajo y muy bajo aumentan sus superficies, medio en 28,563 km^2 , bajo en 19,774 km^2 y muy bajo en 25,276 km^2 .

Estos valores reflejan la sensibilidad de la ZPRH respecto a la variable precipitación, cuya inclusión introduce una respuesta más consistente con la lógica

hidrológica. Esto se debe a que la recarga hídrica no solo depende de la capacidad intrínseca del terreno para almacenar, infiltrar y percolar agua, sino también de la disponibilidad efectiva de aportes pluviales en relación con el volumen de agua disponible en las diferentes clases.

Con la finalidad de comprender mejor esta sensibilidad frente a la precipitación, pero no solo en términos espaciales sino también temporales, se optó por desagregar el dato anual a nivel estacional: verano (diciembre, enero y febrero -DEF-), otoño (marzo, abril y mayo -MAM-), invierno (junio, julio y agosto -JJA-) y primavera (septiembre, octubre y noviembre -SON-), esto con la finalidad de representar la recarga hídrica como un proceso hidrodinámico y no como un fenómeno estático anual. Asimismo, para identificar posibles patrones territoriales en la distribución de las clases ZPRH, se desagregó también a nivel de macroregiones con la finalidad de analizar la respuesta diferenciada de la recarga efectiva si la disponibilidad pluvial es marcadamente estacional (Figura 6).

La figura evidencia una variabilidad en la distribución espacial y estacional (temporal) de la precipitación, con un máximo en verano (DEF) y una prolongada estación

seca durante el resto del año (MAM, JJA, SON). Esta estacionalidad explica los cambios en la distribución territorial de las diferentes clases ZPRH, que muestra una dinámica de expansión y contracción más acentuada en las clases muy alto, alto y medio durante la época lluviosa. Las variaciones más pronunciadas se observan en las macroregiones del Amazonas, Llanuras y Sabanas del Beni y Chaco, donde las recargas están fuertemente condicionadas por la disponibilidad de aportes pluviales estacionales.

En el resto de macroregiones, la dinámica estacional de las clases ZPRH se resume en tres comportamientos principales: i) descenso de clases en áreas con alto potencial intrínseco, pero limitada por déficit de lluvia, reduciendo su recarga promedio, en el Chaco, Valles, Llanuras y Sabanas del Beni; ii) ascenso de clase en áreas de potencial medio cuando la disponibilidad hídrica es suficiente como en los Yungas Chapare; y iii) persistencia en áreas más resilientes, como la Amazonía, donde el potencial intrínseco del suelo y la precipitación permite una recarga sostenida, debido a una menor dependencia de las variabilidad climática estacional.

