

Geofísica e hidrogeología aplicada al estudio de la salinización de agua subterránea en Catinzaco, Chilecito, La Rioja.

Geophysics and hydrogeology applied to the study of groundwater salinization in Catinzaco, Chilecito, La Rioja.

Roberto Esteban Miguel¹

Esteban Tálamo²

Lucía Parache²

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Catamarca-La Rioja, Estación Experimental Agropecuaria Chilecito. Ruta de la producción Km 7,5, Tilimuqui, Chilecito, La Rioja.

²Cátedra de Geología de los Recursos Hídricos, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca. Maximio Victoria 55, San Fernando del Valle de Catamarca.
E mail: miguel.roberto@inta.gob.ar

Miguel, R.E.; Tálamo, E.; Parache, L. (2025). Geofísica e hidrogeología aplicada al estudio de la salinización de agua subterránea en Catinzaco, Chilecito, La Rioja. *Revista Estudios Ambientales*, 13 (2), 40-58.

Recibido: 11/11/2025 - **Aceptado:** 5/12/2025 – **Publicado:** 31/12/2025

RESUMEN

El trabajo analiza el proceso de salinización del acuífero en la localidad de Catinzaco, Chilecito (La Rioja), donde la producción agrícola depende exclusivamente del recurso hídrico subterráneo. En los últimos años se registró un incremento de la salinidad del agua en algunos pozos que generó la preocupación de los productores. Estos fenómenos suelen ser localizados cuando responden a orígenes antrópicos y son frecuentes en acuíferos no confinados de zonas áridas afectados por retornos de riego. Se recurrió al análisis de antecedentes de una finca ubicada al sur del valle Antinaco– Los Colorados, considerando sus tres pozos y otros cinco cercanos. Se incluyeron informes geofísicos realizados en diferentes años (2009 y 2024); datos hidrogeológicos –para construir mapas piezométricos y cálculo de gradientes hidráulicos–; y análisis químicos, para la construcción de diagramas hidroquímicos, relaciones molares y gráficos de evolución. Los resultados evidencian una variación piezométrica promedio

de $-0,85 \text{ m año}^{-1}$, por explotación intensiva, e incrementos de la conductividad eléctrica que superan ampliamente los medidos al inicio de los bombeos. Las relaciones molares $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ vs. Cl^- , muestran una evolución de agua, que podría ser compatible con fuentes vinculadas a aguas residuales y abonos naturales. La realización de los estudios de prospección geoelectrica en un mismo lugar luego de 15 años, advirtió la presencia de una unidad conductiva en zona saturada que no existía en la primera instancia. La respuesta eléctrica da cuenta de agua salinizada en el tramo superior del acuífero, siendo consistente con la salinización de las aguas extraídas de pozos en ese lugar del proyecto. La interpretación conjunta de información geofísica, hidroquímica e hidrodinámica permitió inferir que la salinización responde a una combinación de explotación intensiva y recarga contaminada, en un sistema multicapa con vulnerabilidad moderada-alta, lo que representa un peligro de expansión hacia captaciones actualmente no afectadas.

PALABRAS CLAVE: árido, contaminación, aguas residuales, retornos de riego.

ABSTRACT

This work analyzes the process of aquifer salinization in the locality of Catinzaco, Chilecito (La Rioja province, Argentina), where agricultural production depends exclusively on the groundwater resource. In recent years, an increase in water salinity was recorded in some wells, raising concern among producers. These phenomena typically respond to anthropogenic sources and are frequent in unconfined aquifers in arid zones affected by irrigation return flows. The study analyzes historical data from a farm located in the south of the Antinaco–Los Colorados valley, considering three wells of the farm studied and five nearby wells. Geophysical reports conducted in different years (2009 and 2024) were included, along with hydrogeological data—for constructing piezometric maps and calculating hydraulic gradients—and chemical analyses, for the construction of hydro-chemical diagrams, molar ratios, and evolution graphs. The results evidence an average piezometric variation of $-0.85 \text{ m year}^{-1}$ due to intensive exploitation and an increase in electrical conductivity that significantly exceeds those measured at the start of pumping operations. The molar ratios of $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ vs. Cl^- show a water evolution that could be compatible with sources linked to wastewater and manure. The performance of geoelectric prospecting in the same location after 15 years identified the presence of a conductive unit in the saturated zone that did not exist in the initial instance.

The electrical response accounts for salinized water in the upper section of the aquifer, which is consistent with the salinization of the water extracted from wells in that project area. The integrated interpretation of geophysical, hydrochemical, and hydrodynamic data suggests that salinization results from the combined effects of intensive exploitation and contaminated recharge within a multilayer system with moderate to high vulnerability, posing a risk of expansion into currently unaffected catchments.

KEY WORDS: arid, pollution, wastewater, irrigation returns

INTRODUCCIÓN

Área de estudio, problema de investigación, objetivo e hipótesis

El área de estudio se localiza en el Departamento de Chilecito, La Rioja, más precisamente en inmediaciones de Estación Catinzaco, sobre la Ruta Nacional N°74 (en adelante RN74) a la altura del Km 1.156 en el sector sur cultivado del valle central Antinaco-Los Colorados (Figura 1). En esta zona, la actividad agrícola se sustenta exclusivamente con el uso de agua subterránea, detectándose problemas de salinización del sistema acuífero que han sido reportados inicialmente por Poblete y Guimaraes (2006) y por estudios –con menor o mayor detalle– realizados por Miguel et al. (2016, 2022) y Ruiz de Galarreta et al. (2024). Esta salinización, que *a priori* ocurriría en la parte superior del sistema acuífero, se ha expandido a nuevas áreas y a fincas relativamente modernas (15 años de antigüedad) y ha generado la preocupación de sus propietarios debido a potenciales efectos sobre la fisiología vegetal y la producción. La salinización de los acuíferos suele conllevar a áreas puntuales de gran salinidad, relacionadas con la actividad

antrópica. Este fenómeno se acentúa particularmente con los retornos del agua de riego en acuíferos áridos no confinados sometidos a riego intensivo, donde el uso de la geofísica y métodos hidrogeológicos tradicionales permiten describir con mayor precisión tanto el origen como la evolución de este proceso (Gao et al. 2022 y Khalil et al. 2025). No obstante, en regiones áridas donde coexisten potenciales aportes de riego (cargados con fertilizantes) y disposición de aguas residuales, resulta fundamental el uso de relaciones molares entre iones mayoritarios. Las relaciones molares $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ contrastadas con las concentraciones de Cl^- , constituyen una herramienta eficaz para determinar los procesos de mezcla e indicar fuentes antropogénicas como fugas de aguas residuales, estiércol y fertilizantes (Biddaua et al., 2023 citando a Guo et al., 2020; Nyilitya et al., 2021; Torres-Martínez et al., 2021).

El objetivo de este trabajo fue analizar el proceso de salinización en el área de una finca localizada en Catinzaco, Chilecito, La Rioja a partir de la combinación de técnicas de exploración geofísica y de la hidrogeología tradicional (hidrodinámica e hidroquímica).

