



Estimación de la recarga potencial de agua subterránea de un acuífero mediante teledetección y sistemas de información geográfica

Estimation of potential groundwater recharge of an aquifer through remote sensing and geographical information systems

 Rafael Adrián Maddio^{1*}   Ana Cecilia Dufilho^{1,2}   Marcelo Luciano Gandini³ 

* Contacto

Recibido: 24 de marzo de 2022 • Aceptado: 02 de septiembre de 2022 • Publicado: 31 de julio de 2023

Resumen

Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas ocupan 41% de la superficie continental terrestre. En estas áreas los recursos hídricos son limitados y se encuentran bajo una severa y creciente presión debido a la expansión de la población, el incremento del uso per cápita y la irrigación. El agua subterránea, ya sea freática o confinada, constituye un factor importante, dado que puede ser una fuente que sirva para suplementar el suministro de otras fuentes o constituir la fuente principal de agua de la zona. El presente estudio se realizó en el acuífero Zapala, provincia del Neuquén, República Argentina. Se implementó el índice de recarga potencial a partir de información obtenida de sensores remotos e información geohidrológica, mediante geoprocesamiento en un Sistema de Información Geográfica. Se encontró que 54% del área de estudio presenta moderado potencial de recarga, 43% buen potencial y 3% muy buen potencial. La recarga anual estimada fue de 74 hm³/año, un 63% de precipitación promedio anual. Este resultado fue comparado con estudios previos realizados por otros autores con diferentes métodos. La recarga anual obtenida se encuentra dentro del rango de variación de dichos estudios, por lo que el índice se muestra como una buena aproximación para la estimación de la recarga.

Palabras clave: acuífero Zapala, teledetección, proceso de análisis jerárquico.

1. Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud, Universidad Nacional del Comahue

2. Centro de investigación en Geociencias de la Patagonia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue

3. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Abstract

The arid, semi-arid, and sub-humid zones cover 41% of the land surface. In these areas, water resources are limited and are under severe and increasing pressure due the increase in population, in per capita use, and in irrigation. Groundwater, whether phreatic or confined, it is an essential water resource to supply for water in the area. This study was carried out in the Zapala aquifer, Neuquén province, Argentine Republic. An index was implemented to estimate aquifer potential recharge from remote sensors data and processing with a Geographic Information System. It was found that 54% of the study area has a moderate recharge potential, 43% has a good potential, and 3% has a leading potential. The estimation of the annual recharge was 74 hm³ /year, 63% of the average annual precipitation. Compared to previous studies carried out by other authors with different methods. The annual recharge obtained are within the range of variation of these studies, so the index is shown as a good approximation for estimating recharge.

Keywords: Zapala aquifer, remote sensing, hierarchical analysis process.

Introducción

Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas, son aquellas zonas en las que la proporción entre precipitación anual y evapotranspiración potencial está comprendida entre 0,05 y 0,65, excluidas regiones polares y subpolares (Barbosa y Weynants, 2018). Estas zonas ocupan un 41% de la superficie continental terrestre y son habitadas por el 38% de la población mundial de 6.500 millones de seres humanos (Reynolds *et al.*, 2007). Los recursos hídricos son limitados, y se encuentran bajo una severa y creciente presión, debido a la expansión de la población, el incremento del uso per cápita e irrigación (Wheater, 2007).

La República Argentina, ubicada en el extremo sur del continente americano, posee una superficie total de 3.761.274 km², incluido el territorio antártico e Islas del Atlántico Sur, siendo el octavo país del mundo en superficie (Instituto Geográfico Nacional, 2020). Es el país de América Latina con mayor superficie árida, semiárida y subhúmeda seca, abarcando el 75% del territorio nacional. Las tierras secas de Argentina producen el 50% del valor de producción agrícola, el 47% de la ganadera, y concentran aproximadamente el 30% de la población nacional (9 millones de personas) (Pérez Pardo *et al.*, 2005). Las actividades productivas más importantes se desarrollan en los oasis de riego, que totalizan alrededor de 1,5 millones de hectáreas. Además, concentran 100% de los caprinos y camélidos, el 80% de los ovinos y el 40% de los bovinos (Pérez Pardo *et al.*, 2005).

Múltiples factores determinan la ocurrencia del agua subterránea en acuíferos libres y semiconfinados, incluyendo topografía, litología, estructuras geológicas, profundidad y meteorización de las rocas, extensión de fracturas, porosidad primaria y secundaria, patrones de drenaje, geoformas, usos y coberturas, y clima (Martínez de Azagra, 1996; Yeh *et al.*, 2009; Khodaei y Nassery, 2011). Además, depende de tres procesos importantes, la infiltración de agua superficial para convertirse en humedad de suelo, el flujo subsuperficial o flujo no saturado a través del suelo, y el flujo de agua subterránea o flujo saturado a través del suelo o roca (Chow, 2000). El estudio de estos factores y procesos a través de

métodos de campo puede resultar poco viable, debido a la accesibilidad a los sitios de observación, los costos, el tiempo y el requerimiento de mano de obra calificada. Además, en los países en desarrollo, existe una débil infraestructura, así como una baja accesibilidad y escasez de datos (Avtar *et al.*, 2010).

En este contexto, cabe destacar que los estudios basados en los sensores remotos satelitales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han demostrado ser de gran utilidad y bajo costo, para cartografiar y monitorear recursos hídricos (Yeh *et al.*, 2009; Khodaei y Nassery, 2011, Tumare *et al.*, 2014; Macas-Espinosa y López-Escobar, 2018). En el presente estudio, se aplicó un índice para estimar la recarga potencial utilizando parámetros derivados de sensores remotos satelitales y datos geohidrológicos procesados mediante SIG, en el acuífero Zapala, provincia del Neuquén, República Argentina.

Materiales y métodos

El estudio tuvo lugar en el área comprendida por el acuífero Zapala, alojado en la formación La Bardita, cuyos límites se encuentran en discusión (Duffilho, 2017). La formación La Bardita de edad miocena se depositó sobre rocas mesozoicas y está cubierta por rocas eruptivas en la zona central y oeste y por sedimentos modernos hacia el noreste. Se trata de una sucesión de niveles conglomerádicos polimícticos a los que se encuentran asociados areniscas, fangolitas, y tufitas. Estos niveles, pueden alcanzar individualmente hasta 1 m de espesor y poseen clastos bien redondeados de volcánitas mesosilíceas de tonos oscuros que alcanzan hasta 5 cm de diámetro (Leanza *et al.*, 2001). En el área se encuentran las formaciones continentales Las Coloradas (Pleistoceno) y Pampa Encina (Plioceno), constituidas por conglomerados y areniscas. Las rocas eruptivas del área son las formaciones Michacheo (Mioceno), Zapala (Plioceno), Macho Viejo (Pleistoceno), Los Mellizos (Pleistoceno) y Laguna Blanca (Plioceno), que se presentan bajo el aspecto de extensos mantos lávicos y piroclastos. Las coladas están dispuestas subhori-

zontalmente y exhiben muy escasa a nula deformación. Su litología, corresponde a basaltos olivínicos que se caracterizan por sus dominantes tonalidades gris plomo, de textura granosa fina, constituida por un mineral máfico alterado en partes y feldespato (Leanza *et al.*, 2001). Los sedimentos modernos están formados por gravas, arenas y limos de origen aluvial y remoción en masa mientras que los depósitos más finos se ubican en los bajos y mallines (Leanza *et al.*, 2001).

En la Figura 1 se presenta en rojo el límite del acuífero considerado en este estudio que abarca 838 km² y comprende la totalidad de la formación La Bardita, mientras que en amarillo se representa el acuífero detrítico con un área de 207 km². El acuífero detrítico de alta productividad se utiliza para el abastecimiento de agua potable para la población de la ciudad de Zapala, mientras que el otro límite considera además las zonas de menos productividad (acuíferos pobres y acuitardos) que sirven de aprovisionamiento de agua para los pobladores rurales.

El área está limitada por la cuenca del arroyo Covunco al noroeste, hacia el sur por el arroyo Santo Domingo, al oeste por el lago Laguna Blanca y al este por estribaciones que presentan vertientes de la Fm. La Bardita. Hacia el oeste, la existencia de coladas volcánicas determina un relieve mesetiforme, plano a suavemente inclinado con pendiente inferior al 12%, mientras que, hacia el este, el relieve es de colinas suaves debido a la presencia de rocas sedimentarias pedimentadas. El relieve es maduro y estable en el 90% del

área, con zonas inestables por arriba de los 1400 m s.n.m. correspondiente a picos volcánicos, y por debajo de los 900 msnm correspondiente a los taludes pronunciados en los bordes de las coladas volcánicas y las laderas de los valles aluviales del arroyo Santo Domingo al sur.

