

Los isótopos en los estudios ambientales y de salud

ISSN: (Impreso) (En línea) Página de inicio de la revista: <https://www.tandfonline.com/loi/gieh20>

Primer modelo hidrogeológico conceptual de dos cuencas intermontanas andinas basado en isótopos e hidroquímica

Nerina Belén Lana, Sandra Ibáñez, Natalia Salvi, Daniel Cicerone & Marisol Manzano

Para citar este artículo: Nerina Belén Lana, Sandra Ibañez, Natalia Salvi, Daniel Cicerone y Marisol Manzano (2021): Primer modelo hidrogeológico conceptual de dos cuencas intermontanas andinas basado en isótopos e hidroquímica, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, DOI: 10.1080/10256016.2021.1905636

Para hacer un enlace a este artículo: <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1905636>



Ver material complementario 



Publicado en línea: 05 Abr 2021.



Envíe su artículo a esta revista



Ver artículos relacionados 



Ver datos de Crossmark 



Primer modelo hidrogeológico conceptual de dos zonas intermontanas Cuencas andinas basadas en isótopos e hidroquímica

Nerina Belén Lana ^{a,b}, Sandra Ibañez ^c, Natalia Salvid, Daniel Cicerón ^{d,e,f} y
Marisol Manzano ^g

^a Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Conicet, CCT-Conicet Mendoza, Mendoza, Argentina; ^b Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina; ^c Facultad de Ingeniería de la UNCuyo (FIUNCuyo), Centro Universitario, Mendoza, Argentina; ^d Instituto Nacional del Agua (INA), Mendoza, Argentina; ^e Comisión Nacional de Energía Atómica, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina; ^f Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de San Martín, San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina; ^g Departamento de Ingeniería Minera y Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España

ABSTRACTO

Los ambientes áridos de montaña son vulnerables ante escenarios de cambio climático. Las variaciones en las fuentes de recarga y el aumento de la temperatura pueden afectar la disponibilidad hídrica, amenazando los sistemas socioprodutivos a escala local y regional. En este sentido, se estudiaron dos sistemas hidrológicos en la Cordillera de los Andes, Argentina, mediante técnicas hidroquímicas e isotópicas, con el objetivo de comprender el origen del agua, la recarga de las aguas subterráneas y conceptualizar el sistema de flujo de las aguas subterráneas. En los dos períodos de muestreo (invierno y verano) la mayoría de las aguas se caracterizaron por una baja mineralización y un tipo HCO₃-Ca. La composición isotópica presentó amplios rangos de variación consistentes con las diferencias altitudinales existentes en los sistemas de estudio. Sin embargo, no se observaron cambios isotópicos significativos entre las muestras colectadas en los períodos de invierno y verano. Por lo tanto, se infiere poca influencia de la precipitación líquida en la fuente de recarga de ambos sistemas hidrológicos. Esto significa que el sector occidental del valle, donde se ubican los cuerpos de hielo y el permafrost, es la principal zona de recarga de aguas subterráneas de ambas cuencas. Esto confirma la hipótesis anterior utilizada para el modelo conceptual hidrogeoquímico propuesto y resalta la importancia de proteger estos ambientes para asegurar el suministro de agua en tierras áridas.

HISTORIA DEL ARTICULO

Recibido el 30 de agosto de 2020
Aceptado el 25 de febrero de 2021

PALABRAS CLAVE

Argentina; Andes centrales;
fuente de agua subterránea;
hidroquímica; hidrógeno-2; hidrología
isotópica; oxígeno-18;
Uspallata;
Yaguaraz

1. Introducción

En el oeste argentino, los Andes constituyen una cordillera de 4000 km de longitud y una barrera orográfica que permite la condensación de las masas de aire húmedo provenientes del océano Pacífico, originando un gran reservorio de agua para un extenso territorio. De menor a mayor latitud, la altitud de la cordillera disminuye y su régimen de precipitaciones aumenta, lo que genera una diversidad de regiones climáticas que van desde el desierto hasta la selva.

CONTACTO Sandra Ibañez

sandra.ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar Los datos

complementarios de este artículo se pueden consultar en <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1905636> © 2021 Informa UK Limited,

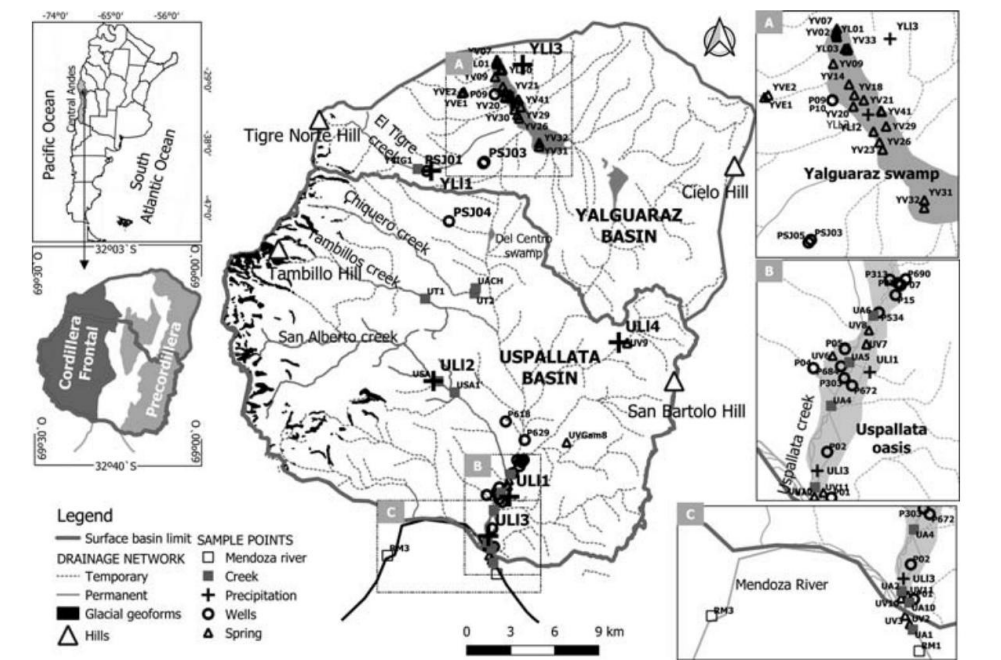
que opera como Taylor & Francis Group

Andes (17,5°–31° S, precipitación media anual <250 mm) [1] en el norte de Argentina, hasta los Andes de Tierra del Fuego (54°–60,5° S, 477 mm) [2] en el sur del país.

Los Andes centrales (31–35° S, precipitación media anual 250–350 mm) [1] constituyen una zona de transición árida (Figura 1). Durante los meses de invierno (abr.–sep.), las precipitaciones provienen principalmente de tormentas generadas en el océano Pacífico occidental que ingresan al continente y descargan en forma de nieve. Durante la temporada de verano (oct.–mar.), la llegada de masas de aire húmedo proviene preferentemente del océano Atlántico oriental [3]. A pesar de la convergencia de dos fuentes de humedad en estos ambientes montañosos, la baja pluviosidad, el aumento general de las temperaturas y las altas tasas de evaporación pueden afectar la disponibilidad de agua y, por ende, amenazar los sistemas socioprodutivos a escala local y regional.

Desde una perspectiva local, los desarrollos urbanos, las actividades agrícolas y mineras que se desarrollan en los Andes Centrales ponen en riesgo la sustentabilidad de los recursos hídricos, afectando su calidad y cantidad. Adicionalmente, desde un punto de vista regional, estas zonas constituyen las principales fuentes de agua para los arroyos y acuíferos que abastecen al oasis de Mendoza, que es el sistema socioeconómico productivo más importante del oeste argentino. Por ello, conocer la hidrodinámica de estas áreas montañosas es de principal interés para promover el uso local de los recursos hídricos de manera eficiente y sustentable y preservar su cantidad y calidad aguas abajo en el oasis.

Para comprender mejor los procesos hidrológicos que controlan la cantidad y calidad del agua generada en esas áreas áridas andinas, se seleccionaron dos valles intermontanos contiguos de los Andes centrales, las cuencas hidrológicas de Yalguaraz y Uspallata (YHB y UHB, respectivamente), para estudiar las fuentes de agua, las relaciones entre



Sistemas de aguas superficiales y subterráneas, y el origen de la química y la calidad del agua. evolución dentro de las cuencas.

El YHB es una cuenca arréica sin población antropogénica permanente, pero de gran importancia ecológica (para la fauna) y económica (debido a la existencia de valiosos yacimientos minero-lógicos). La UHB abastece de agua a una región de unos 10.000 habitantes, con desarrollos urbanos y turísticos en la zona. Además forma parte del corredor bioceánico que une Argentina con el Océano Pacífico, recibiendo así un importante número de viajeros en su camino hacia Chile. El sitio tiene también relevancia histórica y arqueológica, ya que fue parte del Camino Inca, asentamiento de pueblos primitivos, de actividades mineras Durante la industrialización capitalista, y el lugar de cruce de los Andes por el General José de San Martín [4,5], un acontecimiento de suma importancia en la historia de los países sudamericanos.

El sistema hidrológico de la UHB descarga al río Mendoza, principal cauce andino curso que riega el oasis socioproductivo más grande de la región cuyana, a nivel pie oriental de los Andes. Por su importancia local y regional, el sistema UHB se ha monitoreado durante los últimos 45 años [6–12]. Sin embargo, durante los últimos 20 años Se ha producido un importante incremento del crecimiento urbano y un desarrollo desordenado de las actividades agrícolas, turísticas e inmobiliarias en la zona sur del valle. La expansión urbana ha propiciado la proliferación de pozos clandestinos para el abastecimiento de agua y/o eliminación de aguas residuales, poniendo en peligro las condiciones prístinas del acuífero. Pero poco se está haciendo Se sabe mucho sobre este sistema hidrológico, por lo que conocerlo y monitorearlo es fundamental. se vuelve crucial para garantizar su sostenibilidad.

