



Estimación de la recarga de agua subterránea

RAHi
REVISTA ARGENTINA DE HIDROGEOLOGÍA

Volumen 2

Año 2023

ISSN 2953-4208



Organismo Editor Responsable

Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Argentino

Maipú 645 1^{er} piso

(C1006ACG) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Tel. 011 4322 2820 / 4328 4078

E-mail aih.grupoargentino@gmail.com; revista.argentina.hidrogeologia@gmail.com

Foto de tapa

Capturada por Beatriz Susana Donati en la Ruta Provincial N° 74, en inmediaciones del cruce de la Vasconia, localidad de Tandil (Buenos Aires) en el mes de septiembre de 2023. La foto tiene un ligero contrapicado y un horizonte bajo para así connotar la fuerza de la tormenta en una zona rural. Modificada digitalmente para armonía de diseño por *Guillermo Cardoso*.

Logo

Logo y diseño de tapa de *Guillermo Cardoso*

Sitio Web AIH Grupo Argentino y Revista Argentina de Hidrogeología

Gestión documental RAHi *Noella Hurtado Viggiano*

REVISTA ARGENTINA DE HIDROGEOLOGÍA

CUERPO EDITORIAL

Editor responsable

Dr. Lic. Roberto Esteban Miguel

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

revista.argentina.hidrogeologia@gmail.com

Editora asociada

Dra. Lic. Corina Iris Rodríguez

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

corodri@fch.unicen.edu.ar

Comité editor

Dr. Geól. Carlos Juan Schulz

Universidad Nacional de La Pampa

Dr. Geól. Daniel Emilio Martínez

Universidad Nacional de Mar del Plata

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y
Técnicas

Dra. Geól. María Verónica Rocha Fasola

Universidad Nacional de Salta

Agradecimientos

Desde el comité editor se agradece la colaboración desinteresada como integrantes del comité científico al *Dr. Lic. Leandro Rodrigues Capitulo* (Universidad Nacional de La Plata y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), *Dr. Lic. Eduardo Kruse* (Universidad Nacional de La Plata y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), *Dr. Geof. Santiago Perdomo* (Universidad Nacional Del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), *Dra. Lic. Corina Iris Rodríguez* (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), *Dr. Geól. Esteban Tálamo* (Universidad Nacional de Catamarca), *Dra. Lic. Edel Mara Matteoda* (Universidad Nacional de Río Cuarto), *Dra. Lic. Cristina Dapeña* (Universidad de Buenos Aires y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) y *Dra. Geól. María Verónica Rocha Fasola* (Universidad Nacional de Salta).

A las empresas *CONHIDRO* y *ANDINA PERFORACIONES*, quienes financiaron el diseño del logo, manual de marca y diseño de tapa de la Revista Argentina de Hidrogeología.

JUNTA DIRECTIVA
ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE HIDROGEOLOGÍA
GRUPO ARGENTINO

PRESIDENTE

Dr. Eduardo Kruse

VICEPRESIDENTE

Dra. Cristina Dapeña

SECRETARIA

Lic. María Josefa Fioriti

TESORERO

Dr. Santiago Perdomo

VOCALES

Dr. Roberto Esteban Miguel

Dra. María Verónica Rocha Fasola

Mag. Andrea Isabel Valladares

Dr. Carlos Juan Schulz

REVISTA ARGENTINA DE HIDROGEOLOGÍA

OBJETIVOS

La Revista Argentina de Hidrogeología (*RAHi*) es una publicación desarrollada desde el *Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Argentino (AIH-GA)* y el apoyo de investigadores de Universidades e Institutos de Ciencia y Técnica de Hispanoamérica que abordan la temática hidrogeológica.

La Revista tiene por objetivo publicar investigaciones científicas y documentos técnicos vinculados al quehacer hidrogeológico, con énfasis en las diferentes regiones de Argentina.

Los aportes podrán ser teóricos, metodológicos o aplicados, por ejemplo, a través de investigaciones empíricas o estudios de caso, que permitan avanzar en el conocimiento de la hidrogeología, su estudio y la aplicación de conocimientos.

TEMÁTICA

Los artículos publicados se enmarcarán en una línea temática establecida por la Junta Directiva de la AIH Grupo Argentino para cada número de la revista para lo cual se realizarán invitaciones especiales a investigadores, docentes y técnicos del quehacer hidrogeológico nacional. No obstante, el Comité Editorial ocasionalmente evaluará la apertura a números abiertos para la recepción de trabajos como *Misceláneas* del ámbito hidrogeológico, pero no incluidos en la línea temática seleccionada por la Junta Directiva.

ALCANCE

La publicación se efectuará en formato digital anualmente en el mes de octubre bajo la Editorial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Argentino y estará disponible en la página de AIH-Grupo Argentino. El idioma oficial será el español con resúmenes en inglés.

DEL PROCESO EDITORIAL

Los artículos recibidos serán evaluados inicialmente por el Comité Editorial y remitidos a dos evaluadores bajo el sistema doble ciego. Para la publicación de los artículos se considerará particularmente la pertinencia temática, calidad, originalidad e interés general. Cabe destacar que la originalidad no sólo estará dada por el abordaje teórico, metodológico y práctico, sino también –aunque no excluyente– bajo el criterio de

originalidad territorial, es decir, áreas poco estudiadas o sin antecedentes de estudios en los últimos cinco años. En caso de haber dictámenes contradictorios entre evaluadores el artículo será enviado a un tercero.

DEL ACCESO, GRATUIDAD Y FINANCIAMIENTO

La *RAHi* es de acceso abierto y distribución gratuita. Tanto los editores, junta directiva, comité académico como autores efectúan sus contribuciones “ad honorem”.

Los gastos para la realización de la revista correrán por cuenta de la AIH-GA, para lo cual se prevé que empresas vinculadas a la hidrogeología auspicien en el cuerpo del documento y permitan solventar los gastos.

En caso de excedentes, estos quedarán en la cuenta de la AIH-GA para gastos que su Junta Directa considere convenientes.

ÍNDICE

Prólogo <i>Por Roberto Esteban Miguel</i>	<i>Pág. 7-8</i>
Revisión de métodos de estimación de la recarga en sistemas hidrogeológicos pampeanos <i>Christian Montagna, Natalia Loyola, Lorena Ceballo, Pedro Di Liscia, Carlos Gandi y Eduardo Mariño</i>	<i>Pág. 9-19</i>
Recarga a los acuíferos en áreas de llanura húmeda del centro de la provincia de Santa Fe, Argentina <i>Mónica Patricia D'Elia, Marta del Carmen Paris y Marcela Alejandra Pérez</i>	<i>Pág. 20-44</i>
Tendencias de recarga del Acuífero Pampeano en la Llanura Interserrana bonaerense: un análisis de 17 años <i>Orlando Mauricio Quiroz Londoño, Jesús David Gómez, Daniel Emilio Martínez</i>	<i>Pág. 45-57</i>
Contexto regional y local de recarga de acuíferos en la planicie fluvio-eólica de Marcos Juárez <i>Daniela Beatriz Giacobone, Mónica Blarasin, Edel Matteoda, German Schroeter, Fátima Becher Quinodoz, Verónica Lutri y Adriana Cabrera</i>	<i>Pág. 58-80</i>

Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre temas actuales en hidrología subterránea. Actas 1:461-473.

- Scanlon, B. R. Healy, R. W. Cook, P. G., (2002).** Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology journal* 10:18-39.
- Scioli, C. Vives, L. S. Burgos, M. Martinez, S. N. (2013)** Modelación del flujo subterráneo en la cuenca Matanza-Riachuelo, Provincia de Buenos Aires. In: VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea (La Plata, 17 al 20 de septiembre de 2013), 2013.
- Siebert, S. Burke, J. Faures, J.-M. Frenken, K. Hoogeveen, J. Döll, P. Portmann, F. T., (2010).** Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology and earth system sciences* 14(10):1863-1880.
- Silva Busso, A. Santa Cruz, J., (2005).** Distribución de elementos traza en las aguas subterráneas del Partido de Escobar, Buenos Aires, Argentina. *Ecología austral* 15(1):31-47.
- Solana, X., (2020).** Aplicación de técnicas geofísicas, hidrogeoquímicas e isotópicas en la caracterización hidrogeológica de ambientes de llanura. Universidad Nacional de Córdoba.
- Stephens, D. B. Knowlton Jr, R., (1986).** Soil water movement and recharge through sand at a semiarid site in New Mexico. *Water resources research* 22(6):881-889.
- Stone, D. B. Moomaw, C. L. Davis, A., (2001).** Estimating recharge distribution by incorporating runoff from mountainous areas in an alluvial basin in the Great Basin region of the southwestern United States. *Groundwater* 39(6):807-818.
- Thorntwaite, C. W., (1948).** An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical review* 38(1):55
- Varni, M., (2013).** Aplicación de varias metodologías para estimar la recarga al acuífero pampeano, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4 (3), 67-85.
- Varni, M. Comas, R. Weinzettel, P. Dietrich, S., (2013).** Application of the water table fluctuation method to characterize groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina. *Hydrological Sciences Journal* 58(7):1445-1455.
- Venecio, M. Varni, M., (2003).** Estimación de la carga y del Almacenamiento Específico a través de Análisis de Registros de Nivel Freático. III congreso Argentino de Hidrogeología y I seminario Hispano-latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea. Rosario Argentina:153-160.
- Villanueva, M. Iglesias, A. I., (1984).** Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Instituto Geológico y Minero de España.
- Weinzettel, P. Usunoff, E. Vives, L., (2005).** Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. *Groundwater and Human Development Balkema Great Britain* Cap 5:133-143.
- Zanandrea, J. F., (2022).** Variaciones del nivel freático en la cuenca del arroyo El Pescado. Tesis de grado para Lic. en Geología. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata 45 pp. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/143167> Ultimo acceso: 6.11.2023.

Trabajo recibido el 3/09/2023 y aprobado para su publicación el 6/11/2023.

Cómo citar este artículo

Quiroz Londoño O.M., Gómez J.D., Martínez, D.E. (2023) Tendencias de recarga del Acuífero Pampeano en la Llanura Interserrana bonaerense: un análisis de 17 años. *Revista Argentina de Hidrogeología*, 2:45-57

CONTEXTO REGIONAL Y LOCAL DE RECARGA DE ACUÍFEROS EN LA PLANICIE FLUVIO-EÓLICA DE MARCOS JUÁREZ

REGIONAL AND LOCAL CONTEXT OF AQUIFER RECHARGE IN THE FLUVIO-AEOLIAN PLAIN OF MARCOS JUÁREZ

*Daniela Beatriz Giacobone^{*1}, Mónica Blarasin², Edel Matteoda², German Schroeter³, Fátima Becher Quinodoz¹; Verónica Lutri¹ y Adriana Cabrera²*

¹Departamento de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nacional 36, km 601(5800) Río Cuarto. Córdoba, Argentina. CONICET, Argentina.

²Departamento de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nacional 36, km 601(5800) Río Cuarto. Córdoba, Argentina

³Departamento de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nacional 36, km 601(5800) Río Cuarto. Córdoba, Argentina. FONCYT, Argentina.