La precipitación se estima entre 180 mm/anales (Bastianelli *et al.* 2016, periodo 1990-2015), los mayores registros se observan hacia el oeste, decreciendo hacia el este (Bonorino *et al.*, 2002). Las temperaturas máximas pueden superar los 40°C y las temperaturas mínimas descender a -14°C. La temperatura media en el mes de enero, máxima en el año, es de alrededor de 22°C, mientras que en los meses de junio y julio se registran las mínimas con una media de -6°C durante varios días. La humedad relativa media ronda 55% con fuerte predominio de la aridez en el clima. La evapotranspiración estimada mediante el método de Penman-Monteith es de 1364 mm/año, mientras que la estimada mediante el método de Thornthwaite es de 730 mm/año, considerándose el máximo y mínimo probable para el área (Bonorino *et al.*, 2002). Dentro del área, los cauces son efímeros, únicamente activos durante fuertes precipitaciones, forman una red de drenaje poco desarrollada con fuerte control estructural en la zona de afloramientos lávicos. Existen, además numerosas lagunas temporarias asociadas al acuífero libre, ubicadas en los bajos. El llenado y vaciado de estas lagunas demuestra la importancia de las precipitaciones, la rápida infiltración, y evidencia la existencia de un sistema acuífero acotado y de

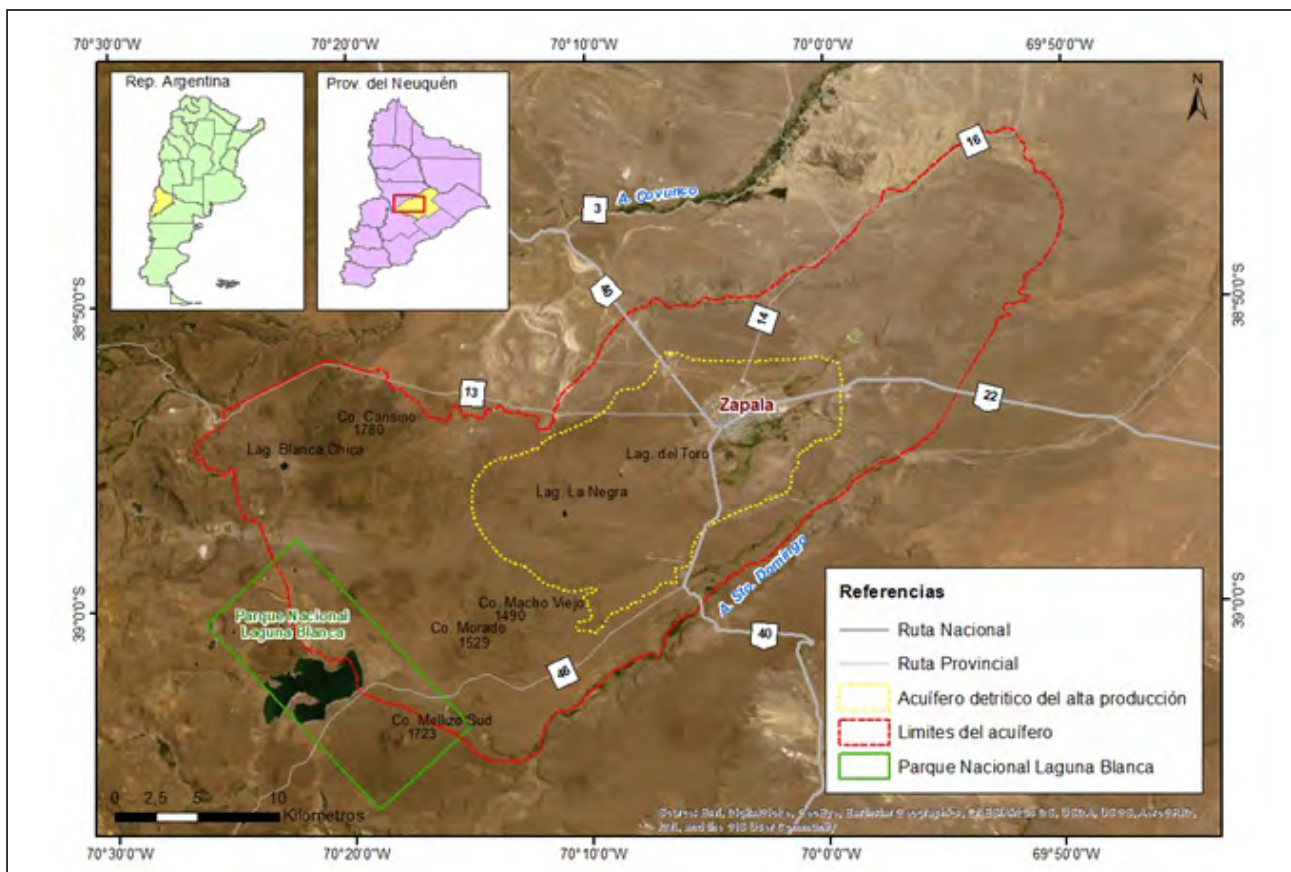


Figura 1. Área de estudio. Imagen base: ESRI World Imagery Tile Layer, color natural.

rápida respuesta (Bastianelli *et al.* 2016).

La estepa arbustiva impera en el área, predominan arbustos xeromórficos con abundantes espinas, hojas resinosas pequeñas y profundas raíces. Cubriendo una menor superficie y en forma discontinua aparece la estepa herbácea constituida por pequeñas plantas anuales y algunas gramíneas perennes. La vegetación se encuentra dispersa, con porcentajes de cobertura entre 30 y 40% (Matteucci *et al.* 2012), y en sitios de pastoreo excesivo se encuentra una mayor longitud interparche, una disminución en la cobertura basal, menor cobertura de gramíneas palatables y mayor de no palatables (Gaitán *et al.* 2009^a). Pese a las condiciones generales de escasez de agua, es posible encontrar en el paisaje pequeñas "islas" de vegetación hidrófila y mesófitas, localmente denominados mallines o vegas. Son sitios en los que el agua permanece en el horizonte del suelo en forma permanente, dando lugar a la formación de abundante materia orgánica, alta densidad de individuos de especies y cobertura vegetales total entre 90 y 100% (Gaitán *et al.*, 2009^b; Ramilo *et al.*, 1993).

El Índice de Recarga Potencial (IRP) se estimó siguiendo la metodología propuesta por Yeh *et al.* (2009). El IRP se obtuvo de acuerdo con la ecuación 1.

$$IRP = \sum w_i r_i \quad (1)$$

Dónde w_i es el peso del factor i -ésimo, r_i es la tasa del factor, y los subíndices se refieren a las características individuales de un factor.

Los factores seleccionados para el análisis fueron la litología y suelos, los usos y la cobertura del suelo, y se decidió incorporar el Índice Topográfico de Humedad (ITH) de Carson y Kirkby (1972), en reemplazo de las pendientes, la densidad de lineamientos y la densidad de la red de drenaje, como se explica en párrafos posteriores. Se asignó pesos a las categorías individuales de cada factor en base a revisión bibliográfica, utilizando la herramienta reclassify del SIG. Luego, se obtuvo el IRP como la suma ponderada de factores en la calculadora raster. La capa temática obtenida correspondiente al IRP fue clasificada en cinco intervalos iguales correspondientes a las categorías de potencial recarga: muy buena, buena, moderada, moderadamente baja y baja.

Los materiales utilizados fueron:

- Imagen satelital Landsat 8: path: 232, row: 87, tomada el 25 de febrero de 2016, descargada del sitio web del United State Geological Survey (2016) en su formato de procesamiento nivel 2.

- Modelo digital de elevaciones (MDE): SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Void Filled 1 Arc-second Global descargado del sitio web del USGS (2016). Los datos de elevación de este producto presentan relleno de huecos, una resolución espacial de 30 metros, con una precisión horizontal y vertical cercana a 20 metros y 16 metros respectivamente (error lineal al 90% de confianza) (Smith y Sandwell, 2003).

- Cartas geológicas: 3969-I Zapala (Leanza *et al.* 2001) y 3969-III Picún Leufú (Leanza *et al.* 1997), ambas de escala 1:250.000.