Este trabajo intenta comprender cuáles son las principales fuentes de agua en ambos proyectos propuestos. sistemas y caracterizar su composición, lo que nos permitirá asegurar su conservación. Ante las actividades antropogénicas que puedan afectar la calidad y cantidad de sus aguas, así como evaluar su vulnerabilidad ante escenarios de cambio climático. Se pronostica que los efectos del cambio climático observados en elevaciones altas muy probablemente introducirán Alteraciones significativas en los ciclos hidrológicos de los ríos y aguas subterráneas alimentados por nieve y hielo. recarga. Estos efectos podrían tener un impacto particular en las actividades humanas a nivel local y escalas regionales. En este sentido, el objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un enfoque conceptual modelo sobre el origen y destino de las aguas superficiales y subterráneas en el YHB y UHB. Para lograrlo, utilizamos principalmente las características químicas e isotópicas del agua superficial, aguas subterráneas y pluviales, datos piezométricos e información geológica y geofísica. Toda esta información se ha utilizado para caracterizar y comprender el origen del agua, los procesos asociados con la recarga de aguas subterráneas y conceptualizar El sistema de flujo de aguas subterráneas. Hasta donde saben los autores, este estudio constituye el primer informe químico e isotópico sobre las aguas del YHB.

2. Lugar de estudio

La YHB y la UHB se ubican en los Andes centrales argentinos, entre la Cordillera Frontal al oeste y la Precordillera al este (Figura 1). Ambas cuencas son depresiones tectónicas sobre materiales cenozoicos, formadas durante el último ciclo orogénico de el área (Ciclo Orogénico Andino), que ocurrió durante el Neógeno y el Cuaternario veces [13]. La Cordillera Frontal está constituida predominantemente por rocas ígneas (volcánicas y plutónicas) y rocas piroclásticas (Figura 1S) [14,15]. También hay rocas más antiguas, en su mayoría sedimentarias, que han sido intruidos por rocas plutónicas o sirven como base

para rocas volcánicas. Aunque las rocas volcánicas (andesitas, riolitas) son predominantes en el área de estudio, también están presentes grauvacas, lutitas, areniscas y rocas graníticas intrusivas de edad Paleozoica [16]. La Precordillera está compuesta principalmente por rocas sedimentarias paleozoicas y rocas sedimentarias y volcánicas triásicas [6].

El YHB es una cuenca arréica de 665,26 km² con un bañado alargado en el centro del valle, el bañado Yalguaraz. La topografía cambia significativamente desde una altura mínima de 2183 m snm (en la zona del bañado), hasta alturas máximas de 5220 m snm, al oeste, y 3300 m snm al este (Tigre Norte en la cordillera occidental, y cerro Cielo en la oriental; Figura 1). Existen glaciares de escombrera activos y parches de nieve perenne en las partes más altas de la Cordillera Frontal, cubriendo una superficie de 1078 km² [17]. El arroyo El Tigre es el único curso de agua permanente del YHB que se genera en esta zona (Figura 1). Tuvo un caudal promedio de 0,314 m³ s en el año hidrológico 2007/2008 [18].

-1

El arroyo se infiltra completamente antes de llegar al estero de Yalguaraz (Figura 1(A)); el cual se ubica al SO de la falla de Yalguaraz, e interpretado como producto del levantamiento del Alto de Yalguaraz (Figura 1S) y el consecuente represamiento del drenaje superficial [13]. El Alto de Yalguaraz constituye una elevación local del sustrato paleozoico subsuperficial cubierto por sedimentos cuaternarios [13]. Se desarrolla en dirección NO–SE y tiene una superficie aproximada de 37 km². Según estudios geoelectrónicos realizados en la zona, los valores de resistividad más bajos (<100 Ω m) se registraron bajo los depósitos del estero, indicando la presencia de agua. Se sugirió la existencia de un acuífero importante bajo el estero de Yalguaraz, lo que es consistente con la red de drenaje centrípeta [13] y la identificación de descarga de agua subterránea a través de manantiales (YVx en la Figura 1(A)).

En el límite sur del YHB, una divisoria de aguas superficiales produce un cambio en la dirección del escurrimiento regional: las aguas superficiales en el lado oeste del YHB drenan hacia el noreste, mientras que en el UHB drenan hacia el sur (Figura 2S). Alrededor de la divisoria YHB-UHB, existen arroyos temporales con drenaje hacia el sur y un pequeño pantano (Barreal del Centro, Figura 2S) que podría captar agua del arroyo El Tigre. Por lo tanto, se discute la existencia de una posible conexión hidráulica subterránea entre ambas cuencas.

El UHB tiene una superficie de 2701,87 km² (Figura 1). La topografía cambia significativamente de N a S y de O a E, siendo esta última la dirección con mayor variación, desde los 1750 m s. n. m. (centro del valle) hasta alturas máximas de 5631 m s. n. m. al oeste y de 3400 m s. n. m. al este (el cerro Tambillo en la cordillera occidental y el cerro San Bartolo en la oriental; Figura 1). El valle de Uspallata es una depresión tectónica sobre sedimentos neógenos rellena por depósitos cuaternarios. Por lo tanto, los materiales cuaternarios forman la cuenca hidrológica de Uspallata, apoyada sobre una cimentación de sedimentos neógenos.

El espesor cuaternario varía desde 175 m al norte hasta 25 m en el extremo sur, con pendiente descendente de N a S. En estos sedimentos se ha desarrollado un acuífero de nivel freático formado por sedimentos de grano grueso. En un estudio previo, el volumen total de sedimentos permeables cuaternarios en la depresión de Uspallata se estimó en 6000 hm³ de los cuales 4100 hm³ están saturados [9]. Considerando una porosidad promedio del 10%, podría haber aproximadamente 400 hm³ de agua subterránea almacenada en los depósitos cuaternarios [9].

El valle de Uspallata cuenta con varios cursos de agua provenientes de la Cordillera del Tigre (nombre local de la Cordillera Frontal) que corre de NE a SO a lo largo de unos 60 km. En esta cordillera, y entre los 3290 y 5610 m s.n.m., se encuentran, en orden de

superficie decreciente: varios glaciares de escombrera, glaciares de hielo limpio, glaciares cubiertos de detritos y parches de nieve perenne, con una superficie total de 5,75 km² (Figura 1; sólo se han cartografiado los cuerpos de hielo con una superficie mayor a 0,01 km²; no se han inventariado los de superficies menores ni el permafrost; datos de [19,20]). Entre los cursos permanentes más importantes se encuentran el arroyo El Chiquero, con un caudal medio aproximado de 0,25 m³ s⁻¹ (arroyo El Chiquero, 0,25 m³ s⁻¹ (año hidrológico 1992/1993; [8]). Ninguno de ellos descarga al cauce del arroyo Uspallata; discurren desde la Cordillera del Tigre hasta la parte central del valle y allí desaparecen, en su mayoría por infiltración o por redistribución a través de canales de riego artificiales. El arroyo Uspallata recorre de norte a sur la parte central del valle y desemboca al río Mendoza por el sur. Es el principal colector de la UHB, con un caudal medio anual de 1,8 m³ s⁻¹ (año hidrológico 1992/1993; [10]).

En el extremo sur del UHB, la cuenca de agua subterránea se estrecha y se vuelve más delgada. Desde allí hasta el límite sur de la UHB, los niveles freáticos están próximos a la superficie del suelo, lo que produce importantes aportes de agua subterránea al arroyo Uspallata y al río Mendoza [9].

Según Norte [21], ambos sitios de estudio constituyen una zona de transición entre un clima de tundra polar (O) y un clima desértico (E). La precipitación en la UHB se caracteriza por dos estaciones lluviosas: una principal que se extiende de noviembre a marzo (lluvias de verano del Océano Atlántico oriental), y una estación lluviosa más corta, de junio a agosto. Las nevadas del Océano Pacífico occidental ocurren entre mayo y octubre. Por lo tanto, la precipitación en la cuenca de Uspallata no muestra una fuerte estacionalidad ya que hay lluvias durante todo el año [3]. La precipitación líquida anual promedio es <150 mm (1961-1990), y la evaporación potencial anual promedio supera los 1300 mm (1961-1990) [22]. La humedad relativa del aire es baja (37-45%). La temperatura media anual en la UHB alcanza los 22°C , con promedios mínimos y máximos mensuales de 15°C (junio-julio) y 28°C (enero-diciembre), respectivamente [23].

3. Materiales y métodos

3.1. Toma de muestras

Se realizaron dos muestreos, uno en agosto de 2016 (invierno) y otro en febrero de 2017 (verano). El muestreo incluyó agua de lluvia, agua subterránea (manantiales y pozos) y arroyos permanentes (arroyos El Tigre, Chiquero, Tambillos, San Alberto y Uspallata, y río Mendoza). Debido a la ausencia de habitantes, el YHB cuenta con un número reducido de pozos. Solo se encuentran registrados 5 en la zona, construidos por empresas mineras privadas. Se obtuvieron un total de 69 muestras. Las muestras de agua superficial y subterránea se recogieron en botellas de plástico de 1 L y botellas de plástico de alta densidad de 250 mL para el análisis químico e isotópico, respectivamente. La conductividad eléctrica (CE), la temperatura y el pH se midieron en el sitio utilizando una sonda multiparamétrica Orion. Las botellas de muestra de 250 mL se sellaron con parafilm para evitar la evaporación durante el envío. Las muestras se transportaron al laboratorio, donde se almacenaron a 4 °C y se analizaron en una semana.

Se recolectaron muestras de precipitación en ambas cuencas hidrológicas (YLIX y ULLX, [Figura 1](#)). Los colectores de muestras YHB se desplegaron en tres sitios: uno ubicado en el lado occidental (Cordillera Frontal), un segundo ubicado en el centro de la cuenca (Yalguaraz).