Autor de correspondencia: dgiacobone@exa.unrc.edu.ar

RESUMEN

El agua subterránea en la provincia de Córdoba es fundamental por su importancia ecosistémica y su extendido uso para actividades humanas. El objetivo de este trabajo fue dar un contexto al comportamiento regional de la recarga de acuíferos en la provincia y posteriormente, caracterizar la recarga (serie 1970-2022) al acuífero libre en Marcos Juárez y entorno utilizando el método de fluctuación del nivel freático (MFN). Las evidencias geológicas, hidrológicas, químicas e isotópicas indican variabilidad de recarga en espacio y tiempo, estando la recarga influenciada por clima, relieve y litología. Las planicies orientales, son fundamentalmente receptoras de flujos de agua desde las tierras más altas. Esto hace que tengan una importante inercia en la descarga y almacenen agua en el acuífero. En el caso de Marcos Juárez, el almacenamiento ha sido muy evidente entre 1973 y 2021, comenzado luego a bajar el nivel, debido a la sequía de los 2 últimos años, lo que marca la importancia de la alimentación por precipitaciones. Calculada la recarga mensual se observó que su marcha temporal es similar a las precipitaciones. La recarga ha ido variando en porcentajes, con un promedio del orden de 7,5 % de las precipitaciones. En promedio, las mayores recargas ocurren en febrero, enero, marzo e incluso abril, y es típico que, a principios del otoño, luego de meses con agua disponible en el perfil del suelo, aumente la percolación y se recargue el acuífero. Utilizando datos de Tritio, se verificó la recarga moderna especialmente en la parte superior del acuífero libre.

Palabras clave

Acuífero libre, recarga, descarga, tritio.

ABSTRACT

Groundwater in the province of Córdoba is essential due to its ecological significance and widespread use for human activities. The objective of this study was to provide regional context on aquifer recharge behavior and subsequently characterize recharge (1970-2022 series) to the unconfined aquifer in Marcos Juárez and its surroundings using the Water Table Fluctuation Method (WTF). Geological, hydrological, chemical, and isotopic evidence indicates variability in recharge both spatially and temporally, with recharge influenced by climate, topography, and lithology. The eastern plains primarily receive water flows from higher lands, making them important in storing water in the aquifer. In the case of Marcos Juárez, water storage has been evident from 1973 to 2021, but it started to decline afterward due to the drought of the last two years, highlighting the significance of precipitation input. Monthly recharge calculations showed a temporal pattern similar to precipitation. Recharge has varied in percentages, with an average of around 7.5% of total precipitation. On average, the highest recharges occur in February, January, March, and

even April. It is typical that in early autumn, after months with available water in the soil profile, percolation increases, recharging the aquifer. Modern recharge was verified especially in the upper part of the unconfined aquifer, using Tritium data.

Key words

Unconfined aquifer, recharge, discharge, tritium.

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de la gestión y estrategias de protección de las aguas subterráneas es muy importante analizar y cuantificar la dinámica de los acuíferos. Esto se debe realizar para satisfacer la demanda de agua de uso humano, el funcionamiento de los ecosistemas, el manejo eficiente y la conservación del recurso (Healy, 2010; Wendland *et al.*, 2015). Si bien se desean estimaciones precisas de la infiltración efectiva o recarga a los acuíferos, está más allá de las capacidades actuales determinar, con cierto grado de confianza, la incertidumbre asociada a la estimación, y mucho menos afirmar que la estimación es correcta (Healy, 2010). Se debe tener en cuenta que el estudio de los acuíferos es complejo y el cálculo de la recarga dificultoso. Además de ser un proceso difícil de comprender por su complejidad, debido a que varía en tiempo y espacio, diferentes factores lo afectan y los ritmos son difíciles de medir en forma directa. Hay numerosos métodos para medir la recarga a los acuíferos (Geneviève *et al.*, 2020), sin embargo, con datos relativamente simples de obtener como las variaciones del nivel freático y las precipitaciones, se pueden obtener estimaciones de la recarga por el método de fluctuaciones del nivel freático. Dicho aspecto permite caracterizar los acuíferos, no sólo en sus aspectos hidrodinámicos sino también como apoyo de los aspectos geoquímicos del agua subterránea. Estos autores, luego de comparar diversos métodos, concluyen que el método de fluctuación de nivel freático (MFN) puede ser utilizado para la evaluación de la recarga de aguas subterráneas a escala regional si el acuífero es monitoreado por una red apropiada de pozos de observación.

Se considera recarga al flujo descendente de agua que alcanza el nivel freático, sumándose al almacenamiento subterráneo (Healy, 2010). La recarga ocurre a través de mecanismos *difusos* o *concentrados* según las definiciones que se presentan en el cuadro de la Figura 1.



Figura 1. Síntesis realizada en base a las definiciones de diversos autores, mencionados en Blarasin *et al.* (2011).

En el ámbito de la provincia de Córdoba, Argentina, el agua subterránea es uno de los recursos más utilizados debido a su calidad y relativamente bajo costo de extracción. Con el objetivo de conocer cuánta agua subterránea es aportada al acuífero estacional y anualmente, y con fines de optimizar el manejo (Blarasin *et al.*,

2011, 2016) se han realizado cálculos de recarga para diferentes zonas, utilizando incluso métodos para localizarla areal y temporalmente, a través de soporte de técnicas hidráulicas, geoquímicas e isotópicas. En numerosas localidades y sectores rurales de la región, se ha observado un ascenso progresivo y gradual de los niveles freáticos en las últimas décadas, proceso que viene revirtiéndose en los últimos 3-4 años. En estudios de la recarga puede citarse la investigación de Fili *et al.* (2000), que analiza una serie de precipitaciones de 92 años (1903-1994) para la ciudad de Laboulaye y muestra que se pasa de un período seco, hasta el año 1950, a un período hiperhúmedo con 3 m de ascenso de nivel freático. Estos datos indican la tendencia creciente en la magnitud de los excedentes y el incremento, a partir de la década de 1970, de la frecuencia de años con excesos. Blarasin (2003) establece para Río Cuarto y alrededores que la variable de ingreso fundamental al sistema subterráneo es el aporte hidrometeorológico de tipo pluvial, responsable de cambios en el nivel freático. La recarga al acuífero calculada con el balance de cloruros resultó en 11,2 % de la precipitación, equivalente a 89,3 mm y con el MFN del orden de 12,6 % para valores de coeficiente de almacenamiento (S) del orden de 5 % según ensayos de bombeo en ambiente loésico. Estos valores se contrastaron con el balance hidrológico a nivel del suelo, realizado con el modelo Visual Balan (Samper, 1999) que arrojó una recarga de 11,6 %.

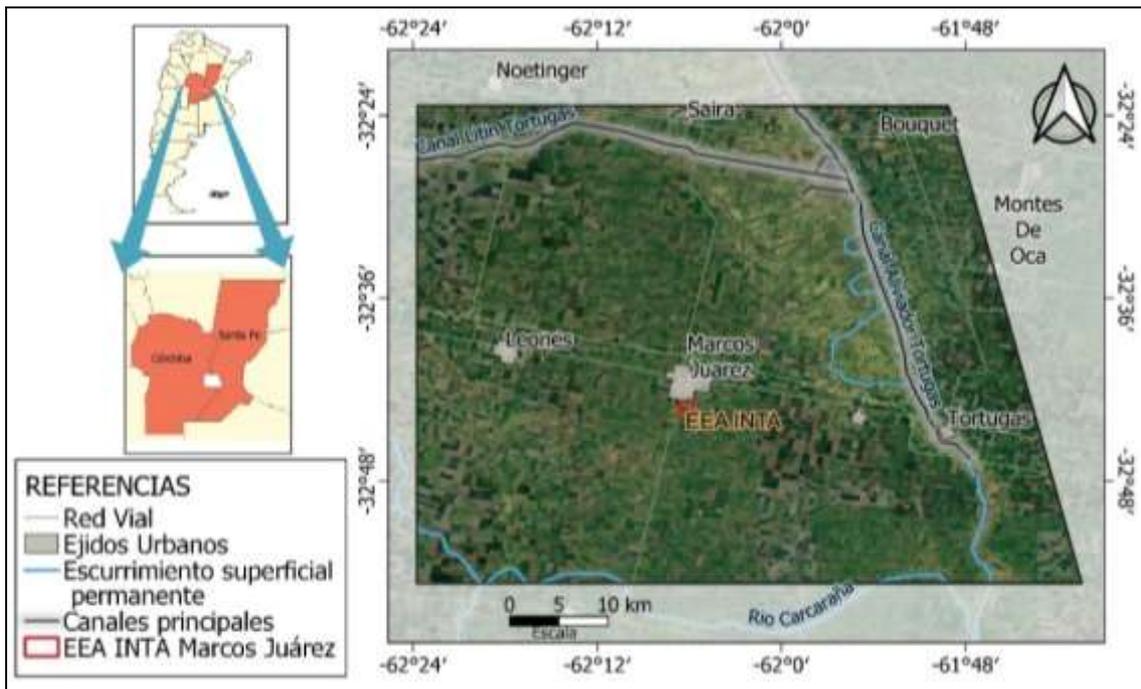


Figura 2. Ubicación del área de estudio y la EEA INTA Marcos Juárez.

En Giacobone *et al.* (2018) se calcula una recarga del orden de 20 % de la precipitación en la faja fluvial de Río Cuarto, en el campus de la UNRC, para materiales areno gravosos. Numerosos autores de Argentina han calculado recarga del acuífero con diferentes métodos (hidráulicos, químicos, isotópicos, etc.) con el objeto de cuantificarla y caracterizarla en tiempo y espacio (Cabrera, 2009; Blarasin *et al.*, 2011, 2016; Carrica *et al.*, 2012; Varni y Weinzettel, 2014; Polare y Vives, 2021). Polare y Vives (2021) realizan un balance hidrológico edáfico y a partir de allí lo combinan con la modificación propuesta por Scozzafava y Tallini (2001), empleando el método del número de curva (CN), para el cálculo del escurrimiento superficial provocado por un evento aislado de precipitación. Estos autores plantean el cálculo de

escurrimiento superficial (Q) con CN y luego restan este valor a la lluvia total de un evento dado (P), obteniendo una lluvia ficticia $P_f = P - Q$, a la que se le aplican las ecuaciones correspondientes al balance hídrico. De esta manera, los excedentes calculados corresponden a la infiltración neta o recarga al acuífero. Similares consideraciones hicieron D'Elia *et al.* (2008) y Zimmermann (2000) para calcular la recarga.

En este trabajo el objetivo fue dar un contexto regional del funcionamiento de la recarga de acuíferos en la provincia, y posteriormente caracterizar la recarga al acuífero libre del ámbito de la localidad de Marcos Juárez y entorno (Este de Córdoba, figura 2), utilizando el método de fluctuación del nivel freático (MFN), en base a datos obtenidos en la estación INTA EEA Marcos Juárez (1970-2022). Se trata por tanto de un dato puntual, pero de mucha confiabilidad, que puede extrapolarse al entorno de la planicie bajo estudio y permitirá mejorar la comprensión de lo que ocurre en diferentes ámbitos provinciales.

Materiales y métodos

Para realizar el trabajo se analizaron y recopilamos cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) e imágenes de satélite de Google Earth, Merit (Yamazaki *et al.*, 2017), entre otros. Se interpretó la Serie del Observatorio Agrometeorológico de la EEA INTA Marcos Juárez, con datos medidos de forma permanente y diaria, interpretándose la evolución temporal de las precipitaciones. La serie de precipitaciones y niveles freáticos utilizada corresponde a un registro 52 años (período 1970-2022) y se encuentra disponible en Andreucci *et al.* (2016). El conjunto de datos fue cedido por los profesionales de INTA. Se calculó la evapotranspiración potencial con la metodología propuesta por Thornthwaite y Matter (1955). Los datos de cantidad de horas de sol fueron extraídos de la web Weather Spark (2023). Se utilizó una tabla de Excel generada por la Universidad de Salamanca (USAL) para obtener el valor de evapotranspiración potencial media anual y el Software InnerSoft ISBH v0.7 (2015) para calcular la evapotranspiración real (ETR) en el balance promedio anual. Para realizar el Balance Hídrico seriado de paso mensual, se utilizó PDIWin (Ravelo y Machado, 1999), cuyo cálculo de ETR se basa en el balance hídrico del suelo según metodología de Thornthwaite y Matter (1955), obteniéndose además los valores de déficit y excesos hídricos mensuales.