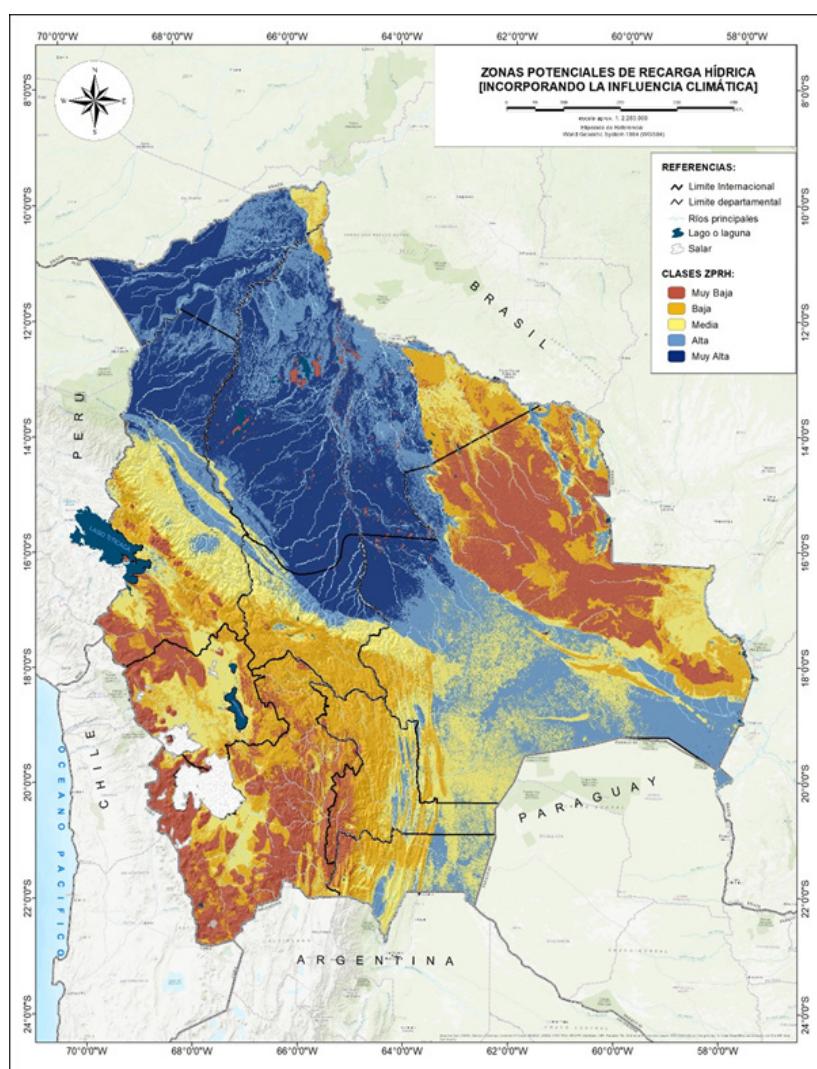


Figura 4. Mapa de ZPRH incorporando la influencia climática (precipitación).

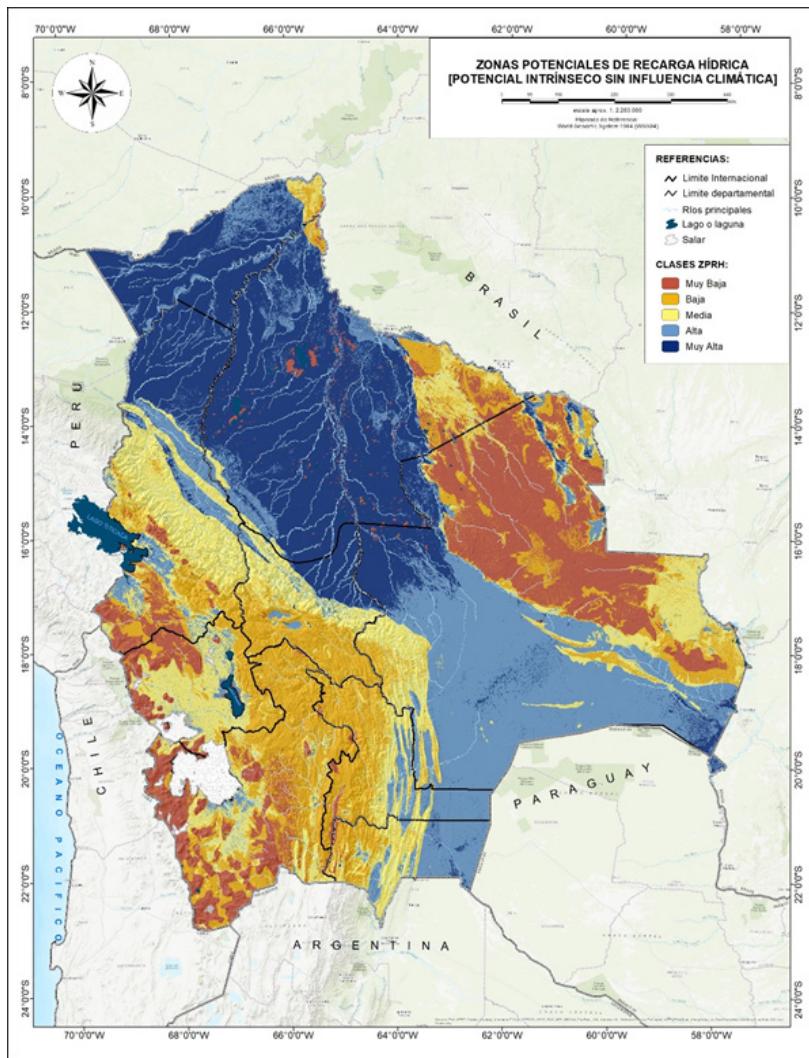


Figura 5. Mapa de ZPRH solo potencial intrínseco sin influencia climática (precipitación).