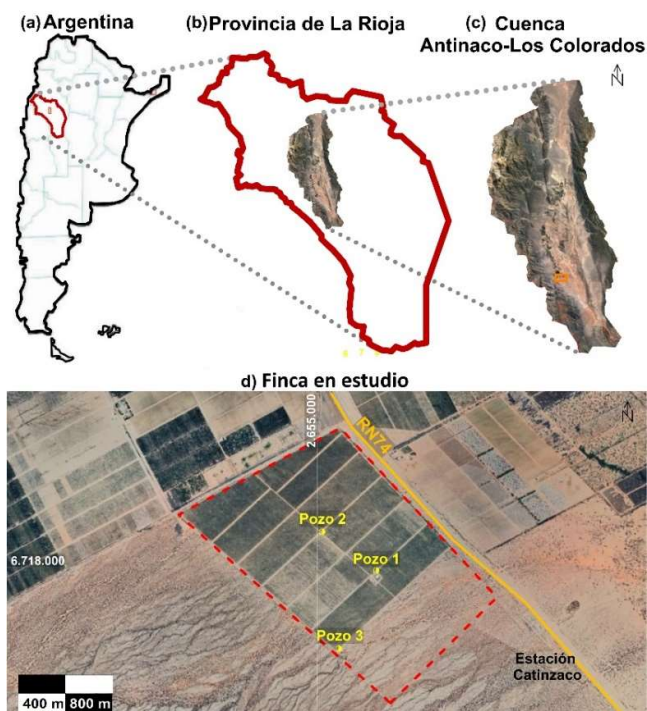


Figura 1. Posición relativa de área de estudio y finca en estudio en Catinzaco, Chilecito, La Rioja. Coordenadas en POSGAR 98 Faja 2.

Descripción del área de estudio

Clima

Los antecedentes describen para el valle central Antinaco-Los Colorados un clima árido, seco, con temperaturas máximas medias en Chilecito de 24,8 °C y mínimas medias de 8,3 °C (1941-1950) con dos épocas claramente diferenciadas, la estival lluviosa y la invernal seca (Victoria, 1962). La temperatura media anual es de 17,4 °C (Sosic, 1971). La precipitación en el valle es variable con un gradiente oeste-este, hacia las cumbres de las Sierras de Famatina las precipitaciones medias superan los 500 mm año⁻¹ (Salvioli, 1980), en el centro del valle rondan los 100 mm (Bianchi y Cravero, 2010) y hacia las Sierras del Velazco la información es escasa, aunque de acuerdo con mapas de Rocca et al. (1975) serían inferiores a 50 mm año⁻¹. El promedio anual de precipitaciones para Chilecito entre los

años 1902 y 1967 fue de 176 mm (Costa y Minetti, 2001) mientras que para los años 1989-2024 fue de 149 mm. En ambos períodos se observan variaciones interanuales con ciclos de mayores y menores precipitaciones. La evapotranspiración potencial varía entre 977 y 1.140 mm, lo que determina un déficit hídrico a lo largo de todo el año, con un balance hídrico marcadamente negativo.

Geología y geomorfología

El área de estudio se localiza en la Región Hidrogeológica de Sierras Pampeanas y sus Valles (Auge et al., 2006), específicamente en el valle central Antinaco-Los Colorados. El valle limita al oeste por las Sierras de Famatina, este por Sierras de Velasco, norte con una línea imaginaria desde localidad de Pituit hacia las Sierras de Velasco y sur a la altura de la formación Los Colorados,

donde se infiere que una falla de contención cierra subterráneamente la cuenca, permitiendo el almacenamiento de un importante volumen de agua.

La geomorfología del área estudio, se caracteriza por la presencia de abanicos coalescentes de dos importantes quebradas –y otras menores– desarrolladas en el límite de las Sierras de Sañogasta y Catinzaco denominadas “de Adentro o Catinzaco” y “del Totoral”. En estas quebradas fluyen cursos de agua permanentes que infiltran y percolan en su totalidad en el área apical del abanico aluvial, con excepción de los importantes flujos de crecidas generados ante precipitaciones intensas de verano, que arrastran un significativo volumen de material mediante escorrentía superficial. Este abanico aluvial corresponde –como la totalidad de los abanicos aluviales de estas sierras– a materiales cuaternarios modernos, con sedimentos de granulometría gruesa, gradando desde grandes bloques, rodados, gravas y arenas en el área apical, hasta materiales más finos hacia el área distal en inmediaciones de la RN74.

Hidrogeología

El sistema acuífero multicapa explotado del valle Central Antinaco–Los Colorados está constituido por materiales del cuaternario donde las principales recargas provienen de los ríos y quebradas de las Sierras de Famatina y Velasco, además de una compleja red de diaclasas (Sosic, 1971). Al norte de la zona de estudio, García (2011) indica la presencia de al menos tres paquetes sedimentarios en inmediaciones de la RN74. Un paquete superior de grava mediana a gruesa e incluso con grandes rodados, que conforman la zona no saturada hasta una profundidad aproximada de 50 metros; luego un paquete intermedio de arenas medianas a gruesas saturadas, con intercalaciones menores de limos arcillosos y de arenas finas hasta una profundidad aproximada de 150 metros y

por último, un nivel inferior con predominio de limos arcillosos y arenas finas con intercalaciones menores de arenas medianas, saturadas, hasta una profundidad aproximada de 250 metros (García, 2011).

La descarga natural del sistema se observa hacia el sur y este de la cuenca, en los bajos de Santa Elena y Carpintería, con una importante incidencia de especies freatófitas (Morello 1955 citado por Sosic 1971). La descarga artificial está dada por una densa red de pozos utilizados principalmente para riego (Miguel et al. 2016). Los caudales de explotación en el área de Catinzaco rondan los 150-220 m³ h⁻¹, con caudales específicos entre 10 y 61 m³ h m⁻¹. En cuanto a los parámetros que rigen el movimiento del agua subterránea, se estima una transmisividad que varía entre 1.000 y 2.000 m² día⁻¹, una permeabilidad entre 20 a 40 m día⁻¹ y un coeficiente de almacenamiento entre 0,1 y 0,2 (García, 2011). Las aguas explotadas presentan valores de conductividad eléctrica, como indicador indirecto de salinidad, entre 600 y 800 µS cm⁻¹, siendo mayormente de características sulfatadas cálcicas y cálcico sódicas.

Considerando siete muestras tomadas en 1975 (Rocca et al. 1975) en el área de Catinzaco, las concentraciones de fondo natural de Cl⁻ y NO₃⁻ se calcularon en 50 y 3,4 mg L⁻¹, respectivamente. Sin embargo, se ha registrado desde el año 2006 un proceso de salinización (Poblete y Guimarães, 2006) y de explotación intensiva (Miguel et al. 2022; Ruiz de Galarreta et al. 2024) cuya situación compromete la sustentabilidad del sistema. La tasa de variación de la piezometría en el área de Catinzaco se estima en 0,75 m año⁻¹ (Miguel et al. 2022) lo que indica una pérdida de reservas de agua subterránea y un costo de explotación incremental al variar el nivel piezométrico -12 m en 16 años.

METODOLOGÍA

Se realizó un análisis comparativo de resultados de estudios de prospección geoelectrica realizados en la finca en los años 2009 y 2024, empleando el método del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) con un dispositivo electródico tetrapolar simétrico de Schlumberger. En ambos casos el objetivo fue el de localizar posiciones con potencial hidrogeológico para la construcción de nuevos pozos de captación de agua. Entre ambos estudios, realizados con 15 años de diferencia, se pudo advertir en un mismo punto de la finca la obtención de curvas de resistividad aparente diferentes.