- Datos de precipitaciones: capa temática de precipitaciones medias anuales extraída del SIG-OTA (Dufilho *et al.* 2002) en formato ESRI shape file. Los datos pluviométricos corresponden al periodo 1921-1950, compilados por el Servicio Meteorológico Nacional (Arroyo, 1980),

- Software: ArcGIS 10.6.

Los datos de litología y suelos fueron digitalizados a partir de las cartas geológicas. Las hojas fueron escaneadas, y posteriormente georreferenciadas en ArcGIS mediante la herramienta georeferencing. La escala fue aumentada mediante la interpretación visual de imágenes satelitales Landsat 8 y el sombreado topográfico obtenido del MDE SRTM mediante la herramienta *hillshade*. Se generó una capa vectorial con la interpretación, que posteriormente se transformó a formato ráster con la herramienta *polygon to raster*. Se obtuvo un ráster de resolución espacial 30 m.

La capa temática de coberturas y usos del suelo se construyó a partir de la clasificación supervisada de la imagen satelital, aplicándose las categorías del sistema de Clasificación Modificado de UNESCO (MUC) de nivel 1 (Global Learning and Observations to Benefit the Environment, 2005) (Tabla 1). Para la clasificación se utilizó el algoritmo de clasificación de máxima probabilidad. Posteriormente se evaluó la exactitud de la clasificación mediante una matriz de confusión (Global Learning and Observations to Benefit the Environment, 2005), tomando 100 puntos de control obtenidos mediante un muestreo aleatorio. Además, en campo se cuantificó la proporción de suelo cubierto por plantas, rocas, mantillo y costra biológica, mediante 35 líneas de intercepción, siguiendo la metodología de Herrick *et al.* (2017).

Se decidió utilizar el ITH debido a la ausencia de lineamientos en el área y el escaso desarrollo de la red de drenaje. Este índice modela la dinámica de los flujos superficiales basado en el control topográfico del escurrimiento, combina la contribución al escurrimiento de un área local drenada y la pendiente de esta, y es comúnmente usado para cuantificar el control topográfico sobre los procesos hidrológicos (Carson y Kirkby, 1972). Para el cálculo del ITH se obtuvo primeramente la tangente de la pendiente expresada en radianes (TS, por su sigla en inglés), y el área de contribución aguas arriba en m^2 (UCA, por su sigla en inglés). Para calcular la TS se obtuvo la pendiente en grados mediante la herramienta *slope*, y luego se transformó en radianes con la calculadora ráster mediante la Ecuación (2). Seguidamente, se calculó la TS, reemplazando los valores de pendiente de valor cero por una constante para evitar la división por cero (Ecuación 3). El UCA se obtuvo a partir de la capa de acumulación de flujo obtenida con la herramienta *flow accumulation* que calcula el flujo acumulado como el peso acumulado para cada celda, determinado por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente (Environmental Systems Research Institute, 2022). Se sumó una

Tabla 1: Clases de usos y coberturas MUC. Fuente GLOBE, 2005.

MUC Código	Clases MUC de Nivel 1	Cobertura Precisa
0	Bosque Cerrado	>40% árboles, al menos de 5 metros de alto con copas tocándose
1	Zona Arbolada	>40% árboles al menos de 5 metros de alto, no se tocan las copas
2	Zona Arbustiva o de Matorral	>40% de arbustos o matorrales, entre 0,5 m. y 5 m. de altura
3	Arbustos Enanos o Subarbustivo	>40% de arbustos por debajo de 0,5 m. de altura
4	Vegetación Herbácea	>60% de plantas herbáceas, hierba, y otras (de hoja ancha)
5	Suelo Desnudo	<40% de cobertura vegetal
6	Humedales	>40% de cobertura vegetal, incluye pantanos, marismas.
7	Cuerpos de Agua	>60% de cuerpos de agua
8	Zona de Cultivo	>60% especies agrícolas
9	Urbano	>40% cobertura urbana (construcciones, áreas asfaltadas)

constante a la acumulación de flujo para evitar el logaritmo natural de cero, y se multiplicó por el área del píxel (Ecuación 4). Finalmente, el ITH se obtuvo siguiendo la Ecuación 5. La capa resultante fue clasificada en cuatro clases por rupturas naturales.

$$SR = \frac{slope \times 1,570796}{90} \quad (2)$$

$$TS = con(SR > 0, tan(SR), 0,001) \quad (3)$$

$$UCA = (FlowAccumulation + 1) \times 900 \quad (4)$$

$$ITH = \ln \frac{UCA}{TS} \quad (5)$$

Se analizaron los factores litología y suelos, usos y coberturas del suelo, flujo de acumulación y pendientes mediante un proceso de análisis jerárquico para establecer el peso de cada uno siguiendo la metodología de comparación de pares propuesta por Saaty (1980). Se calculó el índice de consistencia (IC) y la razón de consistencia (RC) para estimar el grado de consistencia de la asignación de pesos en la matriz de comparación de pares (Ecuaciones 6 y 7).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$RC = \frac{IC}{RI} \quad (7)$$

El término λ_{max} es el valor característico promedio de los pesos asignados en la matriz de comparación de pares, n el tamaño de la matriz y RI la razón de inconsistencia. Para obtener λ_{max} , se calculó el vector de pesos W como el promedio de los componentes de cada fila de la matriz de com-

paración de pares. Se multiplicó la matriz por el vector W para obtener el vector V. Se dividió los componentes V por los componentes W para obtener V''. Finalmente, se obtuvo el valor de λ_{max} como un promedio de los componentes del vector V''. RI es un índice aleatorio tabulado por Saaty (1980).

Se realizaron 41 ensayos de infiltración con infiltrómetros de doble anillo, uno de diámetro interno de 20 cm y altura de 30 cm, y otro de 6,03 cm de diámetro interno y 17,5 cm de altura. Los anillos se insertaron en el suelo a la profundidad mínima necesaria para evitar la fuga de agua durante el ensayo. Los datos obtenidos de campo se volcaron en una planilla registrándose las distintas alturas de agua y los tiempos correspondientes. Los intervalos de tiempo fueron 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; 2,00; 3,00; 5,00; 6,00; 10,00; 15,00; 20,00; 25,00 y 30,00 minutos. La capacidad de infiltración del suelo (mm/h) se obtuvo haciendo el cociente entre cantidad de agua infiltrada y el intervalo de tiempo mediante la ecuación de Horton.

Finalmente, se estimó la recarga anual multiplicando la capa del IRP y la capa de precipitaciones medias anuales en la calculadora ráster. Para esto, primero se convirtió a formato ráster la capa vectorial de precipitaciones con la herramienta *polygon to raster*. Se obtuvo un ráster de tamaño de píxel de 30 m. El resultado obtenido fue comparado con la estimación obtenida por Carrica *et al.* (1997) y Bonorino *et al.* (2002) mediante métodos hidrológicos, y el índice geohidrológico aplicado por Gatica *et al.* (2018).

Resultados

La capa de litología y suelos (Figura 2) mostró que el área presenta un 4% de afloramientos de la formación La Bardita, las formaciones continentales Las Coloradas (Pleistoceno) y Pampa Encina, abarcan 8% y 0.98% del área respectivamente, las rocas eruptivas representan aproximada-

mente 55% de los afloramientos del área y los sedimentos modernos cubren el 32% del área.

Se obtuvo la capa de uso y cobertura del suelo (Figura 3) con una precisión global de 88%. La categoría de cobertura predominante para el área es de tipo subarbusitivo con un 66,9% del total del área, seguida por facies de matorrales arbustivos (12%), áreas de vegetación herbácea (10,2%), suelo desnudo (6,3%), zonas urbanizadas (3,6%), cuerpos de agua (0,5%), y humedales (0,4%).