En la UHB se utilizaron dos colectores de muestras, uno ubicado en el lado oeste (precordillera), y el otro en el lado este (ciénaga). En la UHB se aplicaron criterios similares: un colector de muestras se instaló en el lado oeste, dos en el oasis de Uspallata (extremo medio y sur) y el cuarto en el lado este. La UHB cuenta con dos estaciones meteorológicas y los colectores de muestras UL1 y UL12 se instalaron a 1 km a la redonda de las mismas para obtener datos de la cantidad de precipitación para el cálculo de los valores isotópicos medios ponderados. Los datos de precipitación utilizados en este estudio fueron proporcionados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos [24].

La estación UL1 se instaló en noviembre de 2016. Las recolecciones de muestras restantes comenzaron en enero de 2018. Al final del período de recolección de muestras (mayo de 2018), se recolectaron con éxito un total de 10 muestras de precipitación para ambos sistemas hidrológicos.

Los colectores de precipitación estaban hechos de un recipiente de plástico (volumen 3 L), equipado con un embudo (diámetro de 15 cm) que tenía un tubo de plástico que se extendía hasta el fondo del recipiente y una manguera larga y estrecha (longitud 150 cm) unida en la parte superior para evitar la evaporación. La recolección y el monitoreo del agua de lluvia para el análisis de isótopos se realizaron siguiendo las pautas del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) [25].

3.2. Análisis químicos e isotópicos Todas las

muestras fueron analizadas para los iones principales (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-) en la Universidad Nacional de Cuyo siguiendo métodos estándar [26]. Los 3 resultados fueron sometidos a un proceso de control de calidad que incluyó el balance iónico con un error máximo aceptable del 10% [27]. En este texto, las cargas iónicas se omitirán para simplificar. La información hidroquímica se representó mediante diagramas convencionales de Piper y Stiff [28], utilizando el software libre Easyquim [29]. Se dibujaron mapas piezométricos utilizando datos de nivel de agua de arroyos, manantiales y pozos.

Los isótopos estables de la molécula de agua se midieron en el laboratorio del OIEA (Viena, Austria) utilizando espectroscopia láser. Los resultados se expresaron como desviaciones isotópicas (δ) por mil (‰) en relación con el agua oceánica media estándar del OIEA (V-SMOW). Los errores analíticos fueron 0,1 y 0,5 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente. La interpretación de los datos de isótopos estables se realizó primero utilizando el gráfico convencional $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ combinado con la línea global de agua meteórica (GMWL) [30].

4. Resultados

4.1. Composición hidroquímica de las aguas

Las aguas del YHB mostraron valores de CE bajos a medios (167–970 y 166–694 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para muestras colectadas en invierno 2016 y verano 2017, respectivamente). Los valores superiores corresponden, sin embargo, a muestras modificadas por procesos de evaporación evidenciados en campo, por lo que no se consideraron representativos de las aguas no modificadas. Los valores de pH de estas muestras fueron cercanos a neutros (ca. 7.5), con algunos valores afectados por la presencia de heces de animales como guanacos, vacas, etc. que utilizan los manantiales como abrevaderos (Tabla 1S).

La principal facies química de las aguas del YHB es Ca-HCO_3 (Figura 2(a), izquierda), con pequeñas variaciones estacionales. Hay varias muestras con $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ y $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$

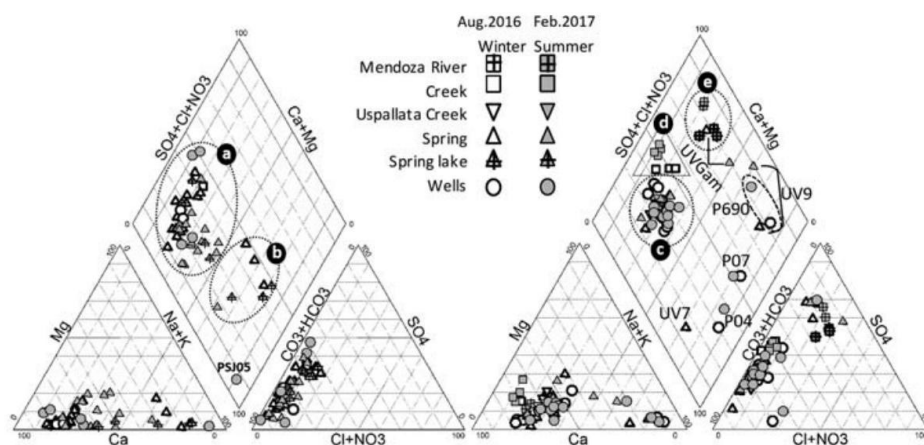


Figura 2. Diagrama de Piper que muestra la composición química de las muestras de agua de los valles YHB (izquierda) y UHB (derecha). Los símbolos vacíos y llenos representan las campañas de invierno (agosto de 2016) y verano (febrero de 2017), respectivamente. (a): principales facies químicas de las aguas de YHB; (b): agua de manantial evaporada; (c): manantiales y pozos en la UHB; (d): arroyos permanentes en la UHB; (e): río Mendoza y manantial UVGam en la UHB. Las muestras identificadas se comentan en el texto.

facies, y un pequeño número de muestras con tipología Na-HCO₃ (Figura 2(b), izquierda). Estas últimas son de una zona de manantiales difusos formando pozas y estanques dentro del pantano de Yalguaraz, lo que dificultó el proceso de muestreo. Estas muestras podrían estar afectadas por la evaporación y por el intercambio catiónico en los sedimentos acumulados en los estanques, como se discutirá más adelante. La muestra PSJ05 (Figura 2, izquierda) corresponde a un pozo ubicado en el sector suroeste del área de estudio. Su composición no fue consistente con el resto de las aguas de la cuenca (Tabla 1S) debido a la presencia de tripolifosfato de sodio, utilizado en el fluido de perforación. Por esta razón, el análisis químico fue excluido en el presente estudio.

Las muestras del UHB mostraron valores de pH ligeramente alcalinos (ca. 8) y valores de CE superiores a los del YHB (210–1840 y 206–1745 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para muestras colectadas en invierno 2016 y verano 2017, respectivamente; Tabla 1S). La mayoría de las muestras fueron tipificadas como Ca-HCO₃, con pequeños cambios estacionales (Figura 2(c,d); derecha). Sin embargo, hubo algunas muestras con diferentes facies químicas: (i) muestras del manantial UVGam (Precordillera; Figura 1) cambiaron de tipo Ca-SO₄ en invierno a tipo Na-SO₄ en verano, y las del pozo P690 (lado este del arroyo Uspallata) y el manantial UV9 (Precordillera; Figura 1) mostraron aguas tipo Na-SO₄ en ambas estaciones; (ii) las muestras del manantial UV7 (margen oriental del arroyo Uspallata) y del pozo P04 (margen occidental del mismo arroyo) (Figura 1) fueron Na-HCO₃; y (iii) las muestras del río Mendoza fueron Ca-SO₄ (Figura 2(e); derecha).

4.2. Composición isotópica de las aguas del YHB y del UHB La

Figura 3 presenta los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de agua colectadas en el YHB y el UHB. También se muestra la composición isotópica media anual de la precipitación en la ciudad de Mendoza (827 m s. n. m.) para los años 1983, 1984, 1986, 1987 y 1999 [31];

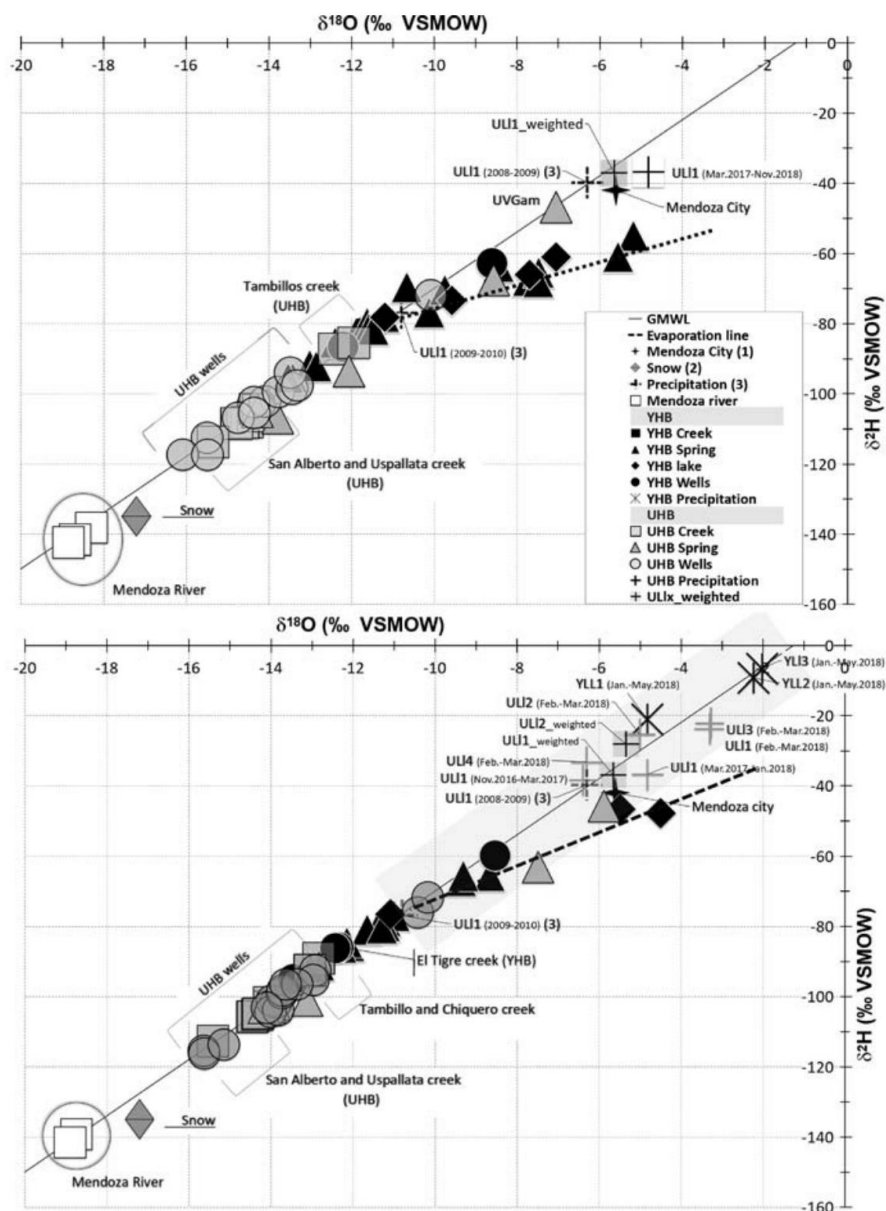


Figura 3. Valores de isótopos estables para todas las muestras analizadas en el YHB y el UHB, respectivamente, en el relevamiento de invierno, agosto de 2016 (arriba); y, el relevamiento de verano, febrero de 2017 (abajo). También se incluyeron las composiciones medidas y ponderadas de la precipitación líquida. Ambos gráficos también muestran la composición de la precipitación promedio en la ciudad de Mendoza (1), de Dapeña [32], la composición de una muestra de nieve de la Cordillera Frontal (2), de Sileo et al. [33], y los valores isotópicos medios ponderados de la precipitación UHB (3), de Hoke et al. [3].

valor de una muestra de nieve de la cuenca del río Vallecitos (noviembre de 2013, Cordillera Frontal, 3358 m s. n. m., al sur del área de estudio [32]); y los valores isotópicos medios ponderados para dos años de muestreo (2008-2010) en la UHB [3]. Se incluyeron como referencias para las muestras locales.