Adicionalmente, en julio de 2025 (período de no bombeo) se efectuaron mediciones de niveles estáticos en los tres pozos que la finca posee funcionales y otros cinco pozos de apoyo, los cuales fueron detenidos previamente con al menos 12 horas de anticipación en pos de tender a su recuperación. Luego de medir el nivel estático, los pozos fueron encendidos durante 30 minutos (hasta presurizar) para la extracción de muestras de agua subterránea, garantizando el vaciamiento de al menos tres veces el volumen de agua contenido en el pozo. Se realizó la determinación en campo de los parámetros de pH, temperatura y conductividad eléctrica de las muestras de agua subterránea obtenidas. También se extrajeron en los tres pozos de la finca muestras durante el bombeo, en envases estériles y rotulados, que fueron enviadas a laboratorio para la determinación de iones mayoritarios y su posterior interpretación en gabinete a partir de diagramas de Piper (clasificación iónica del agua) y Wilcox (calidad de agua para riego).

Se recopilaron antecedentes de la hidroquímica de los pozos de la finca y se tomaron valores de fondo natural de Cl^- y NO_3^- (indicadores de contaminación

antrópica), basados en siete muestras de agua tomadas en el área en el año 1975, en los inicios de la explotación del sistema en Catanzaco.

Los datos hidrogeológicos se procesaron en gabinete y a partir de ellos se elaboraron tablas y mapas de isopropundidad, isopiezas e isoconductividad eléctrica a través del software libre QGis.

A fin de comprender el origen del proceso de salinización se confeccionaron gráficos con las relaciones molares $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ versus concentración de Cl^- , como indicador de fuentes antropogénicas de contaminación, tales como fugas de aguas residuales, estiércol y fertilizantes. En adición, se confeccionaron gráficos de variación de la calidad química y de niveles a boca de pozos en función de datos antecedentes con los que cuenta la empresa a partir de la red de monitoreo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria en la Cuenca Antinaco-Los Colorados.

La interpretación integrada de la hidrodinámica, hidroquímica y geofísica junto con la identificación de potenciales cargas contaminantes permiten aproximarnos al origen y evolución del proceso de salinización, así como proponer estrategias de explotación que eviten que pozos actualmente no salinizados sean alcanzados por este proceso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Geofísica

La interpretación geofísica efectuada para un mismo sitio arrojó, como principal diferencia, que en el año 2009 (SEV 2) se interpretaron tres unidades geoelectricas, mientras que en el año 2024 (SEV 2) se interpretó una nueva unidad, producto de obtenerse una curva de resistividad aparente diferente (Figuras 2 y 3).

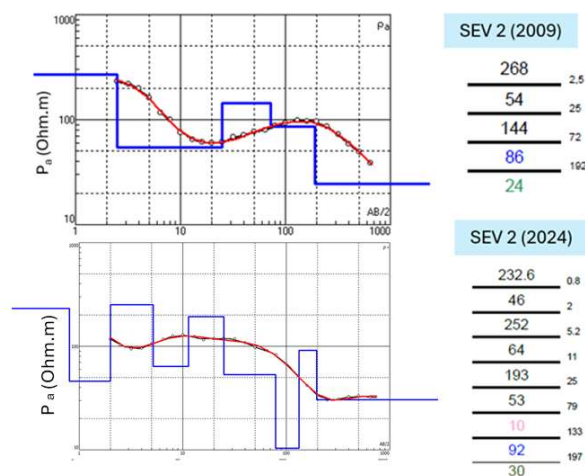


Figura 2. Curvas de resistividad aparente y corte geoelectrico de interpretaci3n para los SEV 2 realizados en la ubicaci3n del Pozo 2 (SEV 2). CONHIDRO 2009 y 2024.

Se deja constancia que la posici3n del SEV 2 del estudio del a1o 2009, fue la elegida para la posterior perforaci3n del Pozo 2 de la finca. En el estudio del 2024, se realiz3 el SEV 2 (param3trico) conociendo el proceso de salinizaci3n del agua del citado pozo (Figura 3). La existencia de una nueva unidad conductiva indicaría la presencia de agua de mayor salinidad en el tramo superior del acuífero. Esta respuesta eléctrica sería consistente con el incremento de sales disueltas observados en los pozos 1 y 2 de la finca y que se describen detalladamente en el apartado *Hidroquímica*.

Hidrodinámica

En la Figura 4 se representa la profundidad del agua subterránea, donde en el área de la finca varía entre ≈90 y ≈70 metros bajo boca de pozo (en adelante m b.b.p.). Esta variaci3n de la profundidad del agua subterránea se vincula con la

topografía y la pendiente en los abanicos aluviales, lo cual tiene una gran relevancia ya que la zona no saturada condiciona el tiempo de tránsito vertical de potenciales retornos de riego y aguas residuales agroindustriales. Vuksinic et al. (2018 y 2023) advierte sobre la presencia en el área de industrias de aceite de oliva y aceitunas de mesa con disposici3n de sus aguas residuales en lagunas de evaporaci3n –con precaria impermeabilizaci3n– y una vulnerabilidad del acuífero a la contaminaci3n moderada, lo que conlleva a un peligro elevado de contaminaci3n estimada por la metodologí GOD (Foster e Hirata, 2002). Cabe destacar que este tipo de aguas residuales se caracterizan –además de la presencia de nitr3geno y sus compuestos de transformaci3n– por una alta carga contaminante de elementos de una baja biodegradabilidad, destacándose el Cl⁻ y el Na⁺