La Tabla 2 presenta los porcentajes de cobertura de suelo promedio para las principales formaciones obtenidos mediante las transectas. La cobertura total promedio para el

área de estudio es de 62,08%, con un mínimo de cobertura total de 50% en los Depósitos que Cubren Superficies Pedimentadas de Flanco, y cercanos al 100% en los Depósitos de Bajos y Mallines, aunque no se realizaron mediciones en esta formación. La cobertura basal observada es baja debido a la baja densidad de individuos que presentan estos ambientes. La proporción de suelo desnudo promedio es de 37,92%. La cobertura del sustrato por rocas, lecho rocoso y mantillo favorece la infiltración y ofrece protección al suelo frente a procesos de erosión. La cobertura foliar del área no supera el 50%, a excepción de los depósitos de bajos, mallines (humedales) y lagunas (cuerpos de agua), donde la cobertura foliar corresponde en su totalidad a vegetación herbácea y es

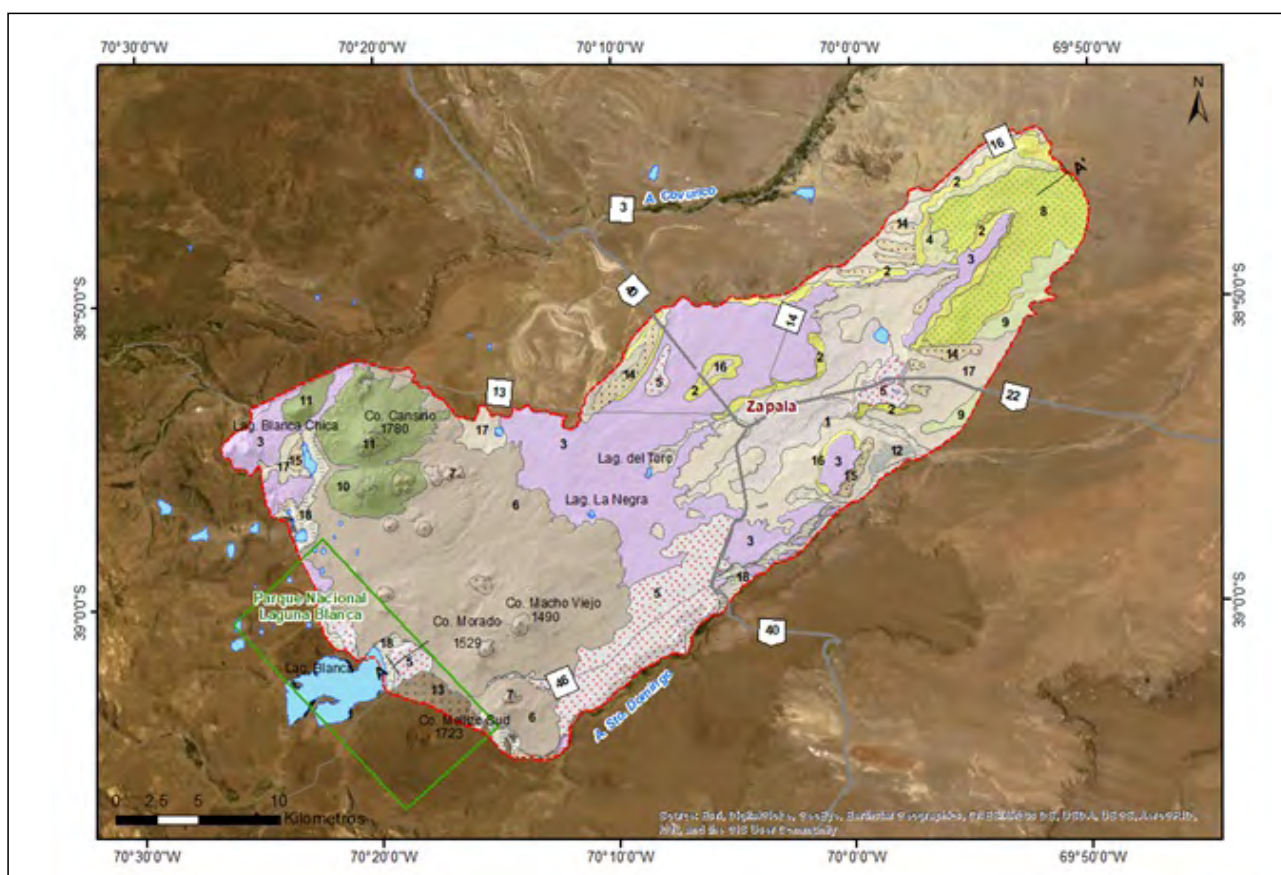


Figura 2. Litología y suelos del área de estudio. Fuente: Leanza et al. (1997, 2001).

Tabla 2: Cobertura del suelo por formación geológica.

Formación	n	Cobertura total %	Cobertura foliar %	Cobertura basal %	Suelo desnudo %
Basalto Macho Viejo facies lávica	14	64,08	30,54	1,54	35,92
Basalto Zapala facies lávica	8	65,33	45,44	1,33	34,67
Depósitos aluviales actuales	1	62,00	47,00	2,00	38,00
Depósitos aluviales coluviales	3	60,33	44,67	2,33	39,67
Depósitos que cubren superficies pedimentadas de flanco	2	50,00	40,00	4,00	50,00
Las Coloradas	7	70,71	36,57	4,14	29,29

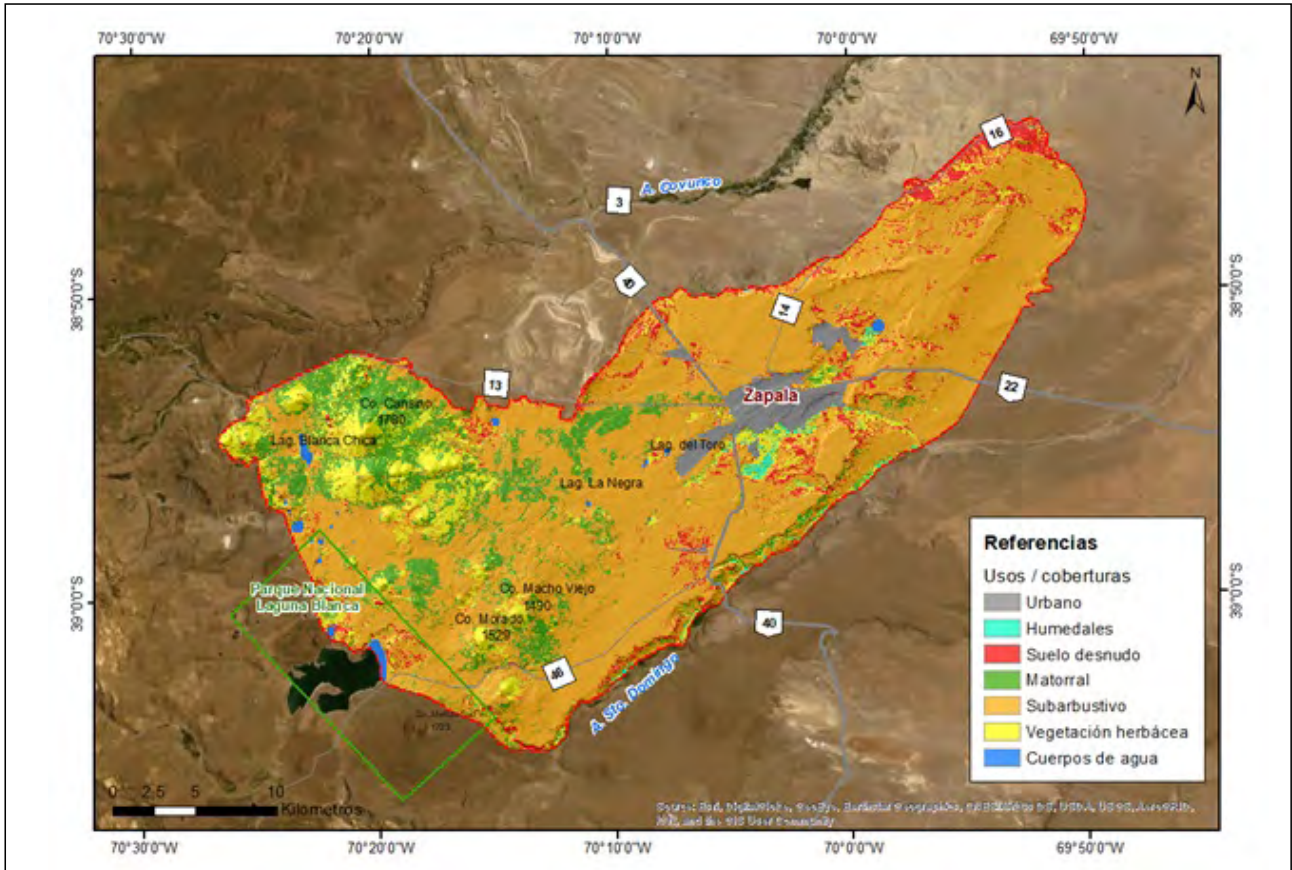


Figura 3. Uso y cobertura del suelo del área de estudio.