Todas las muestras se ubican cerca de la línea de agua meteórica. Los valores isotópicos variaron de -19 a -6 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$, y de -140 a -40 ‰ para $\delta^2\text{H}$. Algunas muestras de agua (por ejemplo, manantiales y manantiales de lagos) tienden a ubicarse por debajo de la línea de agua meteórica, lo que muestra un efecto de evaporación. Las muestras del río Mendoza estaban más agotadas que las del UHB, como se esperaba debido a la mayor altitud de la cuenca del río Mendoza hacia el valle de Uspallata.

Casi todo el conjunto de muestras de agua del YHB y del UHB mostró una variación isotópica entre -16 y -8 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y un enriquecimiento de sur a norte (Figura 3S), a excepción de las muestras de precipitación líquida. Si bien las aguas mostraron amplios rangos de composición isotópica, estos fueron consistentes con el rango altitudinal presente en toda el área estudiada (de 1750 a 5000 m s. n., aproximadamente). Por otro lado, no se observó una marcada variación estacional entre las muestras colectadas en los períodos de invierno (agosto 2016) y verano (febrero 2017) (Figura 3).

El agua de lluvia estaba isotópicamente más enriquecida que las muestras de agua superficial o subterránea. Los valores isotópicos variaron de -19 a -6 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$, y de -140 a -40 ‰ para $\delta^2\text{H}$. También se graficaron los valores de las medias ponderadas de los isótopos estables, que tienen en cuenta la cantidad de precipitación en cada período de muestreo (ponderado por ULLx, Figura 3). Los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ ponderados por la cantidad de precipitación para ULL1_weighted fueron similares a los informados por Hoke et al. [3], año de muestreo 2008-2009 y Dapeña [31] para la ciudad de Mendoza (Tabla 1S y Figura 3).

5. Discusión

5.1 Origen del agua en la Cuenca Hidrológica del Yalguaraz (CHY)

Agua de lluvia. A primera vista, la composición isotópica de las precipitaciones recogidas en la cuenca fue más enriquecida en isótopos pesados que las muestras de agua superficial de la Cordillera Frontal y las muestras de pozos y manantiales. Esto sugiere una contribución insignificante de las precipitaciones locales a la recarga de agua subterránea. Sin embargo, las muestras de precipitación podrían evaporarse (Figura 3). La evaporación podría ocurrir durante la lluvia o en el dispositivo de muestreo, pero debido a los escasos datos disponibles esto no puede analizarse. Este tema merece un estudio detallado en futuros trabajos.

Aguas superficiales. El sector occidental del YHB concentra las zonas más altas de la cuenca y la principal zona de recarga hídrica. El arroyo El Tigre tiene dirección oeste-este en la mayor parte de su curso, pero al llegar a su cono aluvial se produce una división del escurrimiento debido a un levantamiento topográfico, y parte del flujo se dirige al noreste mientras que otra parte se dirige al sur (Figura 2S). El cono aluvial del arroyo El Tigre está constituido por sedimentos holocénicos de granulometría gruesa (gravas y arenas), y se supone de alta permeabilidad [33], lo que favorece la infiltración. En el canal noreste, el escurrimiento se infiltra completamente a $32^{\circ}12'$ y $69^{\circ}25'$ (2521 m s. n. m.), antes de llegar al pantano de Yalguaraz. Si bien el tramo del arroyo puede retroceder o avanzar dependiendo del año hidrológico considerado, no existen registros recientes que confirmen su drenaje superficial hasta el fondo del valle.

La química de las muestras de El Tigre muestra un tipo de agua Ca-HCO_3 (agosto de 2016) y $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ (febrero de 2017) (YTIG1 en la Figura 4) con baja mineralización (CE de 267 y 238 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en agosto de 2016 y febrero de 2017, respectivamente) y composición constante, lo que refleja la misma área de origen. Sus composiciones isotópicas también fueron similares y ligeramente más enriquecidas.

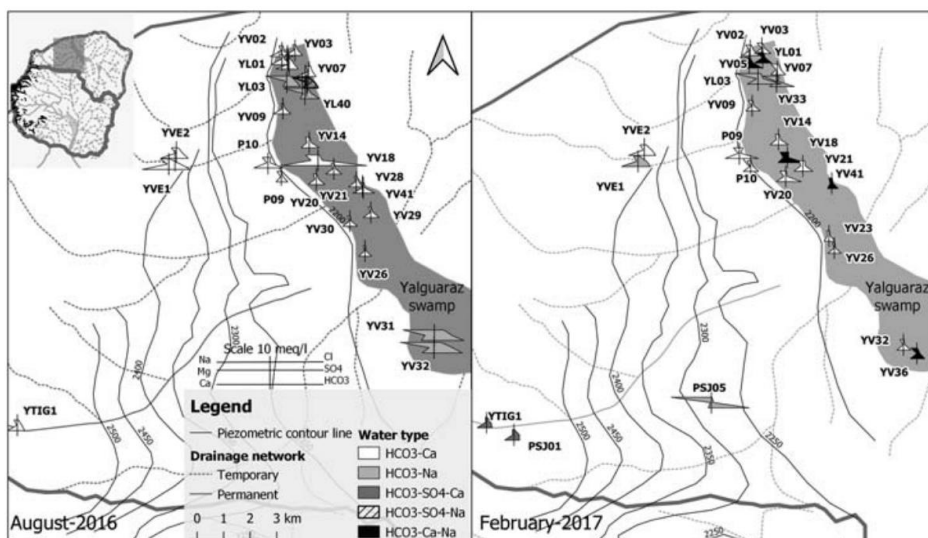


Figura 4. Diagramas rígidos de muestras de aguas superficiales y subterráneas (pozos y manantiales) en el YHB en agosto de 2016 (izquierda) y febrero de 2017 (derecha).

que otras muestras tomadas a menor altura en la cuenca (Figura 5(A)). Esto podría reflejar ya sea cierta evaporación en el arroyo o la descarga a menor altura de agua subterránea recargada a mayores alturas.

Aguas de pozo. Tres de los cinco pozos registrados en el área se ubican en la Cordillera Frontal (PSJ01, PSJ03 y PSJ05 en la Figura 1), en el cono aluvial del arroyo El Tigre. Los dos restantes (P09 y P10) se ubican en el cono aluvial distal, en el borde occidental del pantano de Yalguaraz. Dado que los pozos PSJ03 y PSJ05 se encontraban cerca uno del otro (a unos 200 m de distancia) y captaban agua del mismo acuífero, solo el pozo PSJ05 fue seleccionado para fines de monitoreo.

El pozo PSJ01 está ubicado cerca del punto de muestreo del arroyo El Tigre a 50 m menos de elevación (Figura 2S). La única muestra de este pozo (febrero de 2017) mostró la misma composición química que el arroyo El Tigre: ambos fueron Ca-HCO₃-SO₄ y tienen una CE similar (237–238 $\mu\text{S cm}^{-1}$) (Figura 4 y Tabla 1S). Además, ambas muestras tenían composiciones isotópicas muy cercanas (Figura 5(A)). Esto sugiere que, o bien en la zona de muestreo el arroyo se está infiltrando y el pozo está captando agua infiltrada del arroyo, o el arroyo tiene un flujo base de agua subterránea de la misma área de fuente que las líneas de flujo captadas por el pozo. El pozo tiene 73 m de profundidad y la muestra se tomó a unos 33,5 m de profundidad. El cono aluvial del arroyo El Tigre está formado por sedimentos altamente permeables [33] lo que favorece la infiltración, como se mencionó anteriormente. La evidencia de campo de la reducción del flujo superficial confirmaría la infiltración del arroyo y la recarga del acuífero. Además, aunque la pequeña diferencia en la composición isotópica entre el acuífero y el arroyo no es significativa, la composición isotópica más ligera del PSJ01 podría significar un mayor volumen de agua.