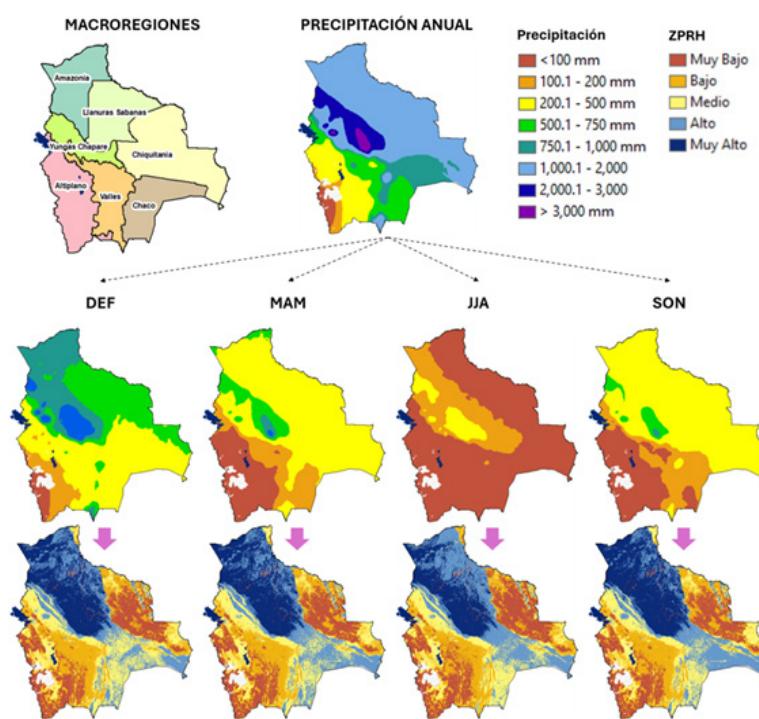


Figura 6. Efecto de la distribución espacial y estacional de la precipitación sobre las ZPRH.

Por otra parte, en la macroregion del Altiplano, la recarga presenta mayor superficie en clases media, baja y muy baja, incluso en áreas donde las condiciones físicas y geológicas del terreno son relativamente favorables para la infiltración y percolación. Sin embargo, la recarga efectiva se ve limitadas por la escasa disponibilidad pluvial, que se intensifica en el sector centro-sur del Altiplano, donde predomina una mayor aridez y elevadas pérdidas por evapotranspiración. En contraste, el norte del Altiplano presenta un comportamiento de recarga más favorable asociado a una mayor pluviosidad estacional, y mejor condición intrínseca del terreno en comparación al resto de la región.

En la macroregion de la Chiquitania, también se tiene una mayor concentración de superficies en clases como media y baja, pese a la presencia de lluvias moderadas durante la estación de verano en comparación con el Altiplano. Esto se debe a la presencia del Escudo Precámbrico Brasileño, el cual es un basamento cristalino de baja permeabilidad compuesto principalmente por granitos, gneises y rocas metamórficas altamente consolidadas, que reduce la infiltración profunda y limita la conexión hidráulica hacia los acuíferos subyacentes (Gardi et al., 2014). En este sentido, la recarga se ve limitada y altamente condicionada a la geología, donde la porosidad es mínima y la infiltración y percolación depende de la presencia de fracturas (Mautner, M., & Esobar, M., 2022). En cambio, donde predominan suelos permeables y acuíferos aluviales (p.e. llanos amazónicos o planicies aluviales), el agua infiltrada y que percola es mayor.

Discusión

La ausencia de multicolinealidad entre las variables (ninguna con $r \geq 0.8$) indica que cada factor aporta información complementaria, como recomiendan estudios de zonificación hidrica. De esta forma las nueve variables fueron incluidas dentro del AHP, cuyas ponderaciones resultantes fueron internamente consistentes, teniéndose una razón de consistencia muy baja ($CR=0.03$), cumpliendo el umbral aceptable ($CR < 0.1$) y confirmando la coherencia de la matriz pareada (Radulović et al., 2022; Chen et al.,

2025). Esto valida que los pesos estimados son confiables para caracterizar las ZPRH según análisis multicriterio aplicado.