Tabla 3. Matriz de comparación de factores.

	Flujo acumulado	Pendiente	Litología y suelos	Uso y cobertura	Suelo desnudo %
Flujo acumulado	1	1	1/3	3	35,92
Pendiente	1	1	1/3	3	34,67
Litología y suelos	3	3	1	5	38,00
Uso y cobertura	1/3	1/3	1/5	1	39,67
Suma	5,33	5,33	1,83	12	50,00
Las Coloradas	7	70,71	36,57	4,14	29,29

cercana al 100%. La baja altura de la vegetación de la estepa arbustiva hace despreciable el efecto de la caída de las gotas de lluvia desde las ramas.

El ITH presentó un valor mínimo de 5,95 y un máximo de 27,98, con una media de 11,22, y un desvío estándar de 2,22. Las cuatro categorías obtenidas representan áreas de alta pendiente y baja acumulación de flujo (<10,3), áreas planas con baja acumulación de flujo (10,3-12,5), depresiones que favorecen la acumulación de flujo (12,5-15,8), y áreas de baja pendiente y alta acumulación de flujo, coincidentes con cauces temporarios y lagunas (>15,8) (Figura 4). Las categorías comprendieron 33%, 42%, 20% y 5% del área, respectivamente.

Los resultados del análisis de las relaciones entre factores mediante la matriz de comparación de pares de Saaty se presentan en la Tabla 3. La litología y suelos obtuvieron la mayor importancia, le siguieron el flujo acumulado, las pendientes, y en último lugar el uso y cobertura de suelo. El valor característico promedio fue de 4,022 (Tabla 4). Los resultados del análisis jerárquico fueron consistentes, obteniéndose un índice de consistencia de 0,007, y una razón de consistencia de 0,008, tomando una consistencia aleatoria para un n de 4 igual a 0,9. La mayor valoración fue asignada a la litología y suelos (5) debido a que afecta directamente la conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, y consecuentemente la recarga de agua subterránea. El ITH comprende las pendientes y el flujo acu-

Tabla 4. Matriz normalizada y vector de prioridad.

	Flujo acumulado	Pendiente	Litología y suelos	Uso y cobertura	W	V	V'
Flujo acumulado	0,188	0,188	0,182	0,250	0,202	0,811	4,020
Pendiente	0,188	0,188	0,164	0,250	0,197	0,793	4,024
Litología y suelos	0,563	0,563	0,545	0,417	0,522	2,115	4,054
Uso y cobertura	0,063	0,063	0,109	0,083	0,079	0,317	3,990
Suma	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		ΛMAX = 4,022
Las Coloradas	7	70,71	36,57	4,14	29,29		

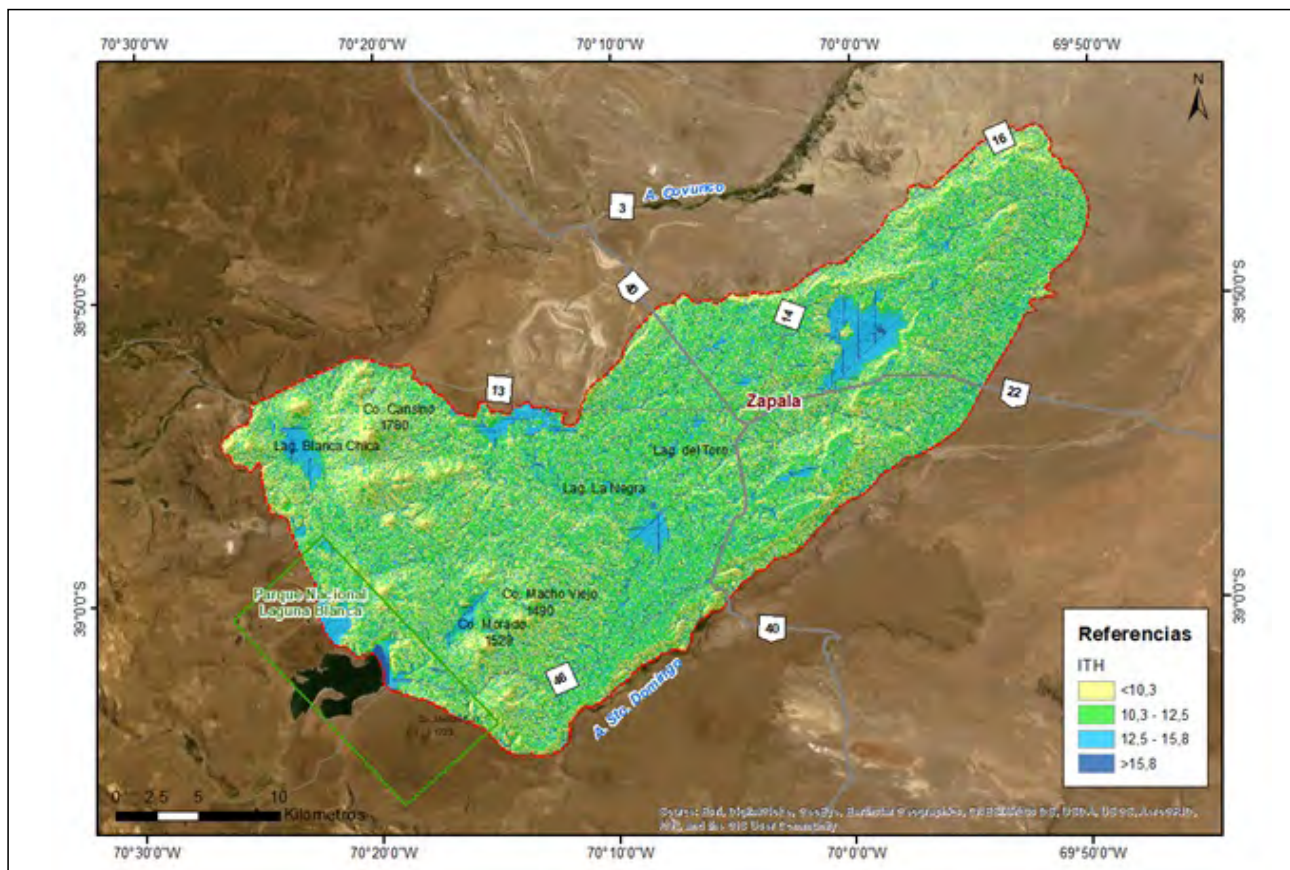


Figura 4. Índice Topográfico de Humedad.

mulado, y se le asignó un valor de 4. La menor valoración fue asignada a uso y cobertura (1).

La Tabla 5 presenta los pesos asignados a las categorías de cada factor. Los pesos de la litología y suelos fueron asignados de acuerdo con la estructura y grado de meteorización que presentan las formaciones. En el caso de los basaltos se valoró los mismos considerando su antigüedad, asignando los menores valores a los basaltos más antiguos, debido a que, en zonas áridas tras largos períodos secos, pequeñas partículas de sedimentos finos se depositan ocluyendo los poros (Martínez de Azagra, 1996). En el caso del factor usos y coberturas, se consideró la cobertura foliar y la densidad de individuos de las coberturas vegetales. La cobertura foliar influye en la interceptación de la precipitación, mientras que la densidad de individuos aumenta la cobertura basal, disminu-

yendo la velocidad de escorrentía superficial y consecuentemente aumenta el tiempo disponible para la infiltración. La cobertura urbana obtuvo la menor puntuación debido a la alta proporción de superficies impermeables que presenta este uso del suelo. Los humedales también obtuvieron una baja puntuación debido a que en el área de estudio representan áreas de descarga. La mayor puntuación de cobertura fue asignada a las lagunas y cuerpos de agua, que corresponden a topografías bajas que representan áreas de recarga en valles aluviales áridos. Las categorías del ITH fueron ponderadas en función de su posición topográfica, puntuándose de mayor a menor valor del índice.

La capa temática correspondiente al IRP permitió identificar las zonas de recarga potencial muy buena (80-100), buena (60-80) y moderada (40-60). No se encontraron zonas

Tabla 5. Factores ponderados.