El pozo PSJ05 se encuentra a 240 m menos de elevación que el PSJ01. La única muestra disponible también es de febrero de 2017. Su composición es muy diferente a la del pozo PSJ01 y el arroyo: tiene agua Na-HCO₃ (Figura 4), está mucho más mineralizada (CE = 694 $\mu\text{S cm}^{-1}$;

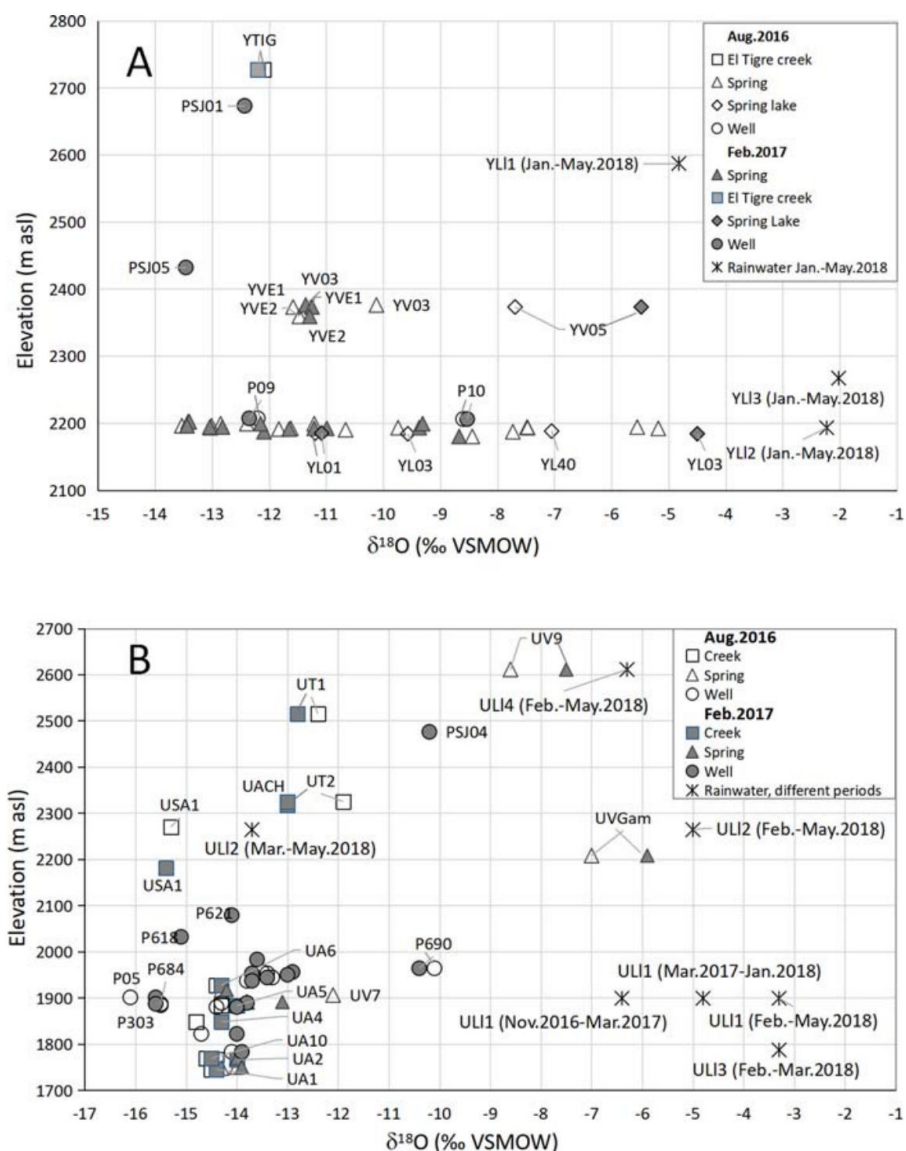


Figura 5. Valores isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$) de las muestras de agua vs. elevación de (A) el YHB y (B) el UHB. Las muestras identificadas se mencionan en el texto.

Tabla 1S), y es notablemente más ligero desde el punto de vista isotópico (Figura 5(A)). El pozo tiene 160 m de profundidad y la muestra se tomó a 124 m de profundidad. La muestra podría representar agua modificada químicamente por intercambio de cationes dentro del pozo debido a la evaporación y la baja renovación natural. Incluso si la muestra se evaporó, su composición isotópica indica que este pozo toma agua subterránea recargada a mayor altitud que el pozo PSJ01.

Los pozos P09 y P10 están cerca uno del otro (10 m) y ambos son poco profundos (10 y 9,5 m de profundidad, respectivamente). Ambos pozos tuvieron composiciones muy constantes en los dos estudios. Aunque ambos presentaron aguas tipo Ca-HCO_3 , la CE fue mayor en P10. Este pozo tiene un diámetro mayor (1 m contra 0,3 m en el pozo P09) y no está entubado, por lo que se comporta como

un estanque, según lo indican sus valores químicos e isotópicos, concentrado por evaporación con respecto al otro pozo.

Aguas de manantial. Dos manantiales se ubican en la ladera occidental de la cuenca (YVE1 y YVE2 en la Figura 1) mientras que el resto se encuentra en la zona de bañados. El bañado de Yalguaraz es una zona óptima para la generación de manantiales: es una zona topográficamente deprimida que facilita la concentración de líneas de flujo de agua subterránea provenientes de las zonas altas circundantes; además, existe un control estructural ejercido por la altura de la roca madre de Yalguaraz y el escarpe de falla (altura Yal-guaraz en la Figura 1S). Actúa como un obstáculo para el drenaje tanto superficial como subterráneo, forzando a que el flujo de agua subterránea proveniente de la Cordillera Frontal emerja en forma de manantiales. La forma circular de muchos manantiales sugiere que el agua subterránea fluye verticalmente hacia arriba hasta el suelo (Figura 4S). Aunque aún están por cuantificarse, los manantiales generalmente constituyen pequeños flujos que son evaporados por la alta heliofanía y baja humedad del aire del sitio, evidenciada por la existencia de depósitos de sal en el borde de los manantiales (Figura 4S, a). En otros casos, como los manantiales YL01, YL03, YL40 y YV05, forman charcas que sirven como abrevaderos para la fauna local (Figura 4S, b).

Las muestras colectadas de manantiales se caracterizaron por una CE baja ($166\text{--}422\ \mu\text{S cm}^{-1}$; Tabla 1S) y un pH neutro (ca. 7). La tipología química de la mayoría de estas muestras fue Ca-HCO_3 (Figura 4). Las muestras que no encajaron en estas generalidades tenían un tipo Na-HCO_3 o $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ debido al intercambio catiónico, y estaban algo más mineralizadas y enriquecidas isotópicamente debido a la evaporación (Figura 6). La composición isotópica de los manantiales de ladera YVE1 y YVE2 fue constante en los dos estudios y consistente con las muestras del arroyo El Tigre y los pozos PSJ01 y PSJ05. De hecho, la composición isotópica de todas las muestras de manantiales es consistente con las alturas de la Cordillera Frontal; por lo tanto, esta cordillera ha sido asumida como la principal área de recarga de agua subterránea en el YHB. La composición isotópica de la mayoría de los manantiales lacustres y circulares muestreados dos veces mostró cambios relacionados con la evaporación entre los dos estudios, pero algunos manantiales no mostraron cambios (Figura 6). No se observó ningún patrón espacial aparente.

5.2. Origen del agua en la Cuenca Hidrológica de Uspallata (CHU)

Agua de lluvia. Las muestras de precipitación líquida recogidas en la UHB mostraron un mayor enriquecimiento en isótopos pesados que las muestras de arroyos, manantiales y pozos (Tabla 1S y Figura 3). Si bien parece claro un patrón de agotamiento isotópico con el aumento de la altitud (Figura 5(B)), el hecho de que las muestras correspondan a diferentes períodos de recolección impide proponer hipótesis robustas a partir de ellas.

Hoke et al. [3] informaron valores mensuales de composición isotópica de muestras de precipitación que mostraron un amplio rango de variación: $-18,4$ a $-1,7\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$; y, $-142,8$ a $-1,4\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$ (Tabla 2S). La composición isotópica de las muestras de invierno fue más ligera que la de los meses de verano. Según los autores, la cuenca Uspallata representa un límite importante entre la humedad invernal de origen del Pacífico y la humedad estival de origen del Atlántico, como se discutió previamente. El rango de amplitud isotópica entre las estaciones frías y cálidas podría explicarse por los diferentes orígenes de la humedad atmosférica.

Los valores isotópicos ponderados obtenidos en el presente trabajo (ULIX_weighted, Figura 3 y Tabla 2S) y los reportados por Hoke para el año 2008-2009 (ULI1_2008-2009) son similares a los registrados en la ciudad de Mendoza (al este de la localidad de Uspallata, [31]).

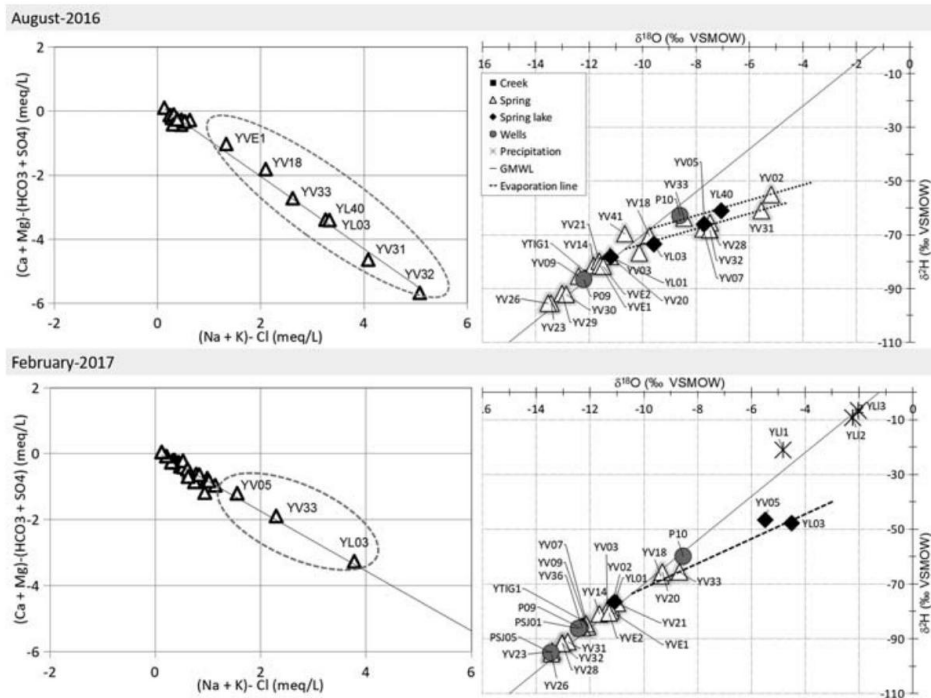


Figura 6. Izquierda: Diagrama de dispersión de $([Ca] + [Mg]) - ([SO_4] + [HCO_3])$ vs. $([Na] + [K]) - [Cl]$ (meq/L) en muestras de manantial de la Cuenca Hidrológica de Yaguaraz en los dos muestreos. Derecha: Composición isotópica de muestras de agua de la misma cuenca y fechas.