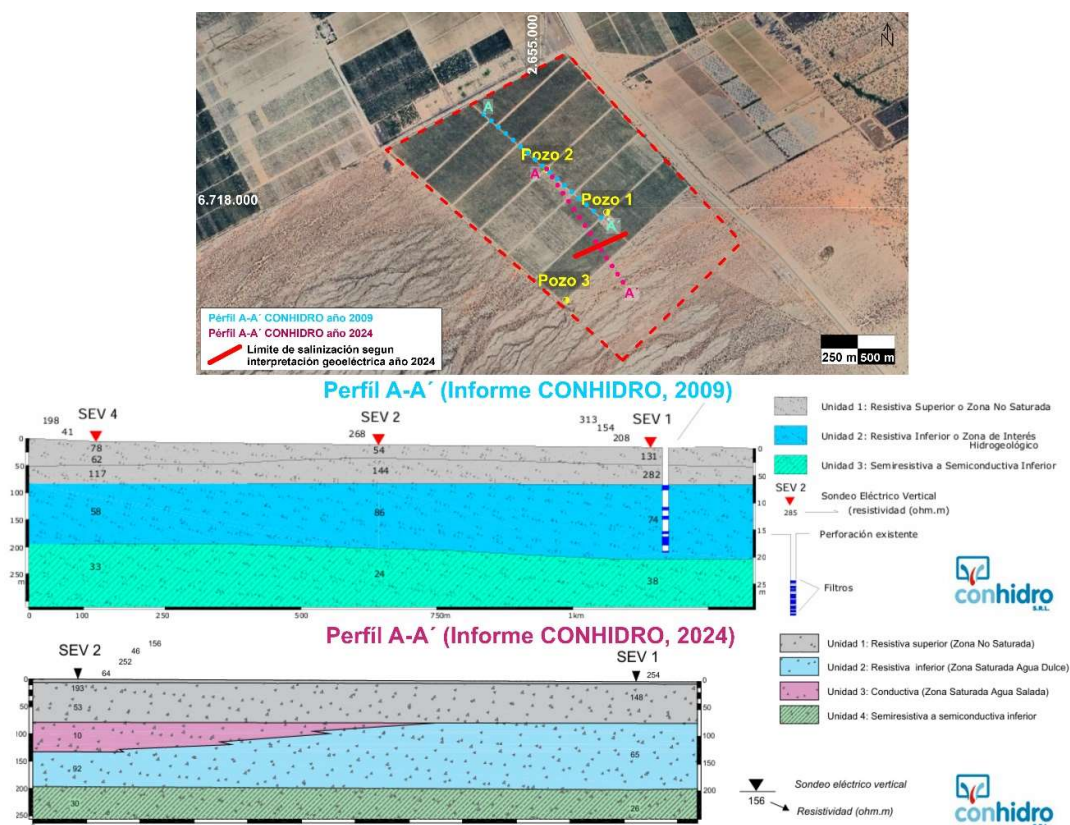


Figura 3. Interpretaciones geofísicas en el área de la finca. Tomado y adaptado de CONHIDRO 2009 y 2024. Coordenadas en POSGAR 98 Faja 2.

En la Figura 5 se representa la hidrodinámica del área de estudio a través de un mapa de isopiezas. Éstas varían entre 718 y 708 m.s.n.m., mientras que en el área de la finca se encuentran entre ≈ 713 m.s.n.m. al norte y ≈ 708 m.s.n.m al sur. Las líneas de flujo evidencian una dirección norte-sur convergiendo hacia el área de la finca con dirección noroeste-sudeste. No se observan aportes desde el oeste, como sería presumible, en función de los datos antecedentes (Rocca et al, 1975; Poblete y Guimaraes, 2006). Es relevante destacar que aguas arriba de la

finca existen lagunas de disposición de aguas residuales agroindustriales y una importante superficie de riego, principalmente olivícola. Por otro lado, hacia el norte del área estudiada, se observan gradientes hidráulicos de 0,001, que se incrementan hacia el área de la finca a 0,004. Esto evidencia un cambio en la pendiente de la superficie piezométrica, que podría deberse a la explotación intensiva de agua subterránea en el área, no solo por el bombeo de esta finca, sino al conjunto de pozos en la zona

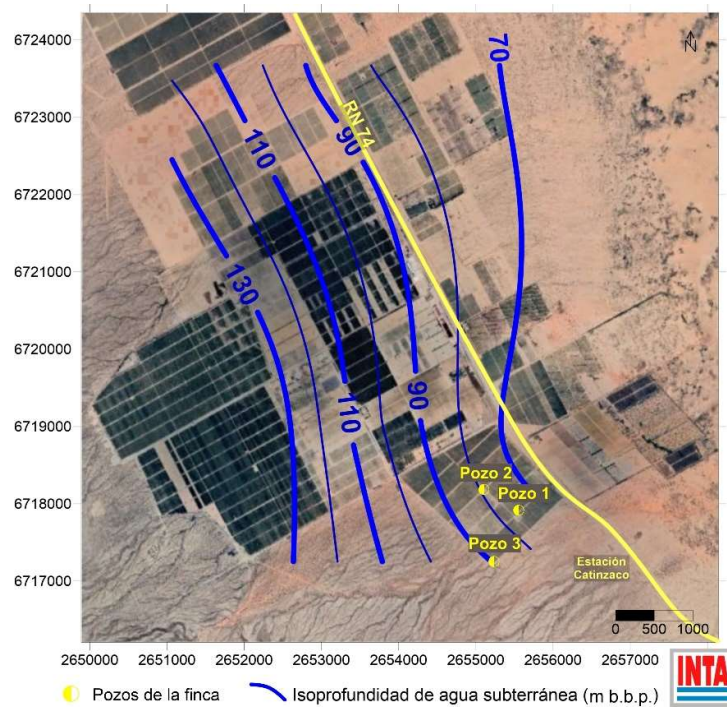


Figura 4. Isopropundidad de agua subterránea en área de la finca (julio 2025). Coordenadas en POSGAR 98 Faja 2.

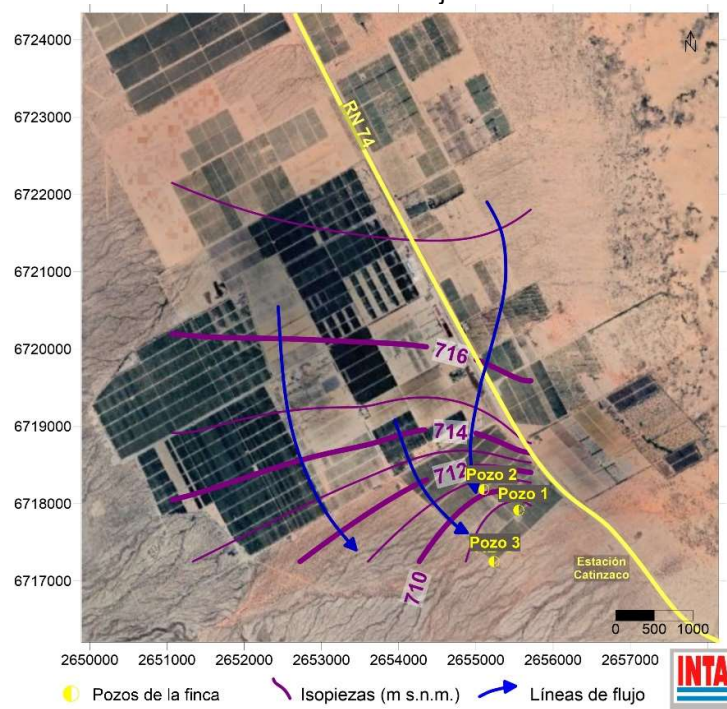


Figura 5. Isopiezas y líneas de flujo en área de la finca (julio 2025). Coordenadas en POSGAR 98 Faja 2.

Hidroquímica

Para una adecuada interpretación hidroquímica, debe considerarse que las aguas subterráneas explotadas, corresponden a una mezcla captada de diferentes profundidades de un sistema acuífero multicapa. La conductividad eléctrica, es un indicador indirecto de las sales disueltas en el agua y si bien no discrimina sobre cuáles especies son, nos orienta acerca de su salinidad y de su variación espacial en caso de contar con datos de una red de pozos. Lo expuesto anteriormente puede indicar que los valores de conductividad eléctrica medidos actualmente, estarían subestimando la salinidad del tramo superior del acuífero impactado. En la Figura 6, se presenta un mapa de isolíneas de conductividades eléctricas para el área de Catinzaco, con variaciones entre ≈ 650 y $\approx 800 \mu\text{S cm}^{-1}$. Estos valores de salinidad son similares a los trabajos antecedentes en el sector. Sin embargo, los pozos 1 y 2 de la finca erogaron en julio de 2025 conductividades eléctricas muy superiores (3.420 y $4.840 \mu\text{S cm}^{-1}$; respectivamente). Este incremento localizado, es un claro indicio del proceso de salinización que involucra los niveles más someros del acuífero, producto de la percolación de agentes contaminantes derivados principalmente de la actividad agrícola y agroindustrial (excesos de riego y aguas residuales), que infiltran y percolan a través en la zona no saturada, alcanzando el acuífero. Respecto a los retornos de riego, éstos corresponden a excedentes hídricos aplicados en el suelo que no han sido captados por las raíces de las plantas y que se incrementan cuanto más deficientes son las prácticas de manejo de agua en campo. Deben considerarse también los lavados de