Factor	Propiedad del efecto	Peso	Valoración	Peso asignado
Litología y suelos	Basalto Laguna Blanca	7	5	35
	Basalto Los Mellizos facies piroclástica	10		50
	Basalto Los Mellizos facies lávica	9		45
	Basalto Michacheo	7		35
	Basalto Macho Viejo facies piroclástica	10		50
	Basalto Macho Viejo facies lávica	7		35
	Basalto Zapala facies lávica	6		30
	Depósitos aluviales actuales	7		35
	Depósitos aluviales y coluviales	6		30
	Depósitos de bajos, mallines y lagunas	6		30
	Depósitos de remoción en masa	9		45
	Depósitos que cubren superficies pedimentadas de flanco	9		45
	Depósitos de terrazas del cañadón Santo Domingo	6		30
	Depósitos del antiguo abanico aluvial del cañadón Santo Domingo	6		30
	Depósitos que cubren el primer nivel de pedimentos	6		30
	Formación Las Coloradas (continental)	6		30
	Formación Pampa Encina (continental)	6		30
	Formación La Bardita (continental)	6		30
Usos y coberturas	Arbustivo o Matorral	5	1	5
	Subarbustivo	6		6
	Vegetación Herbácea	7		7
	Suelo Desnudo	4		4
	Humedales	3		3
	Cuerpos de Agua	10		10
	Urbano	1		1
ITH	>15.8	10	4	40
	12.5-15.8	8		32
	10.3-12.5	6		24
	<10.3	4		16

de recarga moderadamente baja (20-40) y baja (0-20) (Figura 5). La superficie correspondiente a la recarga potencial moderada representa un 54%, y corresponde principalmente a las formaciones Basalto Zapala, Las Coloradas y Depósitos de Bajos, Mallines y Lagunas. Las áreas de recarga potencial buena representan un 43% del área y se ubican sobre las formaciones Basalto Macho Viejo facies lávica y Basalto Los Mellizos facies lávica. Las áreas de muy buen potencial de recarga abarcan un 3% del área y se corresponden con las formaciones Lagunas Blanca, Blanca Chica, La Negra; y cursos de drenaje intermitentes. El potencial de infiltración disminuye en aquellas áreas de altas pendientes, rocas poco meteorizadas, y/o texturas muy finas. En el área, las mayores pendientes corresponden a los conos volcánicos formados por las facies piroclásticas de las formaciones basálticas, que

presentan textura gruesa y una alta capacidad de infiltración. Por otra parte, los bajos y depósitos de texturas más finas tienen una rápida respuesta a las precipitaciones, fluctuando como área de recarga y descarga. Debido a esto, no se registraron áreas de bajo y moderadamente bajo potencial de infiltración.

La Figura 6 muestra los sitios de ensayo de infiltración y la Tabla 6 presenta la infiltración básica promedio y desvío estándar de cada formación ensayada. En todos los casos se observó una alta capacidad de infiltración al inicio de los ensayos, coincidente con la ausencia de precipitaciones durante un periodo de 30 días previo a la realización. La totalidad de los ensayos evidenciaron una alta capacidad de infiltración básica, correspondiente a suelo de textura arenosa y

areno limosos, correspondientes a suelos del grupo A de la clasificación hidrológica de suelos del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972). Los suelos presentan una rápida infiltración aun estando húmedos, infiltración superior a 76 mm/h. El descenso de la capacidad de infiltración es abrupto, llegando rápidamente a la condición de equilibrio del flujo, es decir la capacidad de infiltración básica. Esta condición refleja la situación de suelos gruesos con baja capacidad de almacenamiento y alta infiltración básica. Estos valores elevados de infiltración medidos en el campo corroboran la ausencia de zonas con bajo y moderadamente bajo valor del IRP y justifican la existencia de 46% del área que presenta buena y muy buena capacidad de recarga. El menor valor de infil-

tración básica promedio se ubica en la formación de bajos, mallines y lagunas, debido a la presencia de depósitos finos y a la compactación del suelo por el uso de estas áreas para la ganadería extensiva. El valor de infiltración básica promedio más elevado se registró en la formación Basalto Zapala facies lávica; esto contradujo los antecedentes bibliográficos considerados, que establecían que, en las zonas áridas tras largos períodos secos, se depositan partículas pequeñas que ocluyen los poros. Este hecho afectó la asignación de pesos de las formaciones basálticas, habiendo subestimado la valoración de las formaciones basálticas más antiguas.

El valor anual de recarga potencial estimada fue de 74

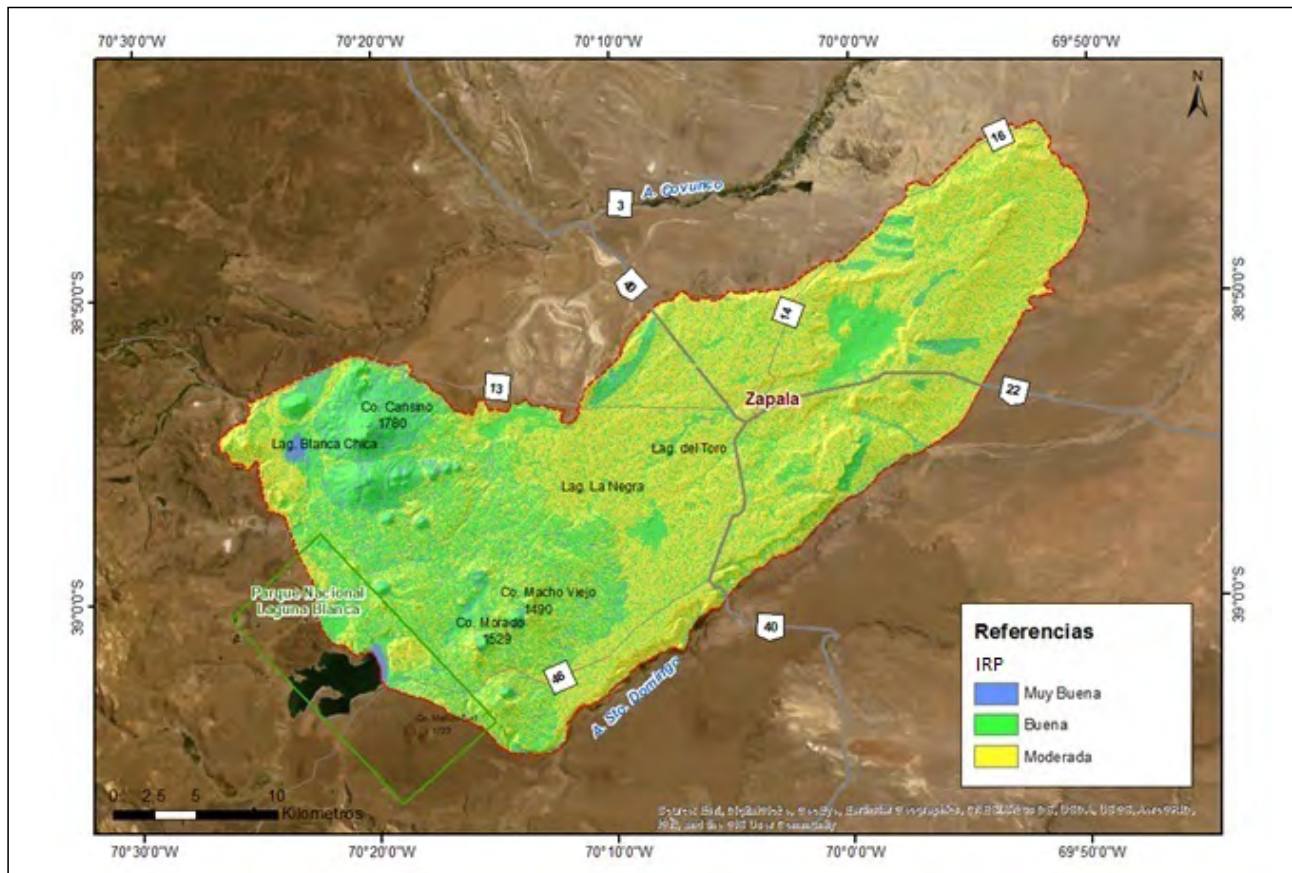


Figura 5. Índice de Recarga Potencial.

Tabla 6. Ensayos de infiltración por formación geológica.