Sin embargo, las medias ponderadas cambian según el año hidrológico considerado, como se puede observar para el año de muestreo 2009-2010 (ULI1_2009-2010, [3]).

En general, tal como se discutió para la cuenca del Yaguaraz, se observa poca influencia de la precipitación líquida en la mayoría de las aguas muestreadas en el UHB (Figura 5(B)). Parece claro que la principal fuente hídrica tiene una composición isotópicamente más liviana que las reportadas para muestras que tendrían un mayor aporte de precipitación local (UVGam y UV9). Esto destaca a la Cordillera Frontal como la principal área de recarga del UHB.

Aguas superficiales. La red de drenaje permanente en la UHB proviene del sector occidental del valle. En el lado oriental, los cursos de agua son temporales y activos solo durante períodos de intensas lluvias. Así, la cubierta de nieve permanente de la Cordillera Frontal origina los arroyos presentes en el área de estudio, los cuales presentan baja mineralización ($CE = 215\text{--}329 \mu S \text{ cm}^{-1}$). Se observó un aumento de la CE en el agua del arroyo en el sector sur del valle, cerca de su descarga al río Mendoza, alcanzando la $CE 1120 \mu S \text{ cm}^{-1}$. Esto se relaciona con las actividades antrópicas realizadas en el valle, principalmente por los retornos del sistema de riego agrícola.

En las quebradas San Alberto, Tambillos y Chiquero, al NO de la UHB, el agua tiene un tipo químico Ca-HCO₃-SO₄ (Figura 7). Otros estudios realizados en la subcuenca de la quebrada San Alberto indicaron que en años hidrológicos secos (p. ej. 2017), cuando la precipitación media anual es menor que la media histórica (serie 2005-2018, [34]), el SO₄ prevalece sobre el HCO₃, mientras que en años hidrológicos húmedos las proporciones de SO₄ y

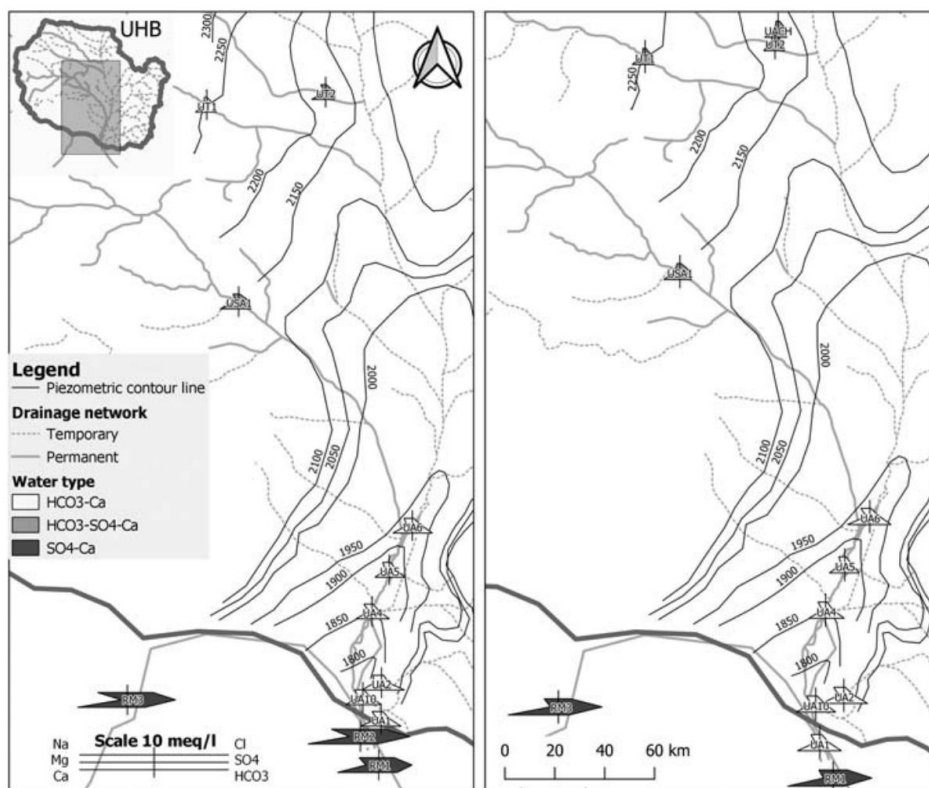


Figura 7. Diagramas rígidos de las muestras de agua superficial y tipos químicos en la UHB en agosto de 2016 (izquierda) y febrero de 2017 (derecha).

El HCO_3 representa cerca del 50%. Se supone que el sulfato representa la influencia de la litología en la química del agua, mientras que el bicarbonato representa la influencia de la precipitación sólida [35].

A pesar de la composición de los cauces subsidiarios del arroyo Uspallata, éste presentó una tipología Ca-HCO_3 , lo que se asume se debe al aporte subterráneo que recibe el cauce principal del valle, lo que ha sido corroborado a través del caudal de agua y mediciones de actividad de ^{222}Rn [35].

De manera muy diferente, las concentraciones iónicas medidas en las aguas del río Mendoza fueron dos a tres veces superiores a las del arroyo Uspallata; la tipología Ca-SO_4 del primero es consistente con la existencia de formaciones Terciarias conteniendo yeso y anhidrita en la cuenca del río.

Las composiciones isotópicas de las muestras de agua superficial en la UHB oscilaron entre $-15,4$ y $-11,9$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$, y entre $-113,8$ y $-85,4$ ‰ para $\delta^2\text{H}$ (Tabla 1S). Dentro de este rango, las aguas del arroyo San Alberto (USAx en la Figura 5(B)) estaban isotópicamente más empobrecidas que las de los arroyos Tambillos y Chiquero (UTx y UACH en la Figura 5(B)). Considerando las áreas de las cuencas de drenaje y las curvas hipsométricas (Tabla 3S y Figura 5S), la zona de captación de la subcuenca San Alberto se encuentra a mayores altitudes que las de Tambillos y Chiquero. Por lo tanto, se observa un efecto altitudinal en la composición isotópica de sus aguas. Los valores isotópicos de las muestras del arroyo Uspallata (UAX en la Figura 5(B))



corresponden a mezclas de aguas de estas subcuencas, manteniendo una composición relativamente estable a lo largo de su curso hasta su descarga al río Mendoza.

Agua de pozo. La mayoría de los pozos (75%) muestreados en la cuenca de Uspallata se ubican en el parte occidental del valle. Esos pozos tenían baja mineralización y aguas con Ca-HCO_3 ; y, Según el mapa piezométrico que se muestra en la Figura 8, captan agua subterránea proveniente de la Cordillera Frontal al O. Unos pocos pozos ubicados al NE de la UHB tenían agua más mineralizada con tipos de agua Na-SO_4 (P690) o Na-HCO_3 (P04 y P07) (Figura 8).

Según el mapa piezométrico, dichos pozos tienen aportes hídricos desde la Precordillera hacia el E. Por lo que se observó una clara diferencia en cuanto a tipología química.

entre las muestras procedentes de uno u otro lado del valle y de la cordillera.

En cuanto a la mineralización de las aguas subterráneas en la UHB, se observó un aumento general de la actividad iónica. Se observaron concentraciones de norte a sur. La litología de los sedimentos en El valle intermontano aluvial de Uspallata está formado por rocas pefitas y psammitas, en su mayoría no consolidados y por lo tanto muy permeables. Estos sedimentos permiten una rápida y infiltración efectiva de agua desde cursos de agua superficiales [9]. Como se describe para la superficie agua, los valores más altos de CE se detectaron en la parte sur del valle, con valores de 944 y 1017 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para los pozos poco profundos P01 y P02, respectivamente (Tabla 1S y Figura 8). El aumento de las concentraciones iónicas (por ejemplo, Cl^- y NO_3^-) tiene una connotación ambiental negativa, ya que las actividades antropogénicas desarrolladas en el valle son disminución de la calidad del agua en los sistemas superficiales y subterráneos.

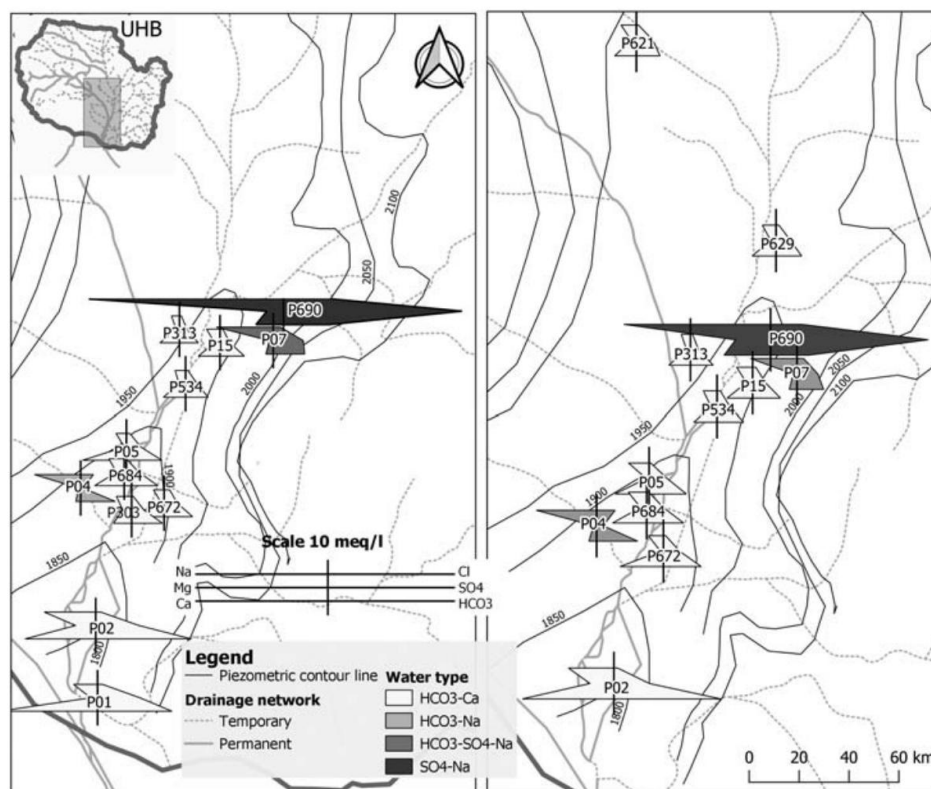


Figura 8. Tipos químicos de las aguas subterráneas en la UHB en agosto de 2016 (izquierda) y febrero de 2017 (derecha).