El cálculo de la recarga mediante el método de fluctuaciones del nivel freático se realizó siguiendo las sugerencias de Healy (2010). Si bien en el sitio de la perforación el personal de INTA mide el nivel en forma diaria, al igual que las precipitaciones, para estimar la recarga *difusa* del acuífero se realizaron los cálculos con paso mensual para simplificar el trabajo, asumiendo además que es un valor de alto interés desde el punto de vista hidrogeológico. No sólo es necesario el monitoreo constante del nivel freático en el lugar bajo análisis, sino que se requiere además de la porosidad efectiva (equivalente a S) en la zona de fluctuación de los niveles. En el cálculo debe verificarse que los niveles no están afectados por bombeos u otras causas. Las estimaciones se hicieron según año calendario para la serie mencionada, aunque se han realizado pruebas para el año hidrológico que no dieron muy significativas diferencias (Blarasin *et al.*, 2011).

Un balance de agua para el acuífero puede ser escrito como muestra la ecuación (1), según Healy (2010):

$$(ecuación 1) \Delta S^{gw} = R - Q^{bf} - ET^{gw} - Q_{off}^{gw} + Q_{on}^{gw}$$

Donde: ΔS^{gw} es el cambio en almacenamiento en la zona saturada (incluye todos los cambios que pueden ocurrir a profundidades mayores a aquellas del *plano de flujo cero*), R es la recarga al acuífero, Q^{bf} es el flujo base, ET^{gw} es la evapotranspiración desde el acuífero y $Q^{gw_{off}}$ y $Q^{gw_{on}}$ se refieren al flujo subterráneo desde y hacia el área de estudio incluyendo bombeos. Estos parámetros se muestran en el diagrama de la Figura 3.

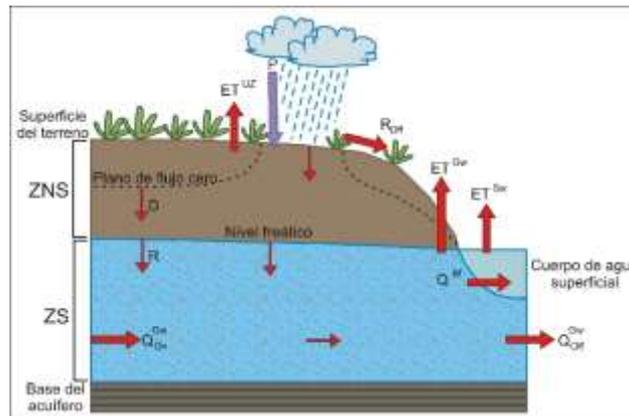


Figura 3. Balance de agua.

El MFN, aplicable a acuíferos libres, se basa en la premisa de que los ascensos de nivel se deben al agua de recarga que llega al acuífero. Si se asume que la cantidad de agua disponible en una columna de base de área unitaria es igual a tantas veces el S por la altura de la columna de agua, la recarga puede ser calculada como la ecuación (2):

$$(ecuación 2) \Delta S^{gw} = R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Donde: R es la recarga, S_y el almacenamiento, h el nivel freático y t , tiempo.

Según Healy (2010) para que la ecuación (2) sea correcta se asume que el agua que llega al nivel freático pasa a integrar el almacenamiento subterráneo y que la evapotranspiración desde el nivel freático, el aporte al flujo base o al flujo regional subterráneo y otras salidas o entradas al sistema subterráneo son nulas. Existe un retardo entre el aporte de la recarga al nivel freático y su redistribución a los otros términos, tales como el flujo base o la evapotranspiración, por lo que, si el método se aplica dentro de ese retardo, se contabilizará toda el agua ingresante por recarga. Esto es válido especialmente en cortos lapsos que van desde horas a pocos días, aunque el método ha sido aplicado con éxito en períodos de años o décadas (Healy, 2010).

Si el MFN se aplica a cada ascenso individual de nivel, se genera una estimación de la *recarga total o bruta*, en la que Δh es igual a la diferencia entre el pico del ascenso y el punto más bajo de la curva de recesión antecedente extrapolada al tiempo del pico (Δh total ó Δh_t , figura 4). La curva de recesión es la traza que hubiera seguido el hidrograma en ausencia de precipitación que produzca el ascenso. Esta extrapolación, según Scanlon *et al.* (2003) tiene en cuenta el efecto de la descarga regional y, según, Boumis *et al.* (2022) las tasas de recesión del agua subterránea son complicadas de calcular, proponiendo nuevos métodos numéricos para ajustar la estimación. La ecuación (2) también puede aplicarse a través de largos periodos de tiempo (estacionales o anuales) para generar una estimación del cambio en el almacenamiento subterráneo ΔS^{gw} . Este valor es a menudo referido como *recarga neta* (Healy y Cook, 2002) y se calcula del mismo modo, pero considerando el cambio

neto de almacenamiento en la zona saturada para cualquier intervalo de tiempo (días, meses, años), colocando ahora el valor Δh en la ecuación (2), que es la diferencia de altura entre el inicio y el fin del intervalo considerado. En este trabajo se tomaron todos aquellos ascensos de nivel observables en el freatograma, asumidos como resultado de llegada de precipitación, y se calculó la *recarga neta* utilizando Δh (Figura 4).



Figura 4. Datos a medir para el cálculo de Recarga y Descarga.

Respecto del almacenamiento S (porosidad efectiva del acuífero libre), además del reconocimiento hidrogeológico del área, contar con datos de perforaciones y realizar análisis granulométricos, se trazó el gráfico precipitaciones versus ascensos de nivel. Al trazar la recta al origen que contiene a todos los puntos medidos, siguiendo a Varni (2002) se consideró que la pendiente de esta recta es un valor máximo de la porosidad efectiva (S) buscada.

Por otro lado, según Healy (2010), si se asumen adicionalmente determinadas condiciones, el MFN puede ser usado para estimar cualquiera de los parámetros involucrados en la ecuación (1) (es decir Q^b , ET^{gw} , etc). Por ello, y teniendo en cuenta trabajos de Schilling y Kiniry (2007), entre otros, que calculan evapotranspiración ET^{gw} considerando la descarga como efecto de este proceso para niveles freáticos someros (asumiendo $Q_b=0$ y $R=0$ para esos momentos) midiendo en las fluctuaciones diurnas los descensos del nivel y multiplicándolos por el S ; se decidió en este trabajo evaluar con criterio similar la *descarga* (D) del acuífero. En este caso lo que se asume es que, si se toma la rama descendente de cada pico en el hidrograma freático, ese descenso del acuífero para el período considerado se atribuye a la *descarga neta*, considerando además que si se está por debajo del *plano de flujo cero* (Healy, 2010), no se debe a evapotranspiración desde el acuífero, si la profundidad del nivel freático es alta. Esta simplificación permite suponer entonces que, si hay descenso del nivel ($R=0$) y $ETR=0$ y, teniendo en cuenta la ecuación (1), el descenso computado es descarga atribuible a Q_b (figura 3), asumiendo además que Q^{gw}_{off} y Q^{gw}_{on} son iguales y de signo contrario. La descarga también puede atribuirse al fenómeno de evapotranspiración cuando el nivel queda más cercano a la superficie, como ocurre en las planicies más bajas con nivel freático somero, aspecto típico en llanuras de áreas planas y deprimidas.

En campo, se realizó un censo de pozos, a partir del cual se extrajeron 2 muestras de agua superficial, 12 muestras del acuífero libre y 6 muestras de sistemas acuíferos semiconfinados para la determinación de Tritio (3H). Las muestras se denominaron con la letra G, seguida por el número de identificación de cada pozo. Se muestreo en botellas plásticas de 1 L, las cuales se conservaron en frío, y se enviaron a ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation) para la determinación de Tritio mediante Recuento de Centelleo Líquido (LSC - Liquid Scintillation Counter). Los

resultados se expresan en actividades de Unidades de Tritio (UT). El límite de cuantificación fue de 0,07 o 0,06 UT según la muestra. Esta determinación permitió estimar la edad del agua en el área de Marcos Juárez, teniendo en cuenta la clasificación propuesta por Basalduá *et al.* (2022) para la región centro este de Argentina, presentada en la tabla 1. Tritio es un buen trazador en aguas con edades entre 1960 y 1990 dado que, a partir de los ensayos termonucleares (bombas) en la década del '50, los niveles de tritio en la atmósfera aumentaron considerablemente, para luego comenzar a disminuir en forma paulatina (Jawerth, 2019).

Tabla 1. Posibles concentraciones de tritio en aguas subterráneas y sus respectivas edades inferidas para la zona centro este de Argentina en 2022.

Unidad de Tritio	Edades inferidas
> 3.2 UT	Predominantemente agua moderna (recargada durante los últimos 10 a 5 años).
2 - 3.2 UT	Existen dos escenarios posibles: agua mayor mente recargada durante el pico de bomba (comienzo de los 60 a mediados de los 70) o mayormente agua recargada desde fines de los 90 a fines de los 2000.
1 - 2 UT	Probablemente agua recargada por completo entre mediados de la década del 70 y finales de los 90.
0.5 - 1 UT	Predominantemente agua recargada entre finales de los 50 y principios de los 60.
< 0.5 UT	Principalmente agua recargada antes de 1960.

Fuente: Basalduá *et al.* (2022).

Aspectos generales del funcionamiento hidrológico subterráneo y áreas de recarga-descarga

Desde el punto de vista de vista regional, la recarga concentrada o focalizada ocurre en la zona pedemontana de las Sierras Pampeanas; formada por diferentes tipos de rocas y valles serranos rellenos con sedimentos. El conjunto recoge agua de las precipitaciones y transmiten agua superficial y subterránea hacia la periferia del sistema montañoso. Como se observa en el mapa de la Figura 5, las direcciones de flujo del acuífero libre, con similitudes de direcciones para las capas confinadas (Blarasin *et al.*, 2014), circulan hacia la zonas bajas de descarga hidrológica regional (Mar de Ansenusa, Bañados del Saladillo y lagunas encadenadas del Sudeste, Depresión de San Antonio y, en traslasierra, Salinas Grandes). La recarga focalizada ocurre debido a que la gran mayoría de ríos y arroyos serranos (arroyos de La Cruz, Achuras, Las Lajas, San Bartolomé, río Seco, El Cano, entre otros) se infiltran en la parte distal del piedemonte y cada uno de ellos ingresa en forma permanente millones de metros cúbicos por año al acuífero libre (con caudales de estiaje que poseen valores de 0,2-6 m³/s.). Este aporte de agua al subsuelo fue un aspecto probado a campo y mediante métodos isotópicos, los que indican que el piedemonte es también área de aporte de acuíferos confinados (Blarasin *et al.*, 2020). Un aspecto significativo es que los diferentes estudios (Blarasin *et al.*, 2014, 2020) muestran que además de la gran infiltración hacia el subsuelo en esas zonas de recarga, se trata de agua dulce (10-500 mg/L). Lo que implica que, al ser áreas con abanicos aluviales de gran conductividad hidráulica (K) e importante espesor, se definen allí, rodeando a la sierra, los mejores acuíferos de la provincia.