Formación	n	Infiltración básica promedio (mm/h)	Desvío estándar
Basalto Macho Viejo facies lávica	14	527,79	206,99
Basalto Zapala facies lávica	8	583,25	240,63
Basalto Los Mellizos facies lávica	1	540,00	-
Depósitos aluviales actuales	1	252,00	-
Depósitos aluviales y coluviales	3	578,33	210,40
Depósitos de bajos, mallines y lagunas	5	250,60	210,46
Depósitos que cubren superficies pedimentadas de flanco	2	453,00	188,09
Las Coloradas (continental)	7	452,57	234,25

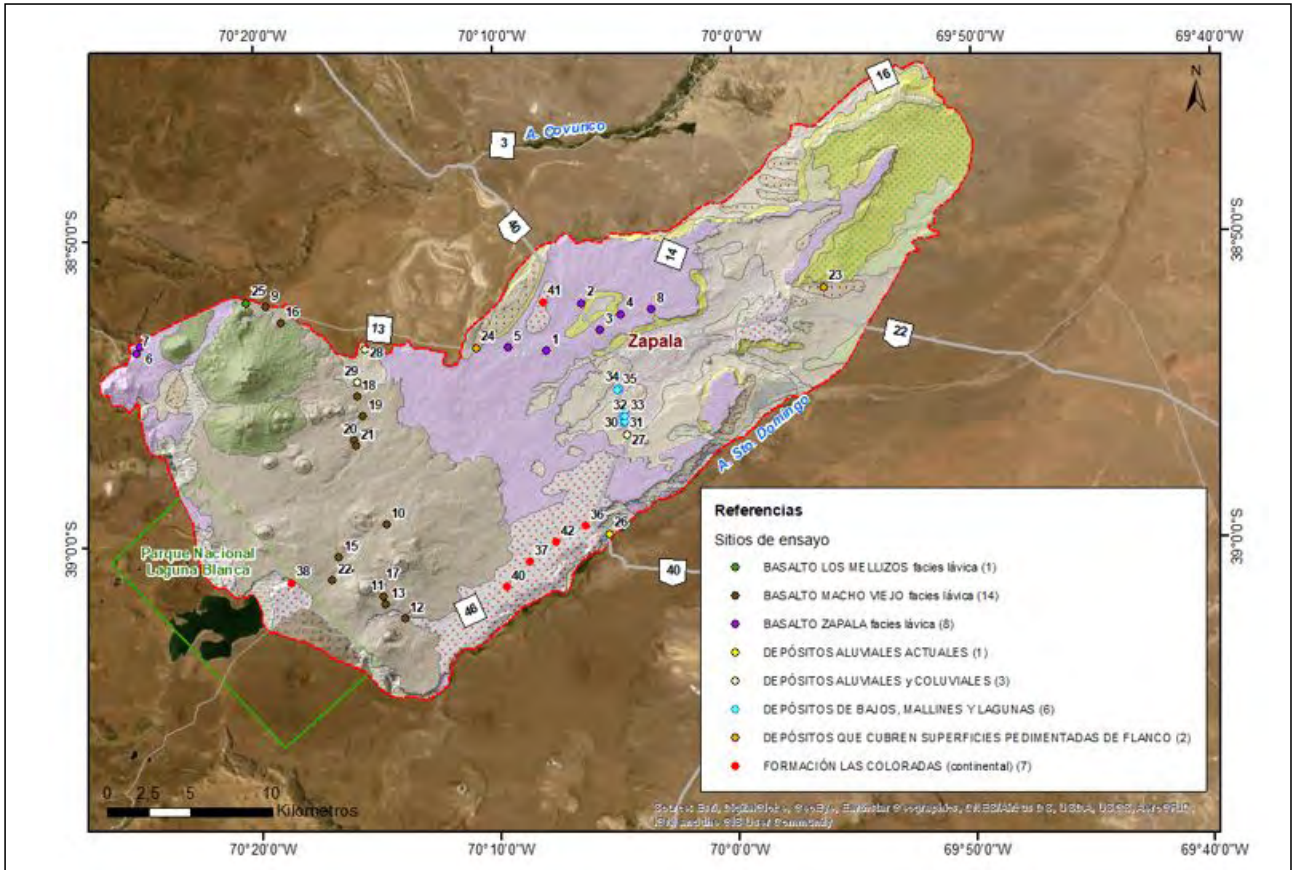


Figura 6. Ubicación de sitios de ensayo de infiltración y formaciones geológicas.

hm³/año para el área de 838 km², y de 17 hm³/año para el área de 207 km², considerando precipitaciones de 118 hm³/año y 27 hm³/año, respectivamente. Esto representa un promedio de 63% de la precipitación anual para las dos áreas de consideradas.

Estudios realizados en el área (Tabla 7) por Carrica *et al.* (1997) y por Bonorino *et al.* (2002) consideraron sólo el área correspondiente al acuífero de alta productividad (207 km²). El índice geohidrológico aplicado por Gatica *et al.* (2018) fue realizado a escala regional, de manera que pudo extraerse los resultados para las dos áreas de interés.

El análisis comparativo de estos resultados mostró que la estimación de la recarga potencial se encuentra dentro del rango de valores de los estudios previos (Tabla 7) si bien la tasa de recarga potencial/precipitación es superior. De

acuerdo con Carrica *et al.* (1997) su estimación se minimiza los valores de recarga, por lo que su magnitud puede considerarse como un valor conservador probable.

La escala de análisis de Gatica *et al.* (2018) fue de 1:500.000, lo cual puede no representar adecuadamente variaciones zonales y locales de los factores considerados, por lo que un mayor detalle podría modificar sus resultados. Por otra parte, Gatica *et al.* (2018) utilizaron datos de precipitaciones mensuales estimados a partir de la base de datos LocClim (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002) que presenta valores superiores a los utilizados por los otros autores. Teniendo en cuenta las relaciones entre recarga potencial y precipitación se observó que la metodología empleada por Gatica *et al.* (2018) arrojó la menor tasa, pero, debido a que parte de los registros de

Tabla 7. Comparación de estudios de recarga del acuífero Zapala.

Autor	Área (km ²)	Precipitación (hm ³ /año)	Potencial Recarga (hm ³ /año)	Relación Potencial Recarga/precipitación
Carrica <i>et al.</i> (1997)	207	33	18	55%
Bonorino <i>et al.</i> (2002)	207	27	15	54%
Gatica <i>et al.</i> (2018)	207	51	20	39%
	838	215	82	38%
Este estudio	207	27	17	63%
	838	118	74	63%

precipitaciones superiores, presenta los mayores valores de recarga potencial.

Estas comparaciones ponen de manifiesto la importancia de contar con información climática robusta para estimar la recarga real de los acuíferos, además de la aptitud del territorio para la recarga.

Consideraciones finales

El análisis geohidrológico respaldado por técnicas de geoprocésamiento mediante SIG mostró ser una herramienta muy útil en la evaluación del potencial de recarga de acuíferos. Resulta de gran valor en países en desarrollo, con baja infraestructura, accesibilidad y/o escasez de datos. Además, su aplicación resulta efectiva para ahorrar tiempo y costos, especialmente en áreas extensas, considerando las ventajas que ofrece la teledetección y su disponibilidad actual.

Los factores utilizados, sus interrelaciones y su ponderación, cumplen un rol clave en la estimación de la aptitud del territorio para la recarga. Esto hace necesario un amplio conocimiento del comportamiento de los factores. Dado que la recarga potencial de agua subterránea está directamente relacionada con la infiltración y percolación, los pesos asignados pueden ser más precisos y objetivos si la tasa de percolación y la conductividad hidráulica de cada factor de potencial de recarga se miden in situ o en laboratorio. Los ensayos de infiltración se presentaron como una alternativa eficiente al momento de ponderar los factores de litología, y usos y cobertura de suelo.

El ITH ha demostrado ser muy robusto al momento de identificar zonas de escurrimiento y susceptibilidad a la inundación. Este factor tiene especial importancia en valles aluviales áridos, donde la recarga ocurre usualmente en topografías deprimidas. En cuencas con densidades de drenaje moderadas a bajas, utilizar el factor densidad de drenaje podría introducir una subestimación en determinadas condiciones geohidrológicas que no favorecen el desarrollo de escurrimiento superficial permitiendo la infiltración y la recarga, aún en condiciones de precipitaciones escasas.

Incluir variables climáticas a partir de mediciones en distintos puntos de la cuenca, específicamente en el área de recarga, permitiría mejorar la incertidumbre en los balances hidrológicos. Esto surge debido a que el conocimiento regional de los factores climáticos es inferior al necesario requerido para realizar un estudio a la escala de análisis de este estudio (1:100.000). Además, los datos pluviométricos utilizados (periodo 1921-1950) se encuentran desactualizados. Debido a la descentralización y la falta de articulación

entre las instituciones, la actualización de la información resulta infructífera o incompleta. Actualmente se encuentran disponibles modelos climáticos basados en modelos físicos y análisis retrospectivo, como por ejemplo ERA5 y MERRA-2, de resolución espacial ~ 0.1 y ~ 0.5 grados respectivamente que resultan una buena alternativa para el análisis de ciclos y tendencias. Sin embargo, a través de un análisis preliminar realizado para este estudio se encontró que los modelos sobrestiman las precipitaciones debido a que aún no se encuentran suficientemente ajustados a nuestra región.