Los pesos derivados ubican a la precipitación (PCP) y a la variable hidrogeológica (HGEO) entre los más influyentes ($w = 0.19$ y 0.20), seguidos por la capacidad de almacenamiento (CA), entre otros factores. Esta jerarquía concuerda con investigaciones de otros autores, donde la precipitación suele dominar las estimaciones de recarga. En efecto, la intensidad de lluvia se reconoce frecuentemente como “factor principal” que controla la recarga hídrica (Khenmal et al., 2025; Zahra et al., 2025). Además, estudios previos han enfatizado que sin datos meteorológicos adecuados la ponderación de la precipitación puede subestimarse; nuestro análisis con datos estacionales integrados en las ZPRH muestra su papel crítico.

Al comparar el modelo completo (Ecuación 1) con la versión sin precipitaciones (Ecuación 2), se observa una redistribución lógica de las clases de ZPRH. Incluir la precipitación reduce las áreas clasificadas como muy alto o alto potencial, aumentando las clases media y baja (Tabla 7). Este efecto refleja que la recarga efectiva no sólo depende de las características intrínsecas del territorio (propiedades físicas del suelo, topografía y geología), sino también de la disponibilidad real de agua de lluvia. Estudios similares encuentran que los mapas de recarga varían marcadamente cuando se incorporan el componente climático, al ponderar la lluvia como variable dominante, las zonas de alta recarga disminuyen donde hay un déficit pluviométrico (AGRECOLANDES, 2020; Khenmal et al., 2025).

Por otra parte, el análisis estacional confirma una dinámica marcada por la época de lluvias (verano). En esta época las clases de recarga muy alta y alta se expanden, mientras que en otoño e invierno se contraen. Esto concuerda con la constatación de que “la precipitación es altamente estacional” en climas áridos/semiáridos (Meng et al., 2024; Guzmán-Rojo et al., 2025). Por ejemplo, en la Amazonía y zonas lluviosas los valores de recarga siguen altos la mayor parte del año, pero en el Altiplano y el Chaco las áreas inicialmente con buen potencial intrínseco

Tabla 7. Comparación de la superficie de ecuaciones 1 y 2 según sus clases de ZPRH.

Potencial de recarga	Modelo ZPRH sin precipitación		Modelo ZPRH con precipitación	
	Superficie (Km ²)	%	Superficie (Km ²)	%
Muy Bajo	183,463	16.7	208,730	19.0
Bajo	204,336	18.6	224,110	20.4
Medio	183,463	16.7	212,026	19.3
Alto	236,195	21.5	224,110	20.4
Muy Alto	290,025	26.4	229,603	20.9
TOTAL	1,098,581	100	1,098,581	100

pieren niveles de clase al caer la lluvia, esto debido a la estacionalidad de lluvias y a su menor cantidad en comparación a la Amazonía. En general se puede mencionar que la estacionalidad de las lluvias explica la expansión de las clases más altas durante el verano, como indican los patrones observados en las diferentes macroregiones.

En conjunto, los resultados se alinean con estudios recientes de zonificación de recarga que recomiendan enfoques integrados y sensibles al clima. Al tener dos mapas (con y sin precipitación) logramos distinguir la capacidad intrínseca del terreno y de la influencia climática, como aconsejan autores como (Hernández-Juárez et al., 2020; Khenmal et al., 2025). El mapa ZPRH con precipitación ofrece la evaluación realista de recarga bajo condiciones actuales, mientras el sin precipitación revela áreas con alta aptitud física para infiltración a largo plazo (útil para recarga artificial). Abordar este enfoque mejora la gestión, puesto que otros autores también resaltan la conveniencia de manejar por separado factores permanentes del terreno y fluctuaciones pluviométricas al momento de planificar la gestión de recursos hídricos (Mautner & Esobar, 2022).