En la Figura 6 puede observarse que, para la zona de recarga ubicada en el piedemonte de la Sierra de Comechingones (sitio a), cuando se analiza la variación mensual del nivel freático respecto al valor precedente, se observan típicos hidrogramas de ascenso que se sostienen en las épocas más húmedas, especialmente verano (enero y febrero). Luego ostentan luego una recesión (en

ocasiones en otoño) y descensos sólo en épocas secas (Blarasin *et al.*, 2016). En cuencas medias-altas de la llanura, en el trabajo realizado en Río Cuarto por Blarasin *et al.* (2011) en ambiente eólico, dado que el sitio de medición exhibía el nivel freático a 11,5 m de profundidad promedio, se evaluaron todos los ascensos medibles del nivel que se suponían como respuesta a la llegada de frentes de humedad. En este caso y específicamente en relación a la recarga, ésta acaeció en todas las estaciones. El caso muestra que, a pesar de las escasas lluvias de invierno, llegaban frentes de humedad retardados, ayudados por la menor ETR en esa estación del año (figura 7, sitio b). La recarga fue del orden del 12 % de la precipitación para la serie analizada en ese momento (Blarasin *et al.*, 2011).

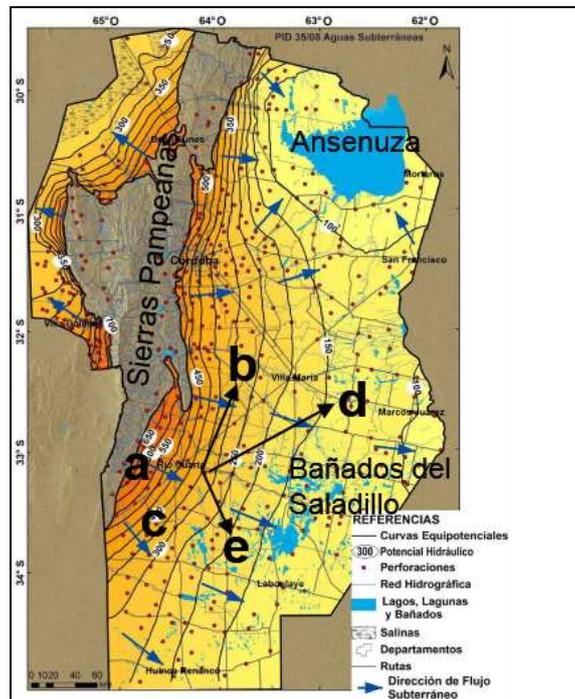


Figura 5. Provincia de Córdoba, flujo de agua en el acuífero libre (Blarasin *et al.*, 2014). Las letras corresponden a distintos sitios donde se estudió la recarga.

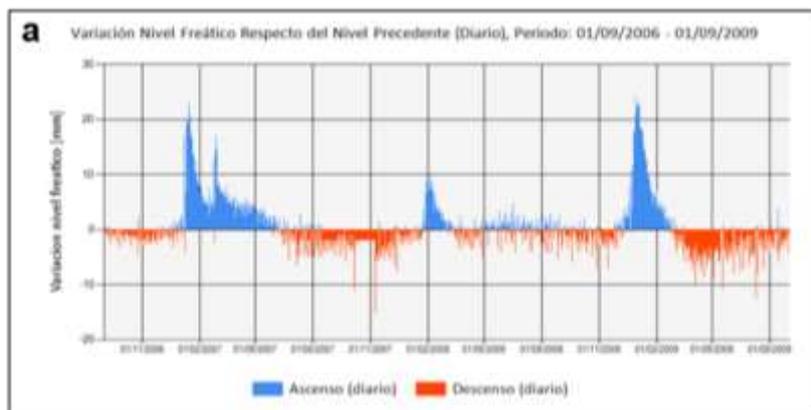


Figura 6. Variaciones del nivel freático en el sitio a: Piedemonte: Variación del nivel freático mensual respecto al precedente 2006-2009 (Blarasin *et al.*, 2016).

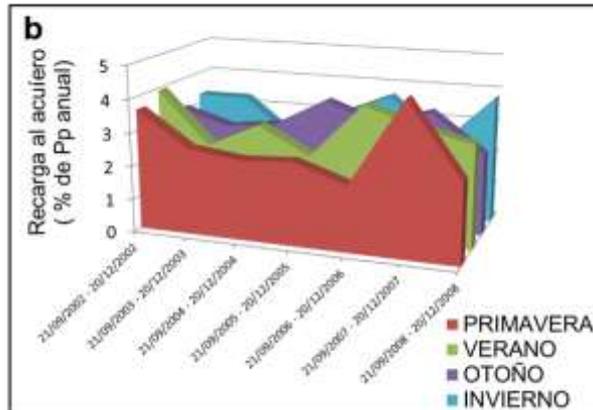


Figura 7. Variación de la recarga en diferentes estaciones del año (2002-2006) en el sitio b: Ambiente loésico de Río Cuarto.

En la figura 8 (sitio c), la recarga calculada en zona de médanos muestra un comportamiento vinculado más fuertemente a la marcha de las lluvias, siendo notoriamente mayor en las estaciones húmedas, pasando de una profundidad del nivel 2,50 a 3,25 m, con una recarga de 12 % de la precipitación (Blarasin *et al.*, 2016). Por otro lado, en la llanura fluvial del río Cuarto en el campus de la UNRC, la variación del nivel freático muestra que el nivel acompaña ciclos más húmedos, aunque no se observan diferencias estacionales tan marcadas como en sectores de sedimentos finos, y la recarga calculada dio en el orden de 20 % (Giacobone *et al.*, 2018).

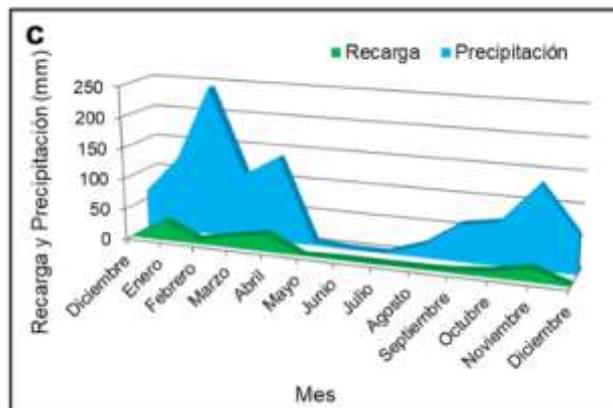


Figura 8. Sitio c: Médanos: Variación de la recarga respecto a la precipitación.

El interés de la figura 9 (sitio d) yace en que, si bien se cortó el registro de datos, puede observarse la variación del nivel piezométrico de una perforación semisurgente ubicada también en el campus UNRC (capa acuífera localizada entre 272-283 m del sistema acuífero confinado SAC 2, Blarasin *et al.*, 2014). A ambas perforaciones se le midieron los isótopos estables, encontrándose valores similares al promedio de precipitaciones de la recta meteórica de Río Cuarto (^2H -25,8 ‰ y ^{18}O -5 ‰), demostrando la recarga por lluvias locales en el acuífero libre (^2H -25,2 ‰ y ^{18}O -4,55 ‰). En cambio, en el caso de la capa confinada, que tiene un tiempo de tránsito del orden de 500 años (Blarasin *et al.*, 2020), los isótopos estables dieron la marca isotópica más empobrecida en deuterio (^2H -27,2 ‰ y ^{18}O -4,91‰), con valores muy similares al sector pedemontano distal (aguas arriba de la ciudad de Río Cuarto), siendo su posible área de recarga. En la Figura 10 (sitio e) se observan elevaciones del nivel piezométrico, que permiten pensar que el flujo pistón tiene fuerte injerencia ya que tal comportamiento demuestra la influencia de aportes de ríos y lluvias en sectores

pedemontanos. Se destaca, además, la menor recarga en años secos que no logra “empujar” nuevos volúmenes de agua cuando también precipita poco en piedemonte. Por ejemplo, en los años 2022 y 2023, donde se registraron marcados descensos de nivel. A continuación, se detalla el análisis en las planicies orientales de la provincia, las que, aunque son fundamentalmente receptoras de aguas procedentes de tierras altas, también reciben agua de lluvia local.



Figura 9. Sitio d: Ambiente fluvial, perforación Campus UNRC: variaciones del nivel freático 2016-2024, máxima variación observada: 1,3 m.



Figura 10. Sitio e. Capa acuífera confinada, Campus UNRC: variaciones del nivel piezométrico 2016-2024, máxima variación observada: 1,4 m.

Planicie de Marcos Juárez: geología, hidrogeología y clima

La zona de estudio está caracterizada por la presencia de sedimentos de origen fluvial y aluvial efímero y eólicos de edad Paleógena superior a Holocena (Carignano, 1999; Iriondo y Kröhling, 2007). Se reconocen 3 grandes ambientes geomorfológicos representativos (Figura 11, Giacobone *et al.*, 2022):

I. Bloque elevado de San Guillermo: morfoestructura elevada, limitada por el sistema de fallas de Tostado-Selva, la falla Rafaela y el Trébol (Kröhling e Iriondo, 2003; Brunetto *et al.*, 2019). Se encuentra atravesada por paleo cañadas de dirección SO-NE. La sedimentación del Pleistoceno tardío y Holoceno generó potentes depósitos eólicos finos en esta unidad.

II. Planicie Fluvio-eólica: llanura formada por la coalescencia de grandes abanicos aluviales, originados por los ríos que nacen en las Sierras Grandes (Degiovanni *et al.*, 2005; Carignano *et al.*, 2014). Dentro de ella, se observan dos diferentes dominios deposicionales, uno fluvial, que abarca zonas pequeñas en la zona de estudio como ser abanicos aluviales y fajas fluviales actuales. Otro dominio, de origen principalmente eólico, que está conformado por la Planicie loésica de

Marcos Juárez, que es prácticamente horizontal y posee escaso drenaje. También se observa surcada por paleocañadas de dirección SO-NE.

III. Depresión tectónica de la Cañada de San Antonio: depresión estructural que conforma un importante bajo topográfico. En épocas húmedas es muy anegable debido a su baja pendiente (0,3 %) que inclina hacia el SE. En ella circula el Arroyo Tortugas (actualmente canalizado) y concentra la mayoría de los escurrimientos superficiales O-E que llegan desde las planicies orientales cordobesas.

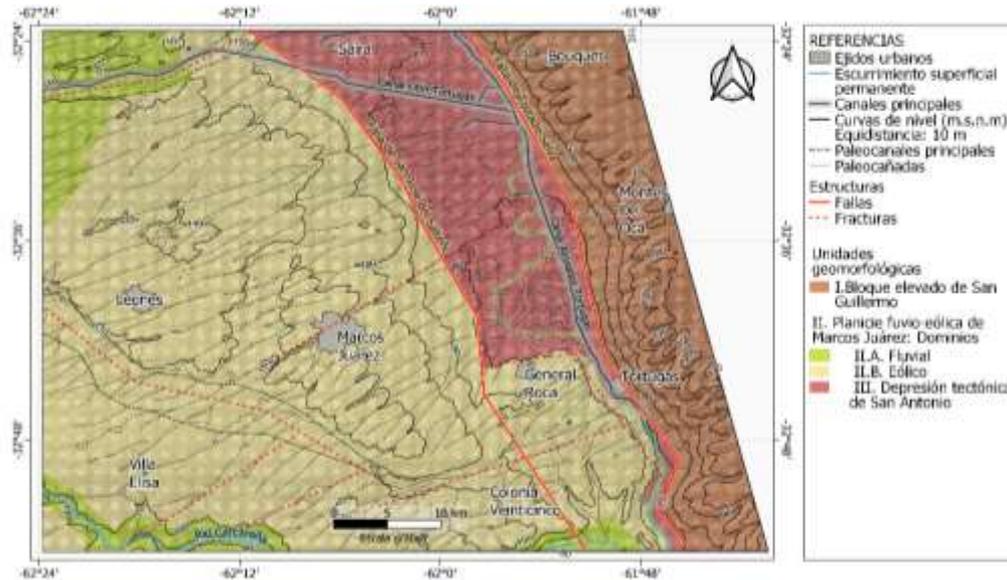


Figura 11. Mapa geológico-geomorfológico.