suelos que se realizan para movilizar las sales residuales por debajo del sector radicular, logrando que no sean alcanzadas por los procesos de evapotranspiración y convirtiéndose así en una potencial recarga futura. Para las aguas residuales, su llegada al agua subterránea se genera en el área de estudio por su descarga directa en suelo o su acumulación en lagunas de evaporación de dudosa impermeabilidad. Ambos procesos que podrían haber incrementado la salinidad en el acuífero deberían considerarse relativamente recientes, ya que en la geofísica realizada en el año 2009 no se advirtió, pero sí pudo determinarse en el estudio de prospección geoelectrica del 2024, tanto con la detección de una unidad conductiva (10 Ohm.m) desde el techo hasta la zona media del espesor saturado, como con la disminución de la resistividad en la unidad superior determinada como zona no saturada (Figuras 2 y 3). El límite de presencia de agua salinizada se encuentra de acuerdo con CONHIDRO (2024) a unos mil metros al nornordeste del pozo 3, actualmente no salinizado. La piezometría (Figura 5) y el radio de influencia del cono de descenso generado por la explotación del pozo 3 –calculado a partir de la fórmula de Jacob– (Figura 6), indican la posibilidad de peligro de salinización de la captación, situación que posiblemente no se haya manifestado aún por el bombeo intensivo de los pozos 1 y 2. En función de los antecedentes de permeabilidad y el gradiente hidráulico en el área de la finca, se estima una velocidad del flujo horizontal de agua subterránea entre 8 y 16 cm día^{-1} siendo este rango de “avance” de la pluma de agua salinizada sin la aceleración del flujo inducida por el bombeo.

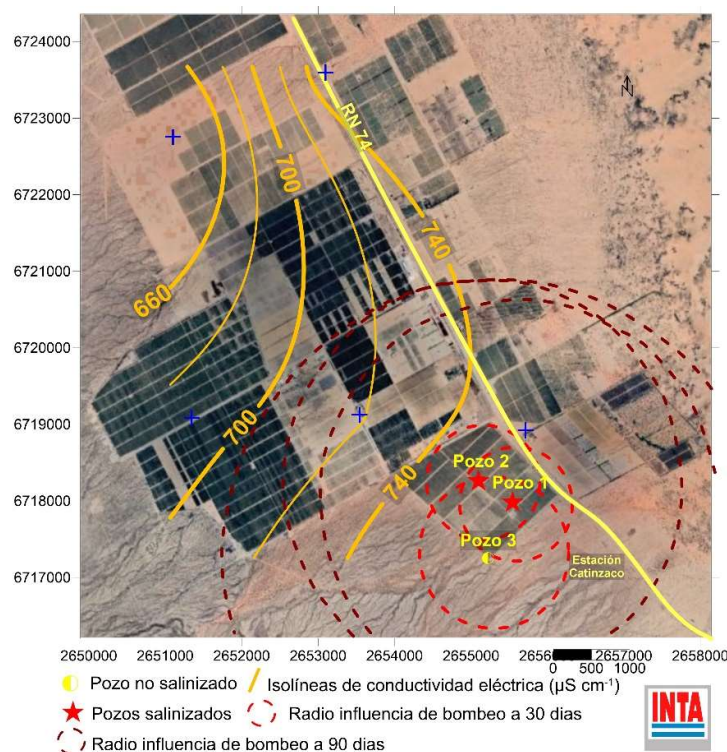


Figura 6. Isoconductividad eléctrica en agua subterránea y radios de influencia teóricos por bombeo de cada pozo a 30 y 90 días (julio 2025). Coordenadas en POSGAR 98 Faja 2.

En la Figura 7 se presenta el Diagrama de Piper donde se clasifican las aguas explotadas por los pozos de la finca, las cuales presentan una marcada evolución (flecha azul en gráfico) si consideramos que los pozos 1 y 2 erogaban inicialmente aguas de características similares a las que explota actualmente el pozo 3, de tipo Sulfatada Sódica y salinidad media alta ($800 \mu\text{S cm}^{-1}$). Sin embargo, los pozos 1 y 2 explotan actualmente agua de tipo sulfatada sódico-cálcica y sulfatada-clorurada sódico-cálcica de muy alta salinidad. Como particularidad, se advierte un importante aumento de las concentraciones del anión NO_3^- (indicador

de contaminación antrópica), mientras que el Pozo 3 eroga un agua con una concentración de $6,9 \text{ mg L}^{-1}$ (cuando valor de fondo natural es $3,4 \text{ mg L}^{-1}$) los pozos 1 y 2 presentan concentraciones de $63,8$ y 117 mg L^{-1} , valores muy elevados que representan 19 y 34 veces el valor de fondo y que además superan el límite de 45 mg L^{-1} de NO_3^- en agua para consumo humano (C.A.A., 2012). Algo similar ocurre con el ion Cl^- , con valores de fondo de 50 mg L^{-1} y que actualmente presentan en los pozos 1 y 2 concentraciones de 1.194 y 871 mg L^{-1} , respectivamente, mientras que en el pozo 3 es de $81,5 \text{ mg L}^{-1}$ con un límite potabilidad 300 mg L^{-1} .

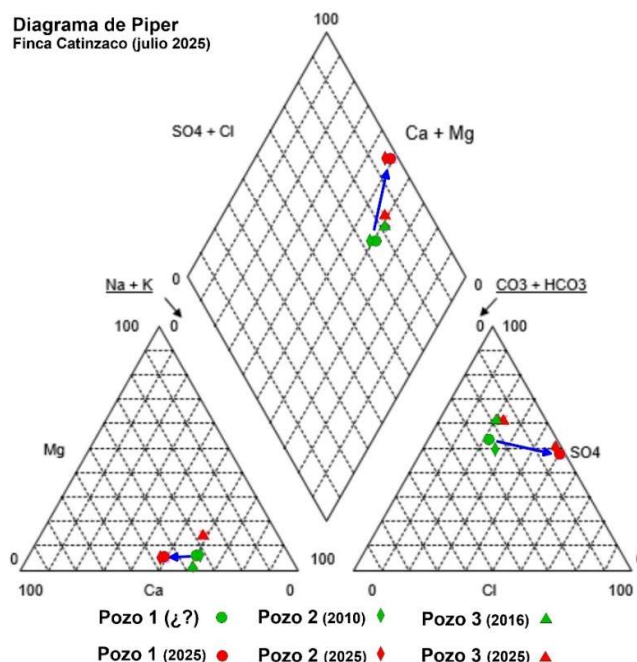


Figura 7. Diagrama de Piper de las muestras de agua extraídas de los pozos de la finca.