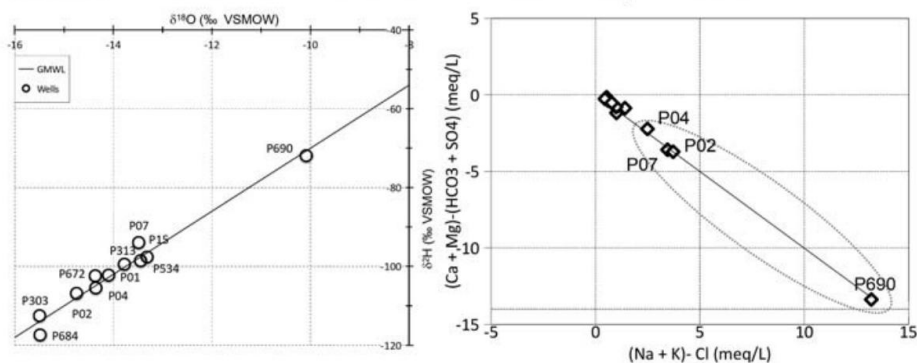
Las composiciones isotópicas de las muestras de pozos estaban en el rango de $-16,1$ a $-10,1$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de $-117,5$ a -72 ‰ para $\delta^2\text{H}$. La Figura 9 muestra la existencia aproximada de tres grupos de muestras que definen un patrón similar a una mezcla:

Existe un grupo de muestras significativamente más empobrecidas que el resto ($\delta^{18}\text{O} = -16,1$ a -15 ‰). Son las de los pozos P05 (54 m), P618 (29 m), P684 (26 m) y P303 (70 m).

(Figura 9, izquierda). Estos valores sugieren mayores alturas de recarga y, en consecuencia, flujos más profundos que descargan al relleno cuaternario probablemente a través de la red diacrística, de agrietamiento y fracturas de la cordillera [9].

Existe otro grupo de muestras significativamente más enriquecidas que el resto pero que aparentemente muestran poca evaporación ($\delta^{18}\text{O} = -11$ a -10 ‰). Son de los pozos P690 y PSJ04. El pozo PSJ04 está ubicado al NO de la UHB, cerca de la cuenca de Yalguaraz. Su altura y composición isotópica son consistentes con las del arroyo Tambillos (muestras UT1 y UT2; Figura 7), que se genera en la Cordillera Frontal al W. El pozo P690 se ubica en la parte NE del valle, en una zona donde el agua subterránea proviene de la Precordillera. Su facies química es diferente a las demás (tipología Na- SO_4) y su composición isotópica confirma que el sector oriental del valle tiene

August-2016



February-2017

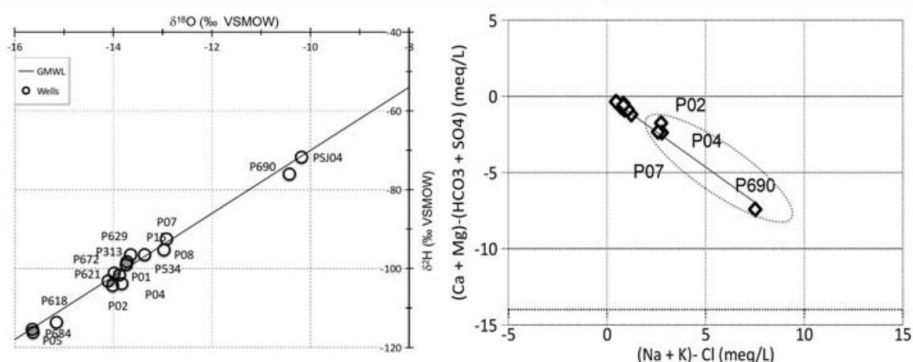


Figura 9. Izquierda: Composición isotópica del agua subterránea de la UHB en los dos muestreos realizados. Derecha: Diagrama de dispersión de $([\text{Ca}] + [\text{Mg}] - [\text{SO}_4] - [\text{HCO}_3])$ vs. $([\text{Na}] + [\text{K}] - [\text{Cl}])$ (meq/L) para las mismas fechas.



Las aguas subterráneas se recargan a menores alturas que el sector occidental, lo que supone un mayor aporte de precipitación líquida que de nieve.

- . La mayor parte del resto de las muestras parecen ser mezclas de los dos grupos anteriores, pero con una composición química e isotópica cercana a las aguas provenientes de la Cordillera Frontal al W (Figuras 8 y 9 izquierda).

En cuanto a las facies químicas del pozo P690, es importante destacar que en la zona no existen formaciones geológicas que contengan yeso. Sin embargo, en los alrededores existen sulfuros polimetálicos [36] pertenecientes al distrito minero Paramillos de Uspallata, el cual también está formado por depósitos diseminados (Paramillos Norte, Paramillos Centro, Paramillos Sur y Cerro Canario) y un depósito epitermal (Oro del Sur) [37].

Dada la magnitud del distrito minero, es probable que el ion SO_4 presente en el agua subterránea sea resultado de la oxidación de sulfuros. Con respecto al origen del Na, el intercambio catiónico se confirmó en la Figura 9 (derecha), donde se observó un gran exceso de Na con respecto al Cl en paralelo a un déficit de Ca más Mg con respecto a HCO_3 más SO_4 .

Manantiales. Las muestras de los manantiales presentaron una tipología Ca- HCO_3 . Las aguas del sector oriental del valle se diferenciaron de esta generalidad y se caracterizaron por mayores niveles de solutos y una tipología Na- SO_4 . En cuanto a la composición química, todas las muestras de manantiales presentaron un exceso de Na con respecto a Cl en ambas campañas de muestreo, sugiriendo fuentes adicionales de este elemento distintas al aporte atmosférico. Las muestras de agua pertenecientes a los manantiales UV9, UVGam y UV7 reflejaron modificaciones más intensas por proceso de intercambio catiónico (Figura 10(A)). Además, en el mapa piezométrico se puede observar que el pozo P690 se ubica aguas abajo del manantial UVGam, por lo que en principio se puede inferir que ambos tienen la misma área de captación en la Precordillera.

Dentro de estos manantiales del sector oriental, la UVGam y la UV9 presentaron una composición isotópica similar a la lluvia recolectada en el valle (Figura 10(B)), lo que indica que la recarga de la precipitación local es la principal fuente hídrica. Esto es consistente con la información proporcionada por la composición química y la ubicación hidrodinámica de ambos manantiales. Además, las muestras de ambos manantiales se enriquecieron isotópicamente por evaporación (Figura 10(B)).

5.3. Alturas de recarga

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua meteórica varían con la altitud, lo que proporciona un medio para deducir la altura del área de recarga para el agua subterránea recolectada en áreas de recarga escalonada. Aunque la técnica puede presentar errores en el gradiente de elevación de $\delta^{18}\text{O}$ debido a efectos de evaporación en el agua superficial, sublimación de la nieve, cambios en las rutas de transporte de humedad relacionados con variaciones climáticas y/o cambios en la composición isotópica inicial de las masas de aire, es una herramienta útil para explorar la evolución espaciotemporal del origen topográfico del agua subterránea y superficial en corrientes de agua de montaña.

rangos.

En el Valle de Uspallata se calculó un gradiente preliminar de isótopos ($\delta^{18}\text{O}$) de precipitación con la altitud con el objetivo de identificar las principales alturas de recarga del sistema hidrológico. Se establecieron dos gradientes, uno en la vertiente occidental y otro en la oriental.