Los suelos de la zona son productivos por su gran contenido de materia orgánica, desde 2,5 a 3,5 %, según IDECOR (2023). Se desarrollan sobre materiales de textura franco-limosa y son en general arcillosos, grises y oscuros, predominando los de orden Molisol (Cruzate *et al.*, 2010): En zonas de planicie y lomas hay Argiudoles típicos y Argiustoles údicos, mientras que en áreas de baja pendiente pasan a ser Natracuoles típicos; en las zonas inundables pertenecen al orden Natricualf (Natracualfes típicos).

Hidrogeológicamente, la provincia de Córdoba se caracteriza por una sucesión de sedimentos del Paleógeno Superior a Cuaternario cuyas características establecen el comportamiento de las formaciones acuíferas, acuitardas y acuícludas del subsuelo (Blarasin *et al.*, 2014). Dentro del modelo hidrogeológico conceptual, la recarga regional principal de los distintos sistemas acuíferos se da en las áreas serranas y el piedemonte (Blarasin *et al.*, 2014; Giacobone *et al.*, 2023). El agua subterránea fluye a diferentes profundidades hacia el Este a medida que envejece, y el acuífero libre continúa recibiendo recarga a partir de las precipitaciones. El acuífero libre del área de estudio (Blarasin *et al.*, 2020; Giacobone *et al.*, 2022) muestra una gran participación de sedimentos loésicos, de origen eólico. Los materiales desde la superficie del terreno hasta los 8-15 m son eólicos (limos y arenas muy finas). Le siguen entre 15-75 m de profundidad arenas eólicas muy finas con presencia variable de carbonatos (dispersos como sales, nódulos, o capas de espesor variable). Entre estas arenas eólicas se destacan lentes de arenas finas o medias de mejor aptitud hidrogeológica. A partir de los 60-100 m de profundidad se encuentran niveles que actúan como base del acuífero libre, de material arcilloso, o arenas limosas/arcillosas de colores pardos o rojizos, con espesores muy variables (de 10 a 50 m, Figura 12).

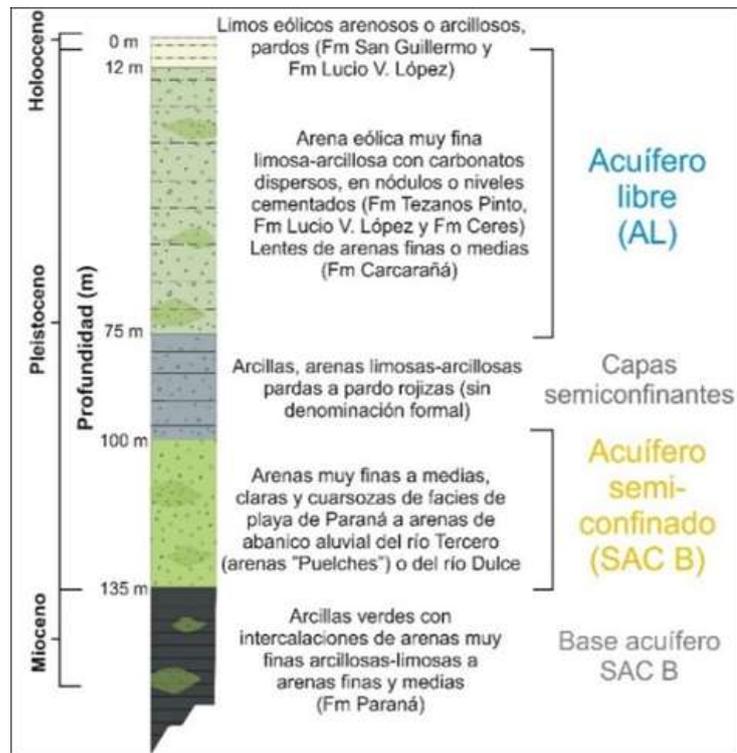


Figura 12. Esquema de una perforación tipo en el área de Marcos Juárez, Córdoba.

La caracterización hidráulica del acuífero (Giacobone *et al.*, 2022) se muestra en el mapa de equipotenciales de la Figura 13. Si bien las velocidades de circulación del agua son muy bajas (desde 0,004 a 0,025 m/d en las zonas de bajo gradiente hidráulico, a 0,04 a 0,08 m/d en las zonas de mayores gradientes), se observa un flujo centrípeto con dirección hacia la depresión de la Cañada de San Antonio. El acuífero libre es influente en el Arroyo Tortugas, y parcialmente, la dirección de flujo también se dirige hacia el río Tercero. Las unidades hidrogeológicas coinciden con las unidades geológicas-geomorfológicas descritas en Jacobone *et al.* (2022), cuyas características se enumeran a continuación:

I. Bloque elevado de San Guillermo: los valores de conductividad hidráulica (K) están en el orden de 0,1 a 10 m/d, por ende las transmisividades (T) son muy variables, desde 7,5 a 750 m²/d.

II. Planicie fluvioeólica: las conductividades hidráulicas varían desde 0,5 a 3 m/d, en casos puntuales hay sitios de hasta 10 m/d. La transmisividad varía desde 25 a 225 m²/d.

III. Depresión tectónica de San Antonio: los valores de conductividad hidráulica son más bajos, del orden de 0,2 m/d y por ende las transmisividades están en el orden de los 15 m²/d.

En función de las características granulométricas y cálculos realizados, el coeficiente de almacenamiento (S) del acuífero libre se encuentra en el orden entre 6 y 10%, más especificaciones sobre este valor se detallan junto al análisis de la recarga.



Figura 13. Mapa de equipotenciales del acuífero libre.

El nivel freático (Figura 14) varía con la topografía (que es en general muy suavemente ondulada) y es somero. Las profundidades varían desde pocos centímetros por debajo de la superficie del terreno, en el NO de la Planicie Eólica de Marcos Juárez y en la depresión Tectónica de la Cañada de San Antonio (por donde escurre el Arroyo Tortugas), hasta 8 m al Este de la localidad de Marcos Juárez y en el Bloque Elevado de San Guillermo. Sólo una perforación situada sobre el bloque estructural muestra una zona no saturada de mayor espesor, con la profundidad del nivel freático a casi 20 m, al ser una zona más elevada topográficamente.

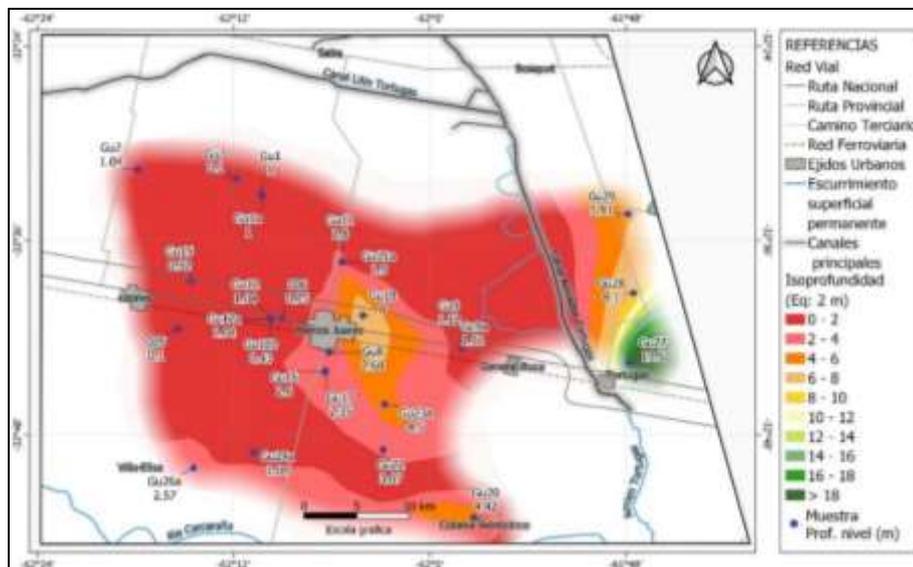


Figura 14. Mapa de isopropfundidad del acuífero libre.

El clima es mesotermal subhúmedo-húmedo con poca a nula deficiencia de agua. El valor medio de precipitaciones es de 916,5 mm de la serie analizada (1970-2022), de las cuales casi el 70% se acumula en primavera-verano, específicamente desde el mes de octubre hasta abril. En el balance hídrico del suelo de promedios mensuales no se observó déficit, y los excesos hídricos se dan en los meses de octubre, noviembre y abril, los que, como es conocido, se reparten en escurrimiento superficial

e infiltración eficaz (recarga al acuífero). El balance hídrico seriado de paso mensual para cada uno de los años de la serie permite mejores interpretaciones del funcionamiento del sistema, observándose períodos alternantes de déficit (invierno y parte del otoño) y de excesos (fundamentalmente primavera y verano). Los años más deficitarios de la serie, como se observa en la Figura 15, fueron 1997, 2008 y 2022.

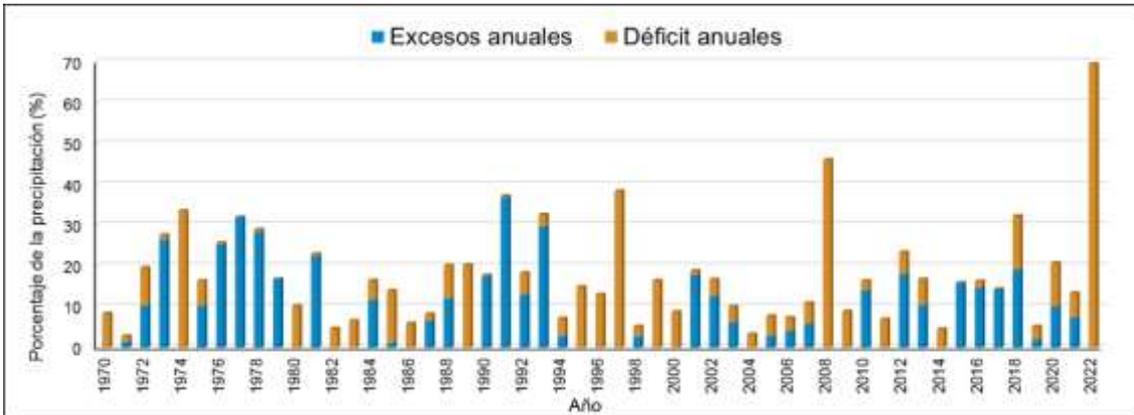


Figura 15. Excesos y Déficit Hídricos como porcentaje de la Precipitación calculado para la Serie tipo del Observatorio Agrometeorológico de la EEA INTA Marcos Juárez.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambios de nivel freático y relación con la precipitación

Como primera aproximación a la recarga del acuífero en esta planicie, se observa el importantísimo ascenso que ha sufrido el nivel freático en los últimos 50 años (Figura 16), pasando de 11 m de profundidad en la década del '70 a niveles menores a 2 m a partir del año 2013 y hasta el 2021. Se observan varios picos de aumentos abruptos del nivel freático, entre los que se pueden nombrar los de los años 1976, 1990 y 2013, que se corresponden a los inicios de ciclos húmedos con precipitaciones mayores a la precipitación media anual de la serie. En algunos sectores topográficamente más bajos, estos ascensos de nivel freático generaron anegamientos, como los ocurridos en la ciudad de Marcos Juárez en enero de 2017 y en mayo de 2021 (Figura 17).