Los cambios mencionados en la composición química del agua también influyen en la calidad de su uso para riego. En la Figura 8 se observa que la muestra del pozo 3 se clasifica como C3-S1 (peligro de salinidad alto y bajo peligro de alcalinización), mientras que la clasificación para el pozo 1 es C4-S2 (peligro de salinidad muy alto y peligro moderado de alcalinización) y para el pozo

2 es C4-S3 (peligro de salinidad muy alto y peligro de alto de sodificación). Se evidencia que el agua del pozo 3 es buena a regular para riego, mientras que las otras podrían considerarse malas, especialmente para cultivos sensibles a la salinidad. Cabe destacar que las muestras originales de los pozos 1 y 2 eran aptas para riego, con peligro de salinidad moderado y de alcalinización bajo

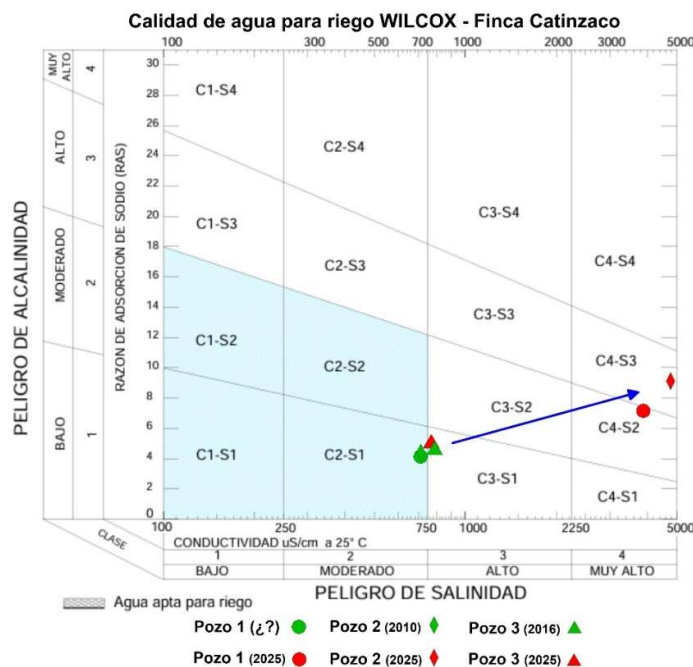


Figura 8. Diagrama de Wilcox (calidad para riego) en aguas explotadas por la finca.

La variación de las relaciones molares $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ contrastada con las concentraciones de Cl^- , permite indicar fuentes antropogénicas como fugas de aguas residuales, estiércol y fertilizantes. Las aguas residuales y el estiércol generalmente se caracterizan por relaciones $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^- < 1$, en comparación con los fertilizantes, que generalmente presentan relaciones $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^- > 10$ (Torres-Martínez et al., 2021). En la Figura 9 se presenta el gráfico de relaciones molares para las captaciones de la finca estudiada

junto con la muestra de un pozo cercano que presenta valores de conductividad eléctrica similar a los relevados al inicio de la explotación ($600 \mu\text{S cm}^{-1}$). Se observa que el pozo 3 y las muestras iniciales de los pozos 1 y 2 presentan una relación molar $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ con las concentraciones de Cl^- similar a los valores de fondo natural. Sin embargo, las muestras para el año 2025 de los pozos 1 y 2, presentan un marcado corrimiento que indicarían un aporte de NO_3^- proveniente de aguas residuales o abonos naturales.

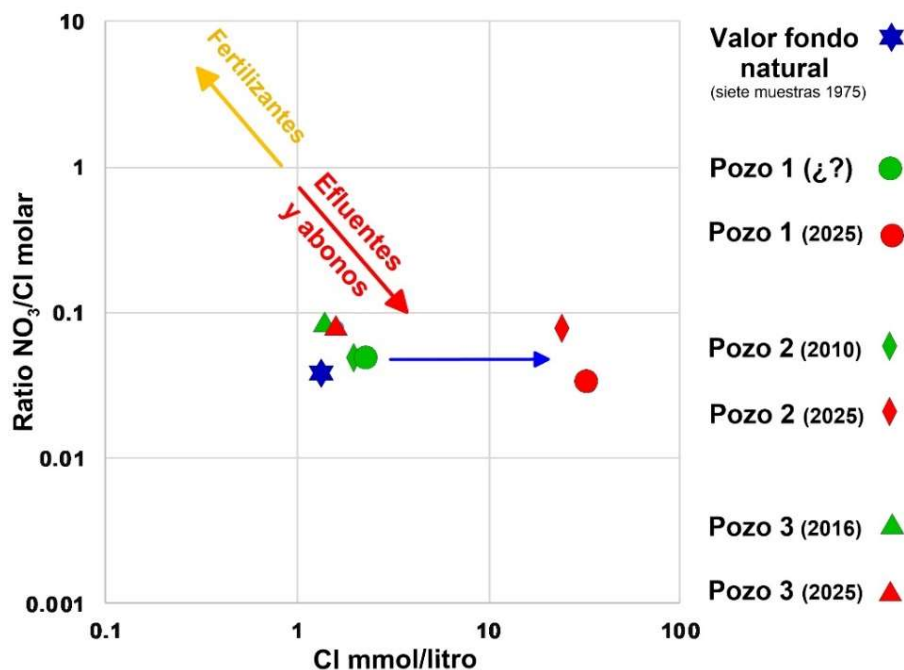


Figura 9. Relaciones molares $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ versus concentración de Cl^- en muestras de pozos de la Finca.

En la Figura 10 se presentan los datos históricos y actuales de niveles de agua subterránea medidos a boca de pozo y su conductividad eléctrica. Se observa que el pozo 1 presentó una variación de la piezometría de -26,22 m en 27,5 años (tasa de $-0,95 \text{ m año}^{-1}$) y un incremento marcado de la conductividad eléctrica de $2.570 \mu\text{S cm}^{-1}$ del valor original de $850 \mu\text{S cm}^{-1}$ del año 2009. Para el caso del pozo 2, se registró una variación en la piezometría de -12,7 m en 15,5 años (tasa de $-0,82 \text{ m año}^{-1}$) y un incremento de la conductividad eléctrica –observado desde enero de 2019– de $4.020 \mu\text{S cm}^{-1}$ con un

valor original de $675 \mu\text{S cm}^{-1}$. En el pozo 3, la variación de la piezometría fue de -6,18 m en ocho (8,5) años (tasa de $-0,73 \text{ m año}^{-1}$) mientras que conductividad eléctrica, al contrario que los pozos 1 y 2, disminuyó en $80 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Puede observarse además que, si bien la conductividad eléctrica se incrementó fuertemente en los pozos 1 y 2 desde su construcción a la fecha, los valores decrecieron acentuadamente entre julio de 2024 a enero de 2025 para luego incrementarse nuevamente en julio de 2025.