Conclusiones

La precipitación, la hidrogeología y la capacidad de almacenamiento del suelo resultaron las variables más influyentes a nivel nacional en la determinación de las ZPRH, lo que concuerda con la literatura donde la recarga está fuertemente condicionada por la disponibilidad pluvial estacional y la aptitud físico-estructural del suelo y subsuelo para infiltrar y transmitir agua. Esto indica que la concentración temporal de las precipitaciones limita la eficiencia de recarga más que el total anual, sugiriendo que la gestión del recurso debe enfocarse en maximizar la retención y aprovechamiento del agua durante los períodos húmedos.

La comparación entre modelos (con y sin precipitación) evidenció una redistribución lógica de las clases ZPRH; la inclusión climática reduce las zonas de potencial muy alto y alto e incrementa clases media y baja en áreas con déficit de lluvia. Esto evidencia que la precipitación condiciona de manera significativa el comportamiento espacial del agua infiltrada. Además, permite identificar zonas con alto potencial intrínseco, pero con déficit pluviométrico, donde podrían implementarse estrategias de recarga artificial para optimizar la disponibilidad de agua subterránea.

Los patrones espaciales de las ZPRH resultantes muestran coherencia con el conocimiento hidrológico y subterráneo regional: altos potenciales en piedemonte Andino-Amazónico y en la Llanura Beniana pero bajos en Altiplano árido y parte del Chaco y Chiquitanía. Lo cual proporciona validación indirecta de las clases de recarga distribuidas espacialmente, aunque requiere confirmación mediante mediciones de campo de la recarga real.

Referencias

- AGRECOLANDES. (2020). Protección de áreas de recarga hídrica y fuentes de agua. <https://www.agrecolandes.org/solidagro/2020/09/22/ciclo-de-webinarios-proteccion-de-areas-de-recarga-hidrica-y-fuentes-de-agua/>
- CATIE. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Serie técnica. Boletín técnico no. 38. ASDI. 21p. Recuperado de: <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENPI10M433.pdf>
- Chamorro-Castillo, K. M. (2016). Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos La Carbonería, Guaracazapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra. Ibarra, Ecuador. Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Recuperado de: <https://revistademorfologiaurbana.org/index.php/rmu/article/view/26>
- Chen, J. (2014). GIS-based multi-criteria analysis for land use suitability assessment in City of Regina. Environmental Systems Research, 3(13). Recuperado de: <http://www.environmentalsystemsresearch.com/content/3/1/13>
- Chen, M., Zhang, S., Liu, S., Li, M., Zhang, T., Wu, T., & Bu, X. (2025). Mapping the groundwater potential zones in mountainous areas of Southern China using GIS, AHP, and fuzzy AHP. Scientific Reports, 15 (17159). Recuperado de: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-01837-y#:~:text=Further%20analysis%20regarding%20multicollinearity%20among,are%20deemed%20reliable%20predictor%20variables>
- Díaz-Pulido, A. P., Chingaté-Hernández, N., Muñoz-Moreno, D. P., Olaya-González, W. R., Perilla-Castro, C., Sánchez-Ojeda, F., & Sánchez-González, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia [Sustainable development and the right to water in Colombia]. Estudios Socio-Jurídicos, 11(1), Pp: 1-18. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-05792009000100005&script=sci_arttext
- Gardi, C., Angelini, M., Barcelo, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonca Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muniz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodriguez, M.I., & Vargas, R. (2014). Atlas de suelos de America Latina y el Caribe, Comision Europea - Oficina de Publicaciones de la Union Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp. Recuperado de: <https://share.google/skRvPjRXDd0M7Cn31>
- Guzmán-Rojo, M., Pérez-Hurtado, C., & Gómez-Vargas, Z. (2025). Nationwide potential groundwater recharge trends in Bolivia: a remote sensing approach and a policy-ready decline indicator. Environmental Research Letters, 20(7), 14p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ade16f>
- Hernández-Juárez, R. A., Martínez-Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A., & Rivera-Reyes, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. Investigaciones Geográficas, (101), 19p. <https://doi.org/10.14350/ig.59892>
- Hsin-Fu, Y., Youg-Sin Ch., Hung-I, L. & Cheng-Haw L. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. Sustainable Environment Research. Volume 26, Issue 1, January 2016, pp: 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>
- IDEAM. (2025). Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos. Servicio Geológico Colombiano. 143p. Recuperado de: <https://www.andi.com.co/Uploads/Guia%20Metodologia%20para%20recarga%20de%20acuiferos..pdf>
- Kaewdum, N. & Chotpantarat, S. (2016). Mapping Potential Zones for Groundwater Recharge Using a GIS Technique in the Lower Khwae Hanuman Sub-Basin Area, Prachin Buri Province, Thailand. Earth Sci. Sec. Hydrophere. Volumen 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.717313>
- Khenmal, H. Y., Hani, A., & Benmarcé, K. (2025). Exploring groundwater recharge potential zones mapping in the northern upper Boussellam region: A novel approach integrating TDS levels. Applied Water Science, 15(103). <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02413-5>
- Maciel, F., & Zampieri, F. (2018). Atributos morfológicos configuracionais e copresença em loteamentos residenciais dispersos de cidades médias brasileiras [Configurational morphological attributes and copresence in dispersed residential subdivisions in medium-sized Brazilian cities]. Recuperado de: <https://revistademorfologiaurbana.org/index.php/rmu/article/view/26>
- Mautner, M., & Esobar, M. (2022). Chiquitanía rural water supply:

Considering decentralized water infrastructure and land use change in hydrologic analysis (SEI Factsheet). Stockholm Environment Institute. 6p. Recuperado de: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2022/01/220122a-burton-mautner-atajados-fact-sheet-2114b.pdf#:~:text=the%20Chiquitano%20dry%20forest%20lies,variable%20and%20hard%20to%20characterize>

Meng, F., Khan, M. I., Naqvi, S. A. A., Sarwar, A., Islam, F., Ali, M., Tariq, A., Ullah, S., Soufan, W., & Faraj, T. K. (2024). Identification and mapping of groundwater recharge zones using multi influencing factor and analytical hierarchy process. *Scientific Reports*, 14, 19240. Recuperado de: https://www.nature.com/articles/s41598-024-70324-7?error=cookies_not_supported&code=b36ada28-a098-4e32-b609-b3eff03219fc#:~:text=Groundwater%20results%20from%20the%20interaction,source%20of%20freshwater%20supply%2027

Peñuela Arévalo, L. A., & Carrillo Rivera, J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*, (81), 18-32. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n81/n81a3.pdf>

Radulović, M., Brdar, S., Mesaros, M., Lukić, T., Savić, S., Basarin, B., Crnojević, V., & Pavić, D. (2022). Assessment of groundwater potential zones using GIS and fuzzy AHP techniques—A case study of the Titel Municipality (Northern Serbia). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(4). 257p. <https://doi.org/10.3390/ijgi11040257>

Rodríguez, J. P., Suazo, Á., & Santelices, I. (2016). Análisis por medio de la normalización de variables para un modelo de planificación ambiental hídrica estacional [Analysis by means of variable normalization for a model of seasonal water environmental planning]. *Obras y Proyectos*, (20), 56-65. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132016000200006>

Saaty, R. W. 1987. Analytic Hierarchy Process. *Mathematical Modelling*. Vol. 9, Nro. 3-5. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Servicio Geológico Minero (SERGEMIN). (2002). Mapa Hidrogeológico de Bolivia. ESCALA 1:1.000.000. Recuperado de: <http://ide.sergeomin.gob.bo/hlgsgm/>

U.S. Geological Survey. (USGS). (2018). SWB—A Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for Estimating Groundwater Recharge (Techniques and Methods 6-A61). Reston, VA. Techniques and Methods 6-A31. Chapter 31. 72p. Recuperado de: <https://pubs.usgs.gov/tm/tm6-a31/tm6a31.pdf>

Zahra, H., Sajjad, A., Sajid, S. H., Iqbal, M., & Khan, A. H. A. (2025). Identification of groundwater recharge potential zones in Islamabad and Rawalpindi for sustainable water management. *Water*, 17(23), 3392p. <https://doi.org/10.3390/w17233392>