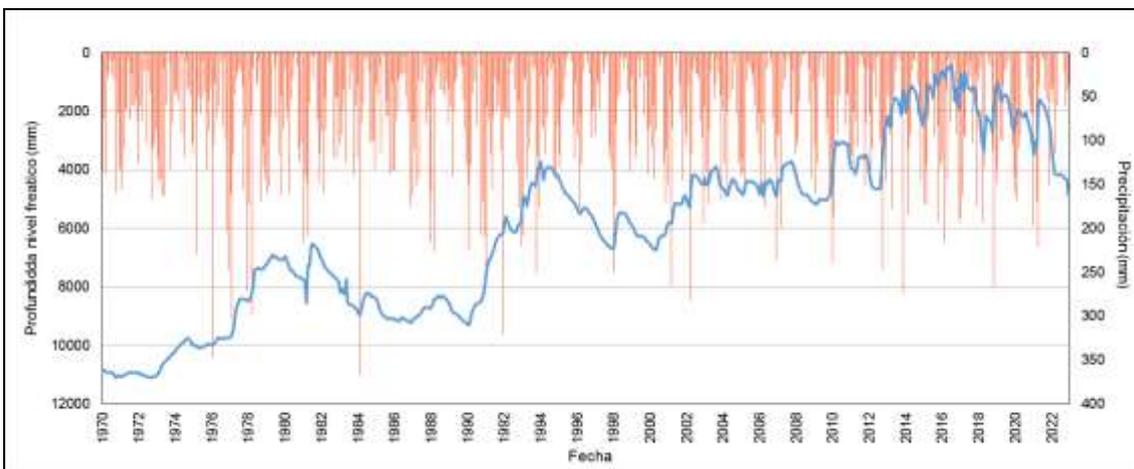


Figura 16. Nivel freático versus precipitaciones. Serie EEA INTA Marcos Juárez (1970-2022).

Según Bollatti *et al.* (2016) la variación del nivel freático tiene una alta correlación con el balance hídrico anual, estando influenciada por los cambios en el uso del terreno ocurridos desde la década de los '70, que no tiene en cuenta la oferta hídrica de la zona. Estos cambios se relacionan a que a mediados de la década de '70 y principios de la del '80, el área de Marcos Juárez pasó de tener un 40% de su superficie ocupada con cultivos anuales y 60% con forrajeras y pastizales, a un cambio en la proporción de siembra entre gramíneas y soja y la disminución de la siembra de trigo (que mermó nuevamente luego del año 2010). Posteriormente, en la década del '90, ocurre la implementación masiva de la siembra directa. Desde fines del 2021 y en 2022 se ha registrado una disminución importante del nivel freático a valores en el orden de 4 m de profundidad, relacionada a la disminución de las precipitaciones.



Figura 17. a y b Zona anegada en enero de 2017 vs sin anegamiento enero de 2021 en la zona de Marcos Juárez. Fuente: Consorcio Canalero Marcos Juárez. c. Canales de drenaje realizados en Marcos Juárez debido al ascenso de nivel freático por las abundantes precipitaciones a principios de abril de 2021. d. Ciudad de Marcos Juárez durante el temporal de abril de 2021. Fuente: La Voz (2021). Fuente: Consorcio Canalero de Marcos Juárez.

Por otro lado, si se observa la variación del nivel freático mensual respecto al precedente (Figura 18) se destaca que las variaciones de ascensos y descensos son levemente mayores para los ascensos, con una variación máxima de un 1,4 m.

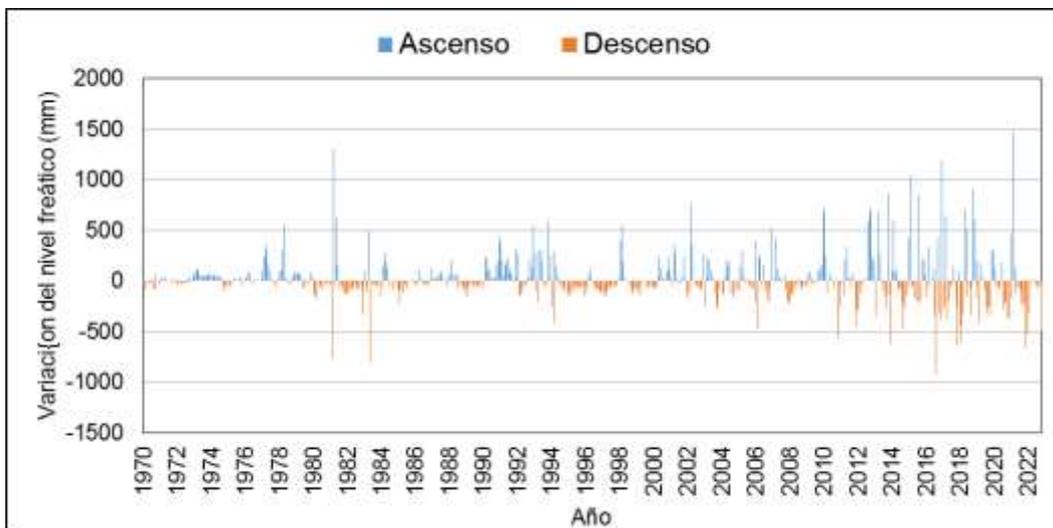


Figura 18. Variación del nivel freático mensual respecto al precedente. Serie 1970-2022.

La inercia en la descarga es alta en ésta y otras zonas deprimidas de la llanura (Ferreira y Rodríguez, 2005), es decir que se descargan lentamente. Esto se observa en variaciones de los descensos de un mes al otro, que no superan el metro. Así, el aumento en el almacenamiento de agua y consecuentes ascensos de nivel son notorios. Un aspecto importante de la descarga es el tema de la evapotranspiración, sobre todo en zonas con cultivos de soja cuyas raíces pueden extenderse eventualmente hasta 1,5-2 m de profundidad (InfoCampo, 2022). Aunque el uso del suelo se mantiene parecido en los últimos 30 a 35 años y mermó el uso de trigo desde 2010, hay un notorio acompañamiento de los cambios en el tren de datos de precipitaciones con los de variaciones de nivel y la recarga al acuífero. No obstante, debe destacarse que cambios más notorios del comportamiento ascensos-descensos de nivel freático (Figura 14) a partir de 2010, pueden estar vinculados a la cercanía del nivel freático a superficie y su afectación directa por evapotranspiración real.

Análisis de la recarga

La recarga se calculó con paso mensual según año calendario, para la serie de niveles freáticos (1970-2022) en el sitio disponible de la EAA del INTA Marcos Juárez, y utilizando un coeficiente de almacenamiento (S) de 7,59%.

Se debe tener en cuenta que, a pesar de la gran homogeneidad de los materiales loésicos, las heterogeneidades propias de los depósitos sedimentarios pueden generar variaciones en los parámetros hidráulicos. De modo que, para elegir un valor de coeficiente de almacenamiento confiable, se tuvieron en cuenta los antecedentes mencionados. Ensayos de bombeo estimaron valores del orden de 3 a 4,2% para el loess en la zona de Rio Cuarto (Blarasin, 2003) mientras que para la llanura pampeana hay valores citados (Varni 2002, Blarasin *et al.*, 2014) del orden de 3 y 10%. A partir de análisis granulométrico realizados para el acuífero libre de Marcos Juárez y usando gráficos (Chilton, 1996), se estimaron valores entre 6,4 y 7,5%. Finalmente, para conseguir un valor de coeficiente de almacenamiento representativo, se sumó el criterio de la metodología propuesta por Varni (2002) utilizando la recta envolvente de los ascensos versus precipitaciones. En una primera instancia se realizó el gráfico con todas las precipitaciones, presentado en la Figura 19, obteniéndose una recta envolvente de pendiente $y=8,88x$. Es decir, un S de 8,9%. Contrastando estos valores con los de otras zonas de la Llanura pampeana y fundamentalmente con la litología local, se decidió utilizar un coeficiente de almacenamiento promedio entre los calculados según granulometrías (7,5 y 6,4%) y el de la recta envolvente (8,9%) para realizar los cálculos de recarga, que resultó en el orden de 7,6%.

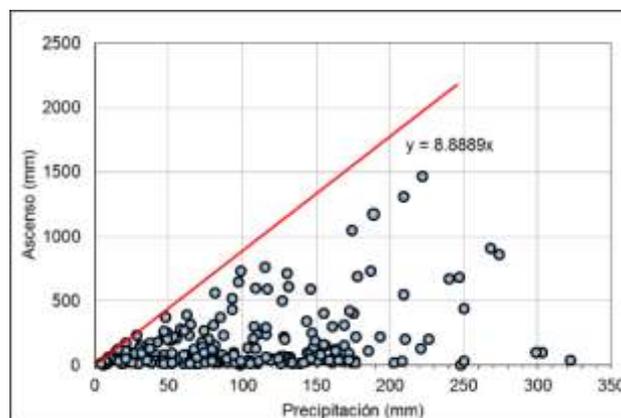


Figura 19. Gráfico de dispersión de ascensos del nivel freático versus precipitación, la recta envolvente de los datos se representa con el color rojo.

Cuando se analiza el comportamiento de la recarga (Figura 20) se observa que se sitúa principalmente durante los ciclos húmedos y en los años más lluviosos dentro de ciclos secos, en forma de picos abruptos. Hay un claro aumento que comienza levemente en la década de 1990, mientras que se observa un incremento claro y continuo entre 2000 y 2020, comenzando luego a decaer en los últimos 3 años de sequía, notoria en toda la región. Si bien en el sitio de toma de datos de la Estación de la EEA INTA Marco Juárez, uso del suelo no es notoriamente variable, en el entorno sí puede serlo. Como se indicara, se aplicó la siembra directa desde los '90. Esto podría haber influenciado en un menor escurrimiento y mayor infiltración. Sin embargo, se observa un fuerte acompañamiento con las precipitaciones y un leve comportamiento diferencial en los años en que el nivel, después de 2010, se instala más cerca de la superficie del terreno, lo que podría indicar la influencia de los cultivos en los descensos por evapotranspiración real. Los valores absolutos de la descarga también muestran un aumento a lo largo de la serie como muestra la figura 21, pero dichos valores son menores que la recarga. Las mayores descargas se asocian a los fines de los ciclos húmedos y a los ciclos secos, siendo el mayor valor de descarga el acumulado en el último ciclo seco (Figura 17). Puede observarse que las líneas de tendencia de recarga y descarga son similares, pero es mayor la pendiente de la recarga, lo que explica, aunque con leve diferencia entre ellas, la tendencia al almacenamiento de agua en el acuífero. Es decir, se observa una inercia del sistema y una tendencia a almacenar agua. La descarga ocurre lentamente hacia la depresión de la Cañada de San Antonio.

El análisis realizado permitió observar que la recarga fue superior a la descarga con un valor a favor de la primera del orden de los 458 mm para toda la serie. En una estimación general del ascenso para esa lámina de agua para el coeficiente de S estimado en el orden de 7,6%, a partir de la ecuación (2), se obtiene un ascenso de nivel total del orden de los 6 m (es decir, el ascenso promedio total calculado entre inicio y fin de la serie) es casi coincidente con el medido (5,97 m).

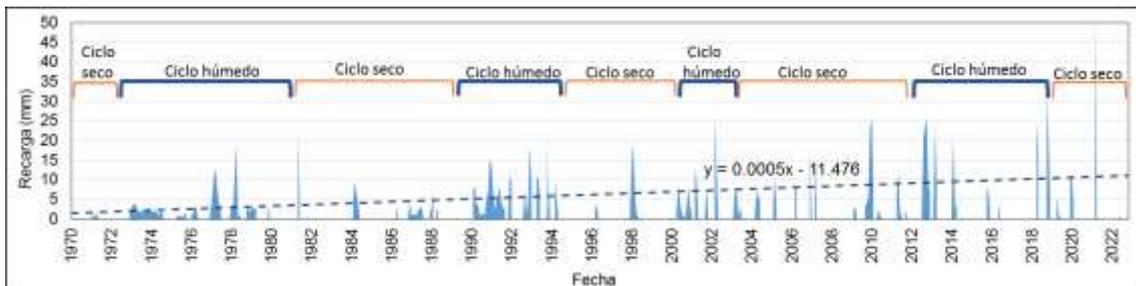


Figura 20. Recarga calculada.