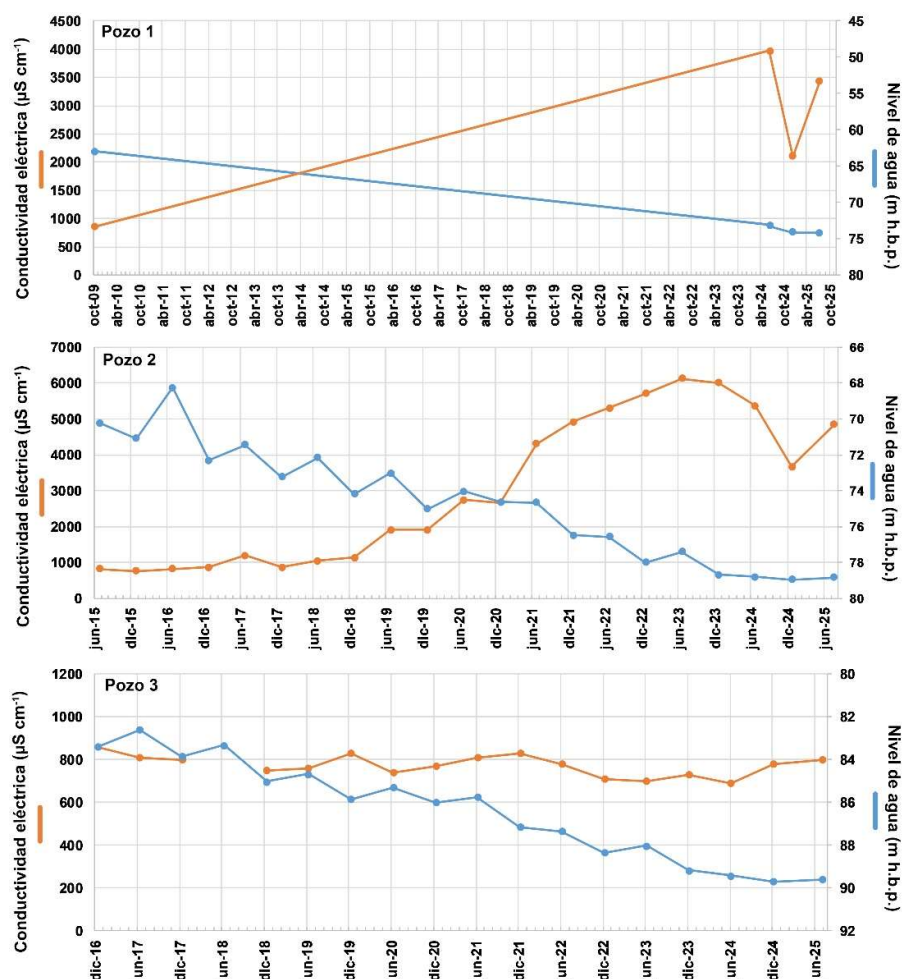


Figura 10. Cambios en los niveles de agua subterránea (m b.b.p.) y salinidad ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en pozos de la finca bajo estudio.

CONCLUSIONES

La integración de información geofísica, hidrodinámica e hidroquímica permitió confirmar y analizar un proceso activo y localizado de salinización en el sur del valle Antinaco-Los Colorados. La comparación entre los sondeos eléctricos verticales realizados en 2009 y 2024 evidencia una disminución de resistividad en la zona no saturada y la aparición de una unidad conductiva en el espesor saturado ($\approx 10 \text{ Ohm.m}$), coherente con la

infiltración de cargas contaminantes hacia los niveles más someros del acuífero.

Desde el punto de vista hidrodinámico, los descensos piezométricos observados reflejan un comportamiento sostenido de abatimiento, con tasas promedio de $-0,85 \text{ m año}^{-1}$, lo que refleja una situación de explotación intensiva. En la superficie piezométrica se observa una convergencia de flujos hacia las áreas de mayor explotación, favoreciendo la migración del proceso de salinización.

La evolución hidroquímica es concluyente: los pozos 1 y 2 presentan incrementos

marcados en la conductividad eléctrica (3.420 y $4.840 \mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente) y en las concentraciones de Cl^- y NO_3^- respecto de los valores de fondo natural ($\text{Cl}^- \approx 50 \text{ mg L}^{-1}$; $\text{NO}_3^- \approx 3,4 \text{ mg L}^{-1}$). Las concentraciones actuales ($\text{Cl}^- 1.194$ y 871 mg L^{-1} ; $\text{NO}_3^- 63,8$ y 117 mg L^{-1}) se traducen en una pérdida significativa de calidad de agua para riego según la clasificación de Wilcox (C4-S2 / C4-S3) y superan ampliamente los límites de potabilidad establecidos por el C.A.A (Código Alimentario Argentino)

Por otra parte, el análisis de las relaciones molares $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ contrastadas con las concentraciones de Cl^- confirma la presencia de aportes antrópicos vinculados a aguas residuales y abonos orgánicos. Este resultado, junto con la evidencia geofísica y la existencia de parcelas irrigadas dedicadas al cultivo de olivo, su procesamiento industrial y disposición de aguas residuales en lagunas sin impermeabilización adecuada, sugieren la contribución de recargas contaminadas al proceso de salinización aguas arriba del área de estudio.

El pozo 3, si bien mantiene valores cercanos al fondo natural ($\text{Cl}^- \approx 81,5 \text{ mg L}^{-1}$; $\text{NO}_3^- \approx 6,9 \text{ mg L}^{-1}$), se encuentra dentro del radio de influencia de los pozos más explotados y del cono de depresión

generado por el bombeo. Considerando los gradientes y la permeabilidad del medio, se estima una velocidad de avance de la pluma salinizada del orden de $8-16 \text{ cm día}^{-1}$, lo que representa un riesgo potencial de afectación a mediano plazo.

La situación detectada en Catinzaco constituye un caso representativo de los acuíferos someros de valles áridos sometidos a riego intensivo, donde la conjunción de la explotación intensiva y fuentes de recarga antropogénica degradan rápidamente la calidad del recurso. La prevención mediante monitoreo continuo, manejo racional del agua y gestión adecuada de efluentes se plantea como condición esencial para garantizar la sostenibilidad del acuífero y de los proyectos productivos que dependen de su uso.

AGRADECIMIENTOS

Este documento se realizó bajo el financiamiento del Proyecto Macro Regional 2023-PE-L03-I054: Aporte al estudio y gestión del recurso hídrico en áreas rurales y periurbanas del Noroeste Argentino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y el Convenio de Colaboración Técnica N° 30.671 entre INTA y Rio Bermejo S.A.

BIBLIOGRAFÍA

Auge, M.; Wetten, C.; Baudino, G.; Bonorino, G.; Gianni, R.; Gonzalez, N.; Grizinik, M.; Hernandez, M.; Rodriguez, J.; Sisul, A.; Tineo, A.; Torres, C. (2006). Hidrogeología de Argentina. *Boletín Geológico y Minero*. 117 (1) 7-23 pp.

Bianchi, A.R y Cravero, S.A.C. (2010). Atlas Climático Digital de la República Argentina. Ediciones INTA. Recuperado del 5 de noviembre de 2025 de URL. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/inta-atlas_climatico_digital_argentina-2010.pdf

Biddaua, R., Dorea, E.; Da Peloa, S.; Lorraib, M.; Bottib, P.; Testac, M y Cidua, R. (2023) Geochemistry, stable isotopes and statistic tools to estimate threshold and source of nitrate in groundwater (Sardinia, Italy). *Water Research*. Volume 232, 1 April 2023, 119663. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119663>

Código Alimentario Argentino (2023). Capítulo XII: Bebidas hídricas, agua y agua gasificada. Agua potable. Resolución Conjunta SCS y SAGyP N° 33/2023). Recuperado del 5 de noviembre de 2025 de URL. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/capitulo_xii_aguas_actualiz_2024-04.pdf

CONHIDRO (2009). Test geoelectrico Finca Río Bermejo, Catinzaco, Departamento, Chilecito Provincia de La Rioja. Informe técnico Consultora Hidrogeológica CONHIDRO. Noviembre 2009. 16 pp.