La identificación de potenciales zonas de recarga ayudará en la planificación de estrategias para la gestión eficaz de los recursos hídricos y la planificación ambiental del territorio. En ausencia de una validación rigurosa, la metodología propuesta puede usarse como primera estimación de las zonas favorables para la recarga. Por lo tanto, el IRP aplicado en este estudio es muy útil para quienes toman las decisiones y los administradores del agua. Puede ayudar a formular estrategias efectivas de explotación de aguas subterráneas para la sostenibilidad a largo plazo de este vital recurso.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco de la Maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y del proyecto de investigación Hidrogeología de la Provincia del Neuquén, de la Facultad de Ingeniería y la Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud de la Universidad Nacional del Comahue (004/1205).

Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Rafael Adrian Maddio, Ana Cecilia Dufilho y Marcelo Luciano Gandini. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Rafael Adrian Maddio y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Declaración de conflicto de intereses

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Referencias Bibliográficas

- Arroyo, J. (1980). Relevamiento y priorización de áreas con posibilidades de riego. Provincia del Neuquén. (Vol. II). Consejo Federal de Inversiones.
- Avtar, R., Singh, C.K., Shastri, S., Singh, A. y Mukherjee, S. (2010). Identification and analysis of groundwater potential zones in Ken–Betwa river linking area using remote sensing and geographic information system. *Geocarto International*. 25(5), 379-396. <https://doi.org/10.1080/10106041003731318>

- Barbosa, P. y Weynants, M. (2018). Vulnerabilidad de las tierras secas a la desertificación, degradación de las tierras e impactos económicos y sociales. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Bastianelli, N., Garrido, A., Albouy, R. y Carrica, J. (2016). El recurso hídrico subterráneo de la ciudad de Zapala, Neuquén: ambiente geológico de la formación la Bardita. En E. Custodio, M. Varni y R.F. García (Eds.), IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea (Catamarca) (pp. 134-141).
- Carrica, J.C., Delpino, D. y Bonorino G. (1997). Aspectos hidrogeológicos de los alrededores de la ciudad de Zapala, provincia del Neuquén. En Actas del I Congreso Nacional de Hidrogeología (Bahía Blanca) (pp. 165-182).
- Carson, M.A. y Kirkby, M.J. (1972). Hillslope form and processes (Cambridge Geographical Studies 3). Cambridge University Press, Oxford.
- Chow, V.T. (2000). Hidrología aplicada. McGraw-Hill.
- Delpino D., Giusiano A. y Deza M. (1994). Mapa geológico del departamento de Zapala. [Inédito]. Dirección Provincial de Minería de la Provincia del Neuquén.
- Dufilho, A.C., Toth, A. y Valle, D. (2002). Elaboración de bases para el ordenamiento territorial ambiental de la provincia del Neuquén. CFI-COPAIDE.
- Environmental Systems Research Institute. (2022). Acumulación de flujo (Spatial Analyst). ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/flow-accumulation.htm>
- Environmental Systems Research Institute. (2023). World Imagery Tile Layer [Imágenes]. https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}
- Gaitán, J.J., López, C.R. y Bran, D.E. (2009a). Efectos del pastoreo sobre el suelo y la vegetación en la estepa patagónica. *Ciencia del Suelo*, 27(2), 261-270.
- Gaitán, J.J., López, C., Ayesa, J., Siffredi, G. y Umaña, F. (2009b). Reconocimiento, cartografía y evaluación de mallines. Área Zapala, provincia del Neuquén. Centro Regional Patagonia Norte, Área de Investigación en Recursos Naturales, INTA EEA Bariloche.
- Gatica, J., Dufilho, A.C. e Irrisari, J. (2018). Estimación de la recarga potencial anual de acuíferos en la provincia de Neuquén. En R. García, E. Castro, M. Auge, C. Falcón y M. Blarasín (Eds.), *Hidrogeología Regional. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología (Salta)*. (Vol. I).
- Global Learning and Observations to Benefit the Environment. (2005). Investigación de cobertura terrestre/biología. GLOBE
- Herrick, J.E., Van Zee, J.W., Havstad, K.M., Burkett, L.M. y Whitford, W.G. (2017). *Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems*. (Vol. I). USDA -ARS Jornada Experimental Range.
- Instituto Geográfico Nacional. (2020). *Argentina y el mundo: Rasgos y componentes del territorio argentino*. ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina, Instituto Geográfico Nacional.
- Khodaei, K. y Nassery, H.R. (2011). Groundwater exploration using remote sensing and geographic information systems in a semi-arid area (Southwest of Urmieh Northwest of Iran). *Arabian Journal of Geoscience*, 6(4), 1229–1240. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0414-4>
- Leanza, H.A., Hugo, C.A., Herrero, J.C., Donnari, E. y Pucci, J.C. (1997). Picún Leufú. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250.000. Hoja Geológica 3969-III. Provincias de Neuquén y Río Negro. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Leanza, H.A., Hugo, C., Repol, D., González, R., Danieli, J.C. y Lizuani, A. (2001). Hoja Geológica 3969-I, Zapala. Provincia del Neuquén. Boletín 275. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Macas-Espinosa, V.X. y López-Escobar, K.F. (2018). Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la demarcación hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. *Revista de Teledetección*, 51, 135-145. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>
- Martínez de Azagra Paredes, A. y Navarro Hevia, J. (1996). *Hidrología forestal: el ciclo hidrológico*. Secretariado de Publicaciones, Universidad Valladolid.
- Matteucci, S.D. (2012). Ecorregión Estepa Patagónica. En J.H. Morello, S.D. Matteucci, A.F. Rodríguez y M.E. Silva (Eds.), *Eco-regiones y complejos ecosistémicos argentinos* (pp. 549-654). (1ª ed.). Orientación Gráfica Editora.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2002). LocClim, Estimador Local Mensual Climático.
- Pérez Pardo, O., Campomane, J., Cerruti, J., Cobello, H., Corso, M.L., Fernández Beyro, M., Freiler, S., Fruttero, Z., Maccagno, P., Machado, E., Morel, R., Rueda Avellaneda, O., Uccelli, A. y Viegas Auerlio, P. (2005). Manual sobre Desertificación. Dirección de Conservación del Suelo y Lucha contra la Desertificación, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación.
- Ramilo, E.J., Chehébar, C.E. y Mazzucchetti, S. (1993). Plan general de manejo Parque Nacional Laguna Blanca. Administración de Parques Nacionales.
- Reynolds, J.F., Stafford Smith, D.M., Lambin, E.F., Turner II, B.L., Mortimore, M., Batterbury, S.P.J., Downing, T.E., Dowlatabadi, H., Fernández, R.J., Herrick, J.E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F.T., Ayarza, M. y Walker, B. (2007). Global Desertification: Building a Science for Dryland Development. *Science*, 316, 847-851. <https://doi.org/10.1126/science.1131634>
- Saaty, T. (1980). *Multicriteria decision Making: The analytic hierarchy process*. McGraw Hill.
- Soil Conservation Service. (1972). *National engineering handbook*. Section 4: Hydrology. U.S. Department of Agriculture.
- Smith, B. y Sandwell., D. (2003). Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. *Geophysical Research Letters*, 30(9), 20-23. <https://doi.org/10.1029/2002GL016643>
- Tumare, J., Jana, S.K. y Pal, D.K. (2014). Application of remote sensing and GIS for groundwater potential zone investigation in Bulolo-Wau surrounding Gold Mine, Morobe Province, Papua New Guinea. *International Journal of Geoinformatics*, 10(4), 45-57. <https://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/579>
- United States Geological Survey. (s./f.). EarthExplorer. Recuperado el 1 mayo 2016 de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Wheater, H.S. 2007. Modelling hydrological processes in arid and semi-arid areas: An introduction to the workshop. En H. Wheater, S. Sorooshian y K. Sharma (Eds.), *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535734>
- Yeh, H.F., Lee, C.H., Hsu, C.K. y Chang, P.H. (2009). GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environmental Geology*, 58, 185-195. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1504-9>