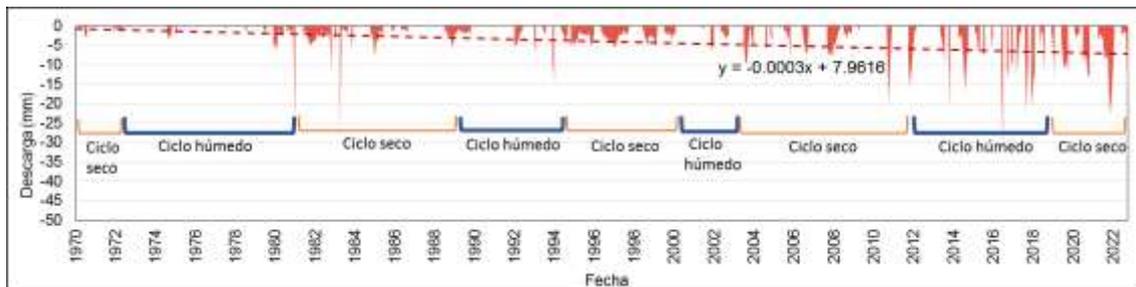


Figura 21. Descarga calculada.

Las recargas medias mensuales contrastadas con las precipitaciones medias anuales de la serie climática tratada, se observan en el gráfico de la figura 22. Se distingue que la tendencia a la recarga es mayor luego de Septiembre (momento en el

que se comienza a reponer la humedad del suelo), específicamente desde Noviembre a Mayo, donde se dan excesos hídricos, teniendo en cuenta que en Diciembre disminuye (lo cual se relaciona con el aumento de la tasa de evapotranspiración, que no permite generar una recarga efectiva del acuífero libre, ya que en ese momento las plantas utilizan la humedad del suelo). En el mes de abril, dado que se generan precipitaciones otoñales abundantes y la tasa de evapotranspiración es menor, se obtienen excesos hídricos y se localiza la mayor recarga. La tasa de recarga resultó en un promedio de 7,6% de la precipitación total. Polare y Vives (2021) calcularon una recarga para Marcos Juárez de 6,5%, similar al hallado en este trabajo.



Figura 22. Comparación entre precipitaciones y recargas medias mensuales.

En el siguiente gráfico (figura 23) se observa la media móvil para las precipitaciones y la recarga en la serie de datos analizada, pudiendo observarse un acompañamiento general en los aumentos de ambas.

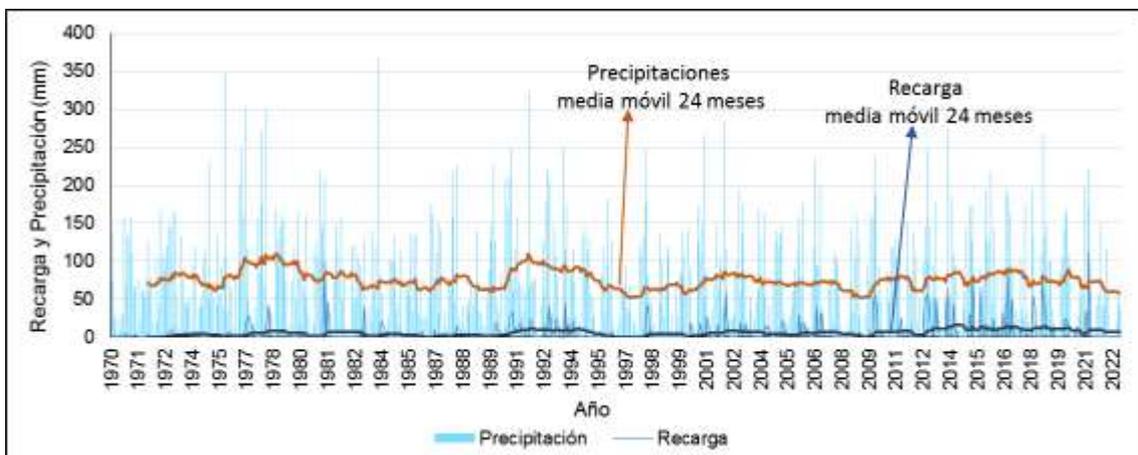


Figura 23. Comparación entre medias móviles (24 meses) de precipitación y recarga al acuífero de la serie analizada.

La recarga al acuífero a partir de lluvias se constata también por los datos de Tritio (^3H) medido en aguas subterráneas. Como se observa en la figura 24, los datos de Tritio medido las muestras de agua son variables, entre 0,26 a 9,11 UT. Como se observa en la figura, las muestras más someras muestran valores más altos, lo que indica que las perforaciones extraen agua que fue más recientemente recargada al acuífero libre por las precipitaciones locales. Según la clasificación de Basaldúa *et al.* (2022) para el centro este del país, la muestra obtenida del pozo G3 es la que extrae el agua más moderna de todas, recargada durante los últimos 10 a 15 años, y es correspondiente a un freáticografo instalado al lado de lagunas formadas por lluvias de

semanas anteriores al momento del muestreo. Las perforaciones G15 y G16 presentan dos escenarios: pueden ser aguas recargadas durante el pico de Tritio generado por las bombas termonucleares, (mediados de los '60 a mediados de los '70), o bien desde fines de los 90 a fines de 2000 (aguas del orden de 25 años aproximadamente). Las perforaciones G7 y G9 se asumen como recargadas en mediados de los '70 y fines de los '90 (de 25 a 50 años). Con respecto a G12, G17 y G8, a finales de '50 y principios de los '60, (aproximadamente 65 a 70 años), mientras que G18, G4, G1 y G11 antes de 1960, es decir, sería agua recargada previo a las explosiones de bomba nucleares, de más de 60 años. Estas últimas son aguas que provienen de perforaciones de hasta 20 m de profundidad y deberían evaluarse para conocer si, por ejemplo, tienen esa edad o se han mezclado con aguas más viejas luego de muchos años de extracción. En el acuífero semiconfinado (100-135 m de profundidad), Tritio estuvo ausente y como se indica en el trabajo de Giacobone *et al.* (2023), se trata de aguas viejas de edades el orden de 20.000 a 30.000 años, cuya área de recarga fue identificada con isótopos estables en el flanco oriental de las Sierras de Las Peñas (Figura 25).

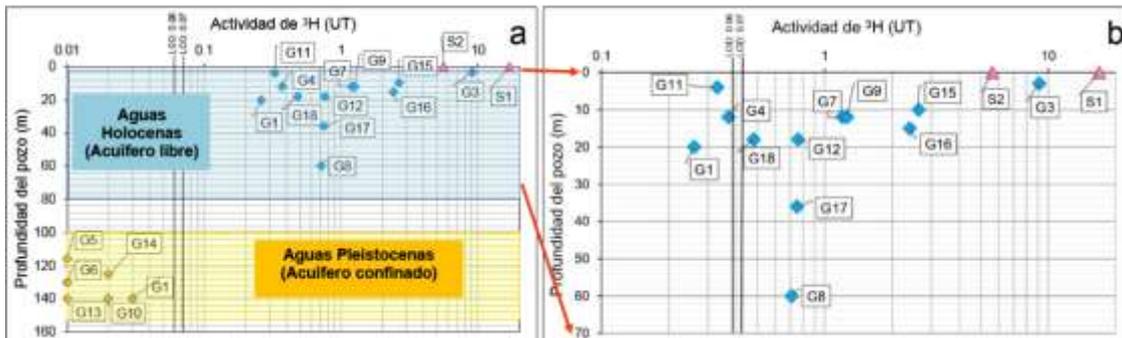


Figura 24. Concentraciones de Tritio (³H) medidas en el acuífero libre de la zona de Marcos Juárez. a. Acuífero libre y semiconfinado y b. Zoom de las muestras del acuífero libre.

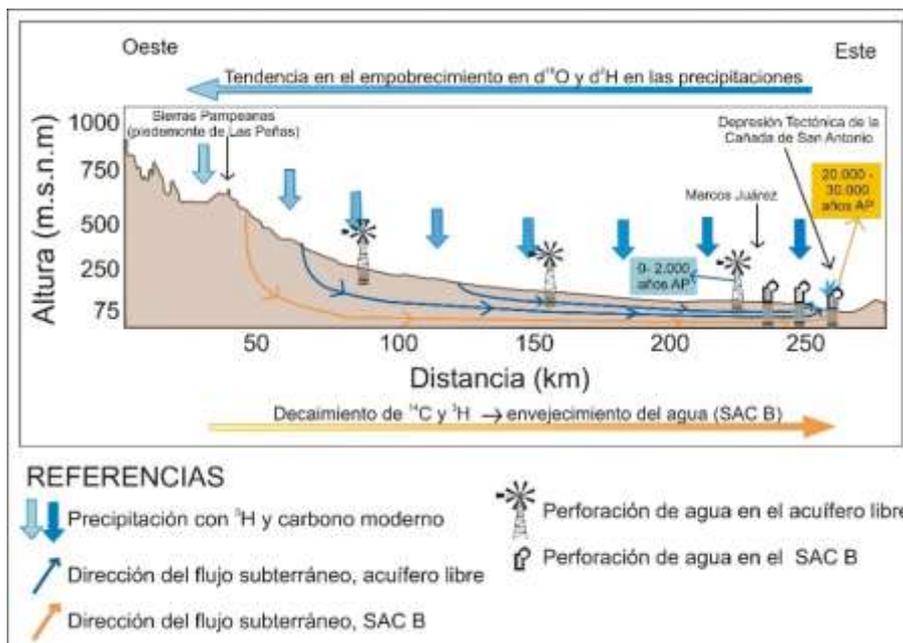


Figura 25. Sistema de flujo de aguas subterráneas de las sierras a las planicies (Giacobone *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

Se considera que es de interés hidrogeológico aportar ideas regionales basadas en diferentes evidencias (geológicas, hidrológicas, químicas e isotópicas) para contextualizar la recarga a los acuíferos desde el punto de vista espacial y temporal. En ese sentido, se han logrado progresos continuos para la provincia de Córdoba. Desde la perspectiva regional, a partir de trabajos citados en el texto, a los que se suman evidencias de las planicies orientales descritas en este trabajo. Queda claro que la zona principal de recarga desde el punto de vista espacial se localiza en la Sierras Pampeanas de Córdoba y su piedemonte. Este comportamiento está sostenido por la configuración de la red de flujo de aguas subterráneas, por la verificación de la infiltración de los arroyos al salir de las sierras y por los datos isotópicos.

Desde el punto de vista espacial, los acuíferos se recargan a partir de las precipitaciones en todos lados en los que haya zona no saturada disponible, pero este efecto es diferencial dependiendo fuertemente de la litología y el relieve. En el primer caso, se observó que existe mayor recarga en las zonas medanosas de arenas finas, en fajas fluviales y menor en ambientes loésicos. En el caso del relieve, fuertemente controlado por estructuras geológicas en la provincia, define en forma sustancial la profundidad del nivel freático, según las diferentes geoformas y alturas relativas.

Desde el punto de vista temporal, en piedemonte, médanos y fajas fluviales de cuencas medias, la recarga se observa más influenciada por las estaciones, aunque en sectores de nivel freático más profundo, los frentes retardados y la menor ETR de invierno puede aportar recarga al acuífero en todas las estaciones.

Las planicies orientales de la provincia, como es el caso de la planicie de Marcos Juárez, (analizada en forma específica en este trabajo), son fundamentalmente receptoras de flujos de agua desde las tierras más altas. Esto hace que tengan una importante inercia en la descarga y almacenen agua en el acuífero y, si bien Marcos Juárez tiene una importante zona de descarga en la depresión cercana de la Cañada de San Antonio, el almacenamiento en el acuífero ha sido muy evidente, especialmente entre 1973 y 2021. Luego comenzó a bajar el nivel, debido a la sequía de los 2 últimos años, una de las sequías más importantes de las últimas décadas. Esto que marca además la importancia de la alimentación por parte de precipitaciones.