CONHIDRO (2024) Prospección geoelectrica Finca Río Bermejo, Catinzaco, Departamento de Chilecito, La Rioja. Informe técnico Consultora Hidrogeológica CONHIDRO. Junio 2024. 11 pp.

Costa, M. y Minetti, J.L. (2001). El agua: una limitante de la agricultura en La Rioja. Avances de la producción vegetal del NOA (1998 – 2001). 146-152 pp.

Equipo de desarrollo de QGIS (2025). Sistema de información geográfica de QGIS. Proyecto de la Fundación Geoespacial de código abierto. Recuperado del 5 de noviembre de 2025 de URL <http://qgis.osgeo.org>

Foster, S. & Hirata R.C.A. (2002). Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. Lima: CEPIS/PAHO/WHO. Recuperado del 5 de noviembre de 2025 de URL <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-146657>

García, J.W. (2011). Captación de aguas subterráneas para riego de olivares en la zona de Catinzaco, Chilecito, La Rioja, Argentina, VII Congreso Argentino de Hidrogeología. Captación y Modelación de Agua Subterránea Salta, Argentina ISBN: 978-987-23936-8-7. 181-186 pp.

Gao, Y.; Chen, J; Qian, H; Wang, H; Ren, W. y Qu, W. (2022) Hydrogeochemical characteristics and processes of groundwater in an over 2260 year irrigation district: A comparison between irrigated and nonirrigated áreas. *Journal of Hydrology* Volume 606, March 2022, 127437 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127437>

Guo, Z., Yan, C., Wang, Z., Xu, F., Yang, F., (2020). Quantitative identification of nitrate sources in a coastal peri-urban watershed using hydrogeochemical indicators and dual isotopes together with the statistical approaches. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125364>

Khalil, M.M; Farag, H., Tokugana, T.; Pichler, T, Ismail, E y Abotalib, A.Z. (2025). Origin and processes of groundwater salinity hotspots in the irrigated Sahara Desert lands of Egypt. *Groundwater for Sustainable Development* Volume 31, November 2025, 101520 <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101520>

Miguel, R.E.; Tálamo, E.; Cristos, D.S.; Gonzalez Ribot, J.V.; Chayle, L. (2016). Análisis y evolución del proceso de salinización del sistema acuífero Antinaco Los Colorados en las Colonias de Vichigasta y Catinzaco, La Rioja, Argentina. En Calidad de Agua Subterránea - IX Congreso Hidrogeológico Argentino. VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. Catamarca. Argentina. 1º Edición. Catamarca: Editorial Científica Universitaria – Secretaría de Ciencia y Tecnología –Universidad Nacional de Catamarca. 304-311 pp.

Miguel, R.E., Gonzalez Ribot, J.V. y Canelo, H.N. (2022) Evolución hidrogeológica del Valle Central Antinaco-Los Colorados. Parte 4: Vichigasta y Catinzaco. Congreso Argentino de Hidrogeología. Universidad Nacional de Sur y Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Argentino. 25 al 28 de octubre de 2022. Bahía Blanca, Buenos

Aires, Argentina. Actas del Congreso. Auge, M y Abouy, R. (Coord) Editorial Universidad Nacional del Sur EdiUNS. ISBN 978-987-655-310-0. 273-281 pp.

Nyalitya, B., Mureithi, S., Bauters, M., Boeckx, P., (2021). Nitrate source apportionment in the complex Nyando tropical river basin in Kenya. *J. Hydrol. (Amst.)*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125926>

Morello, J. (1955). Estudios botánicos en las regiones áridas en la Argentina, II: Transpiración de los arbustos resinosos de follaje permanente del Monte. *Rev. Noroeste Arg.* 1 (3) 385-524 pp.

Poblete, M.A.; Guimaraes R.E. (2006). Evaluación hidrogeológica de los acuíferos explotados en la cuenca Antinaco-Los Colorados. San Juan. INA-CRAS Centro Regional de Aguas Subterráneas. 28 pp.

Rocca, J.A.; Ortiz, A.; Zambrano, J.; Taballione, C.; Torres, E.; Robles, J.O.; Victoria, J.A.; Pellegrino, J.; Salvioli, G.; Bosch, E.; Martinis, N.; Coria, E.; Lohn, P.; García Perón, E.; Ferres, C.; Álvarez, A.; Frontera, H.; Aberastain, S.; Toro, M.A. y Nally, J. (1975). "Investigación del agua subterránea en el Valle Antinaco-Los Colorados, Provincia de La Rioja". Publicación N° P-067. INA CRAS. Secretaría de Estado de Recursos Naturales y Ambiente Humano, Subsecretaría de Recursos Hídricos. 350 pp.

Ruiz de Galarreta, M., Rodrigues Capitulo, L. y Miguel, R.E. (2024). Implicancias del riego en las reservas de agua dulce en las colonias agrícolas de Catinzaco, Chilecito, La Rioja. XVI Congreso Latinoamericano y XII Congreso Argentino de Hidrogeología. Santa Rosa, La Pampa, Argentina. 17 al 20 de septiembre de 2024. Tomo I Hidrogeología Regional. Editores: Auge, M; Albouy, R. y Falcón, C. 193-200 pp. Recuperado del 5 de noviembre de 2025 de URL <https://drive.google.com/file/d/1ULimY98YEO4XCccxh5oeYsr5LF4D-Q-u/view>

Salvioli, G. (1980). Información Pluviométrica Área Antinaco-Los Colorados, Provincia de La Rioja. Documento N° 18. Centro Regional de Aguas Subterráneas, Área Hidrología, diciembre de 1980. 22 pp.

Sosic, M. (1971). Descripción hidrogeológica del Valle de Antinaco-Los Colorados, prov. de La Rioja. Buenos Aires. Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín 123. 51 pp.

Torres-Martínez, J.A., Mora, A., Mahlknecht, J., Daessle, L.W., Cervantes-Aviles, P.A., Ledesma-Ruiz, R., (2021). Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model. *Environ. Pollut.* 269 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115445>

Victoria, J. (1962). Capítulo 4: Provincia geológica de los bolsones de los llanos occidentales" Editor: Victoria, J. "Evaluación de los recursos naturales de la Argentina, Recursos Hidráulicos Subterráneos" Consejo Federal de Inversiones 55-73. Buenos Aires. Editorial CFI.

Vuksinic, E. y Miguel, R.E. (2018). Gestión de efluentes agroindustriales en el Oeste de la Provincia de La Rioja, Argentina. Vuksinic, E.; Miguel, R.E. Revista Estudios Ambientales. Vol. 6 N° 1. pp 26-42. Recuperado del 5 de noviembre de 2025 de URL <https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-ambientales/article/view/47/21> ISSN: 2347-0941

Vuksinic, E. y Miguel (2023). Estimación de la vulnerabilidad y peligro de contaminación del agua subterránea asociado a producciones agroindustriales en La Rioja. R.E 716-717 pp XXVI Congreso Nacional del Agua. XXVII Edición del Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2023. Del 28 al 30 de agosto de 2023, Centro Cultural Kirchner, Buenos Aires, Argentina. Recuperado del 5 de noviembre de 2025 de URL [https://conagua.ina.gob.ar/archivos /Libro-resumenes-CONAGUA2023.pdf](https://conagua.ina.gob.ar/archivos/Libro-resumenes-CONAGUA2023.pdf) ISSN 978-978-47387-3-8