En el trabajo se ha observado que, a partir de las estimaciones, desde 1970 hasta la fecha, la recarga ha ido variando en porcentajes, con un promedio del orden de 7,5% de las precipitaciones, valor similar a lo hallado en otros trabajos. La zona no saturada, aunque de poco espesor durante los últimos años, ha permitido entrada de agua de precipitaciones para efectivizar la recarga, aspecto verificado con la presencia de Tritio en el acuífero libre, especialmente en la parte superior del mismo (20 m superiores). Así, es coincidente el comportamiento temporal de la recarga con la marcha de las precipitaciones, es decir, los períodos más húmedos son los de mayor recarga en la serie analizada. Desde el punto de vista estacional, se ha encontrado que en promedio las mayores recargas ocurren en febrero, enero, marzo e incluso abril, y es típico que, a principios del otoño, luego de meses con mucha agua disponible en el perfil del suelo, aumente la percolación y se recargue el acuífero.

Es evidente que pueden hacerse más minuciosos análisis para llanuras con pobre drenaje como la estudiada. Por ejemplo, evaluar en forma más detallada el comportamiento en las cuatro estaciones del año, cambios de uso del suelo eventuales en el entorno (si bien desde la implantación de la siembra directa los cultivos se mantienen en forma similar) y, además, efectos del drenaje por parte de canales. Tal evaluación implica monitorear en otros sitios de interés para observar la

fluctuación de niveles en esas situaciones. Sería de interés también hacer comparaciones entre recarga bruta y neta, entre recarga neta y evapotranspiración real, evaluar las tormentas minuciosamente para seleccionar aquellas que generan efectivamente ascensos, analizar el comportamiento de lluvias de poco monto y su efecto en recargas notorias (probablemente vinculadas a grietas en los suelos arcillosos que permiten la rápida llegada del agua que infiltra), evaluar el comportamiento de la evapotranspiración en las zonas más bajas de la Depresión Tectónica de San Antonio, y evaluar si para este sector se encuentran diferencias notorias en los resultados de recarga entre año hidrológico y calendario.

BIBLIOGRAFÍA

- Andreucci, A., Conde, M. B., Bollatti, P., Díaz, R., Masiero, B., & Arce, E. (2016).** Análisis del régimen de precipitaciones y nivel freático en la EEA INTA Marcos Juárez. Período 1948-2015. Actualización publicación técnica N° 1 1980. Las lluvias en Marcos Juárez (Prov. de Córdoba) Régimen pluviométrico-Período 1948-1977. Ediciones Inta. *Información Para Extensión N, 18.*
- Blarasin, M., Cabrera, A., Matiatos, I., Lutri, V., Maldonado, L., Giacobone, D., Matteoda, E., Becher Quinodoz, F., Giuliano Albo, J., Eric, C., & Felizzia, J. (2020).** Application of isotope techniques to enhance the conceptual hydrogeological model and to assess groundwater sustainability in the Pampean plain in Córdoba, Argentina. *Isotopes in Environmental and Health Studies, 0(0), 402–417.*
- Blarasin, M., Cabrera, A., & Matteoda, E. (2014).** Aguas subterráneas de la Provincia de Córdoba. Comps.: M. Blarasin ; A. Cabrera y E. Matteoda. - 1a ed. - Río Cuarto : UniRío Editora.
- Blarasin, M., Quinodóz, F. B., Cabrera, A., Matteoda, E., Alincaastro, N., & Albo, G. (2016).** Weekly and Monthly Groundwater Recharge Estimation in A Rural Piedmont Environment using the Water Table Fluctuation Method. *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR), 2(5), 104–113.*
- Blarasin, M. (2003).** *Geohidrología ambiental del Sur de Córdoba, con énfasis en la ciudad de Río Cuarto y su entorno rural.* Tesis Doctoral (Inédito). Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Blarasin, M., Cabrera, A., & Alincaastro, N. (2011).** Evaluación del nivel freático y consideraciones en relación a procesos de recarga/descarga del acuífero. Río Cuarto, Cba. In *7º Congreso Argentino de Hidrogeología. Actas* (pp. 222–227).
- Bollatti, P., Andreucci, A., & Escolá, F. (2016).** Influencia de los excedentes hídricos en la recarga de los acuíferos libres del sudeste de la provincia de Córdoba. En *Actas del XXIV Congreso AAPRESID: RESILIAR* (pp. 6).
- Boumis, G., Kumar, M., Nimmo, J. R., & Clement, T. P. (2022).** Influence of Shallow Groundwater Evapotranspiration on Recharge Estimation Using the Water Table Fluctuation Method. *Water Resources Research, 58(10), 1–15.*
- Cabrera, A. E. (2009).** *Evolución hidrogeoquímica e isótopos ambientales del sistema acuífero asociado a los ambientes morfotectónicos de la falla regional Tigre Muerto.* Córdoba. Argentina. Tesis Doctoral (Inédito). Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Cruzate, G. A., Pizarro, M. J., Banchemo, S., & Mercuri, P. (2010).** Infraestructura de datos espaciales del INTA-GEOINTA. *V Jornadas IDERA. Santa Fe.*
- D'Elia, M., Tujchneider, O., Paris, M., Perez, M., & Gervasio, S. (2008).** Groundwater recharge assessment using environmental tracing methods. *5th International Conference on Tracers and Tracing Methods-Tracer, 5, 2002.*
- Ferreira, C. G., & Rodríguez, L. B. (2005).** Usos de niveles freáticos para la caracterización de la recarga/descarga. *XX Congreso Nacional Del Agua, Mendoza, Argentina.*
- Fili, M., Tujchneider, O., D'Elia, M., Paris, M., & Pérez, M. (2000).** La influencia de las aguas subterráneas en el anegamiento de un sector de la llanura pampeña en la República

Argentina. *Águas Subterrâneas*.

- Geneviève, L., Romain, C., & Marie-Amélie, B. (2020).** Water-table fluctuation method for assessing aquifer recharge: application to Canadian aquifers and comparison with other methods. *Hydrogeology Journal*, 28(2), 521–533.
- Giacobone, D. B., Blarasin, M., Lutri, V., Matteoda, E., Cabrera, A., Cendon, D. I., Currell, M., Cabrera, A. E., & Aparicio, V. (2022).** Hydrogeological and isotopic evaluation of aquifer layers and their relation with atrazine presence. *Agrociencia Uruguay*, 26(NE3), e957-e957. 14p.
- Giacobone, D. B., Blarasin, M., Matteoda, E., Lutri, V., Pramparo, S., Cabrera, A., Schroeter, P. G., Pascuini, M., & Becher Quinodoz, F. (2023).** Groundwater characterization of aquifer layers using multiple isotopes approach in the Pampa Plain. En *International Symposium on Isotope Hydrology*. International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Giacobone, D., Blarasin, M., Matteoda, E., Lutri, V., Maldonado, L., & Cabrera, A. (2018).** Assessment of groundwater volumes and quality suitability for different uses. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*. Vol. 5, n°4. p. 52-58.
- Healy, R. W. (2010).** *Estimating groundwater recharge*. Cambridge university press.
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002).** Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91–109.
- IDECOR. (2023).** *Materia orgánica del suelo*. <https://gn-idecor.mapascordoba.gov.ar/maps/299/view>. Último acceso: Mayo de 2023.
- InfoCampo. (2022).** *Soja y maíz: el agua en el segundo metro de suelo, otra clave en un año de sequía*. <https://www.infocampo.com.ar/soja-y-maiz-el-agua-en-el-segundo-metro-de-suelo-otra-clave-en-un-ano-de-sequia/>. Último acceso: Septiembre de 2023.
- Jawerth, N. (2019).** Gestión del balance hidrológico mediante la técnica del tritio/helio3. *El Agua, Boletín Del OIEA*, 20–21. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull60-1/6012021_es.pdf. Último acceso: Septiembre de 2023.
- Maldonado, L. (2014).** *Evaluación hidrogeológica, hidroquímica e isotópica de acuíferos confinados del Sur de Córdoba*. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Moon, S. K., Woo, N. C., & Lee, K. S. (2004).** Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 292(1–4), 198–209.
- Polare, M., & Vives, L. (2021).** Cuantificación de la recarga al acuífero en el sector inferior de la cuenca del Río Carcarañá. *Cuadernos Del CURIHAM*, 27, 69–84.
- Ravelo, C., & Machado, H. (1999).** Software *PDIWin 1.0* (1.0 p Windows). CREAN. Facultad de Ciencias Agrarias. UNC.
- Sanper, J. (1999).** *Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V. 1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. Enresa.
- Scanlon, B. R., Mace, R. E., Barrett, M. E., & Smith, B. (2003).** Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of Hydrology*, 276(1–4), 137–158.
- Schilling, K. E., & Kiniry, J. R. (2007).** Estimation of evapotranspiration by reed canarygrass using field observations and model simulations. *Journal of Hydrology*, 337(3–4), 356–363.
- Scozzafava, M., & Tallini, M. (2001).** Net infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. *Hydrogeology Journal*, 9(5), 461–475.
- Soft, I. (2015).** *Balance Hídrico* (7.0). <http://isbh.itspanish.org/>. Último acceso: Agosto de 2021.
- Thornthwaite, C., & Matter, J. (1955).** The water balance. In *Publications in Climatology VIII* (1) (p. 104). Drexel Institute of Technology.
- Varni, M. R. (2002).** Determinación de la recarga mediante el método de fluctuación del nivel freático. En: *GH D. Bocanegra et Al.(Eds.) Pp*, 1525–1531.

- Voz, L. (2021, 10 de abril).** *Temporal e inundación en Marcos Juárez: unas 15 familias continúan evacuadas*. 1. <https://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/temporal-e-inundacion-en-marcos-juarez-unas-15-familias-continuan-evacuadas/>
- Vrba, J., & Verhagen, B. T. (2011).** *Groundwater for emergency situations: a framework document*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO.
- Weinzettel, P., & Usunoff, E. (2001).** Calculo de la recarga mediante la ecuacion de DARCY en la zona no saturada. *Las Caras Del Agua Subterranea*, 7.
- Wendland, E., Gomes, L. H., & Troeger, U. (2015).** Recharge contribution to the Guarani aquifer system estimated from the water balance method in a representative watershed. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 87(2), 595–609. **Wheather Spark. (2023).** *Climate and Average Weather Year Round in Marcos Juárez*. <https://weatherspark.com/y/28480/Average-Weather-in-Marcos-Juarez-Argentina-Year-Round>. Último acceso: febrero de 2023.
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Neal, J. C., O'Loughlin, F., Sampson, C. C., Kanae, S., & Bates, P. D. (2017).** MERIT DEM: A new high-accuracy global digital elevation model and its merit to global hydrodynamic modeling. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2017*, H12C-04. http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/
- Zimmermann, E. (2000).** *Aproximación bayesiana para estimacion de ocurrencias de lluvia aplicada a balances hidricos mensuales seriados*. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 6.

Trabajo recibido el 3/09/2023 y aprobado para su publicación el 6/11/2023.

Cómo citar este artículo

Daniela Beatriz Giacobone D.B., Blarasin M., Matteoda E., Schroeter G., Becher Quinodoz F. y Lutri V. y Cabrera A. (2023) Contexto regional y local de recarga de acuíferos en la planicie fluvio-eólica de Marcos Juárez. *Revista Argentina de Hidrogeología*, 2:58-80

AUSPICIARON ESTA EDICIÓN