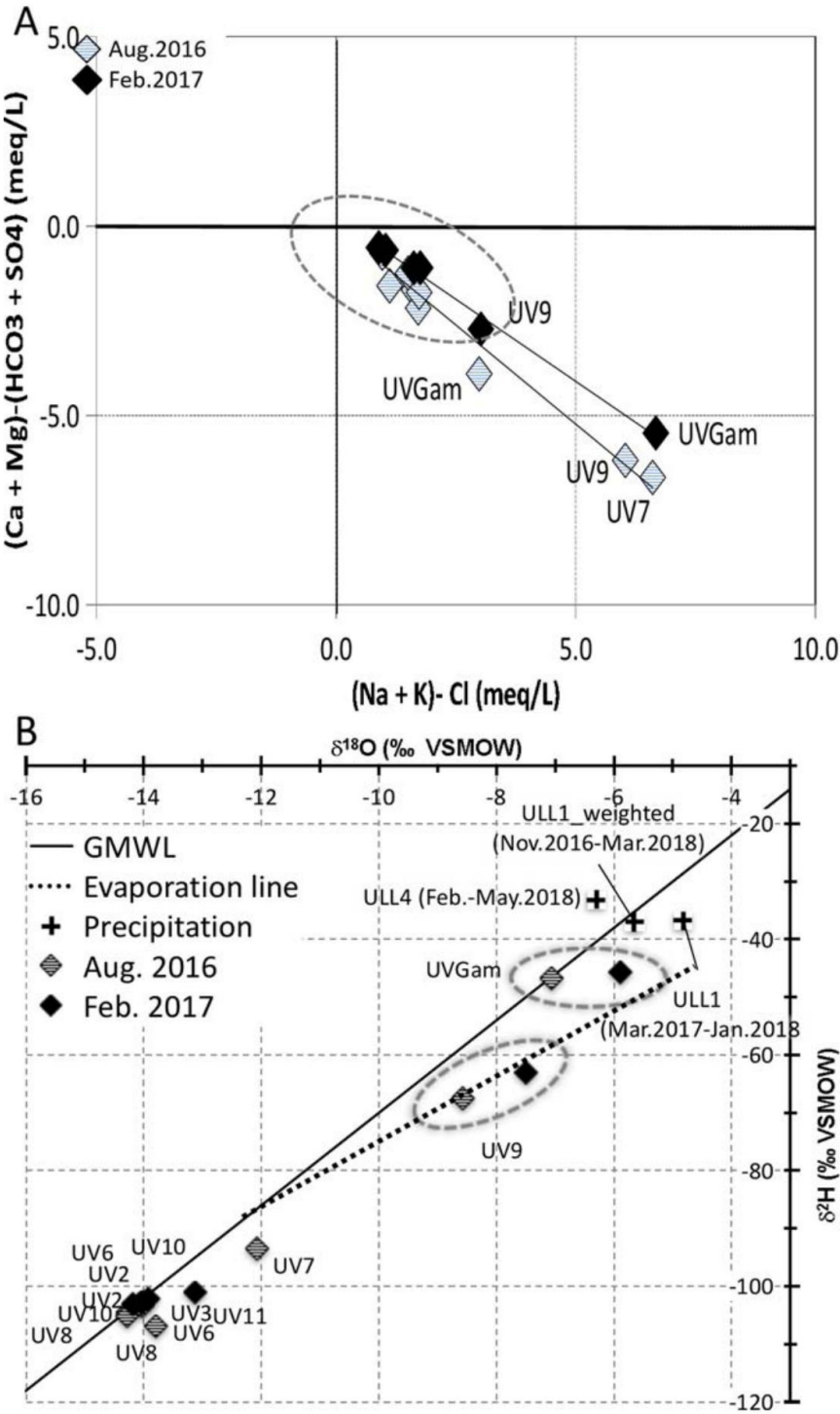


Figura 10. (A) Diagrama de dispersión de $([Ca] + [Mg]) - ([SO_4] + [HCO_3])$ vs. $([Na] + [K]) - [Cl]$. (B) Composición isotópica de los manantiales del UHB.



utilizando los datos de las estaciones de precipitación ubicadas en el centro del valle (ULI1), en la Cordillera Frontal occidental (ULI2) y en la Precordillera oriental (ULI4, Figura 1). Se estimaron utilizando los datos isotópicos disponibles del mismo período de muestreo (feb-mar 2018) y la altitud de las estaciones consideradas. Se obtuvieron gradientes bastante similares para ambas márgenes del valle, siendo de $-0,5\text{‰}/100\text{ m}$ para la vertiente occidental y de $-0,4\text{‰}/100\text{ m}$ para la oriental. Estos gradientes son comparables a los reportados por Hoke et al. [38] para la cuenca alta del río Mendoza, que fue de $-0,48\text{‰}/100\text{ m}$.

Aunque los gradientes reportados en este trabajo fueron obtenidos usando solamente la composición isotópica de la precipitación de verano (la cual puede estar influenciada por las tormentas convectivas del Atlántico), gradientes similares fueron reportados por Hoke et al. [38] para tormentas provenientes del E y el O. Siguiendo a estos autores, el último sugiere que el origen de las fuentes de humedad (Atlántico o Pacífico) puede tener un efecto menor en la evolución de $\delta^{18}\text{O}$ con la altura, como se observa en la Figura 5(B).

Los gradientes calculados para el UHB se extrapolaron a alturas mayores, obteniendo así funciones isotópicas teóricas preliminares para toda el área (Figura 11). Las composiciones de $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua superficial y subterránea del valle también se graficaron en la gráfica y se calculó una altura de recarga estimada para cada una de ellas (Tabla 4S). Estas alturas estuvieron entre 2500 y 3580 m s. n. m. en el sector oriental del valle, y entre 3900 y 4500 m s. n. m. en el sector occidental. Es importante mencionar que a estas altitudes no solo se registran glaciares, sino también permafrost, con un límite inferior estimado en alrededor de 3600 m s. n. m. [16].

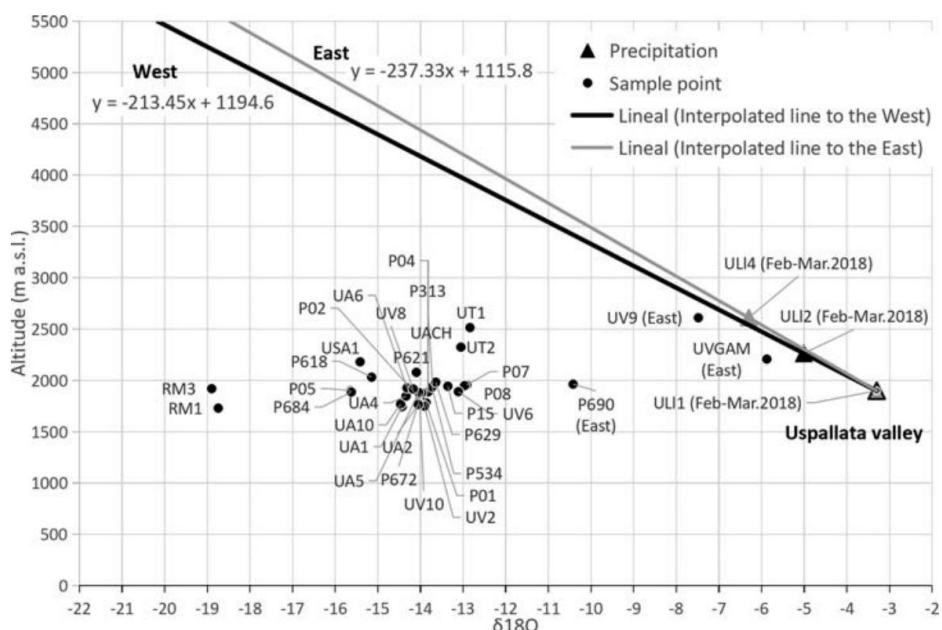


Figura 11. Gradiente de altitud tentativo de $\delta^{18}\text{O}$ en los sectores occidental (línea negra) y oriental (línea gris) del Valle de Uspallata establecido a partir de datos de precipitación líquida recolectados en el Valle de Uspallata en el verano de 2018 (febrero-marzo). También se muestran los valores isotópicos de las muestras de agua superficial (UA, USA, UT, UACH) y subterránea (P, UV; UGAM) tomadas en el valle. El punto de intersección del valor de $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua en la línea de tendencia negativa representa el valor de altitud derivado para las posibles alturas de recarga.

Además, no se observó una marcada variación estacional entre las muestras colectadas en el período de invierno y verano (Figura 3), aunque esto debería ser respaldado con una larga serie de datos. Estas observaciones llevan a la siguiente hipótesis: (i) las principales fuentes de agua que abastecen tanto al sistema superficial como al subterráneo deben provenir de fuentes cuya composición isotópica es homogénea a lo largo del año, como cuerpos de hielo (eg glaciares de roca, glaciar de hielo limpio, glaciar cubierto de detritos, etc.). Esto permite afirmar que tanto en el UHB como en el YHB la recarga del sistema ocurre principalmente en el sector occidental del valle y en grandes alturas, donde se confirma la existencia de glaciares y permafrost. La presencia de arroyos permanentes en el sector occidental y su composición isotópica similar con las muestras de agua subterránea (pozos y manantiales) confirman esta observación. (ii) Se evidencia poca influencia de la precipitación líquida en la recarga al sistema. Su influencia sólo se puede observar en un pequeño número de muestras (por ejemplo, P690, UV9 y UVGam) que reciben flujos de agua subterránea de la vertiente oriental del valle (Precordillera) y que mostraron una composición isotópicamente enriquecida ($-10,4$ a $-5,9$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$), similar a las muestras de precipitación colectadas en el Valle de Uspallata (ULI1 y ULI3) y área oriental (ULI4 en la Tabla 1S), como se discutió previamente.

6. Conclusiones

En este estudio se aplicaron técnicas hidroquímicas e isotópicas para caracterizar e identificar las fuentes de agua superficial y subterránea en dos valles intermontanos de la cordillera de los Andes, la cuenca de Yalguaraz al N y la cuenca de Uspallata al S. Para la cuenca de Yalguaraz, este estudio constituye el primer informe químico e isotópico sobre sus aguas. Una baja mineralización química y un tipo Ca-HCO₃ caracterizaron las aguas de ambos sistemas hidrológicos. Esta facie química representa aguas provenientes principalmente de la Cordillera Frontal al W. En cuanto a la composición isotópica estable de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, las aguas de lluvia mostraron un mayor enriquecimiento isotópico que las muestras de aguas de arroyos, manantiales y pozos. Entre ellas, se reportaron amplios rangos de variación según el período de muestreo, y se observó un enriquecimiento temporal de isótopos pesados durante el período de verano. Además, las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas (manantiales y pozos) y de los arroyos permanentes indican poca variación estacional, lo que confirma que la principal fuente de recarga de los acuíferos no proviene del agua de lluvia, sino de fuentes de composición isotópica más estable, como los glaciares y otros cuerpos de hielo. Estas fuentes se ubican a alturas de recarga superiores a los 3900 m s. n. m., lo que enfatiza la importancia de la Cordillera Frontal como principal zona de recarga de las cuencas. En ambientes áridos, conocer el origen del agua y las fuentes de recarga es fundamental para mejorar las redes de monitoreo y la predicción de la disponibilidad del recurso, por ejemplo mediante mediciones por teledetección de glaciares, cobertura de nieve y control de la contaminación. Especialmente para la cuenca del río Uspallata, el diseño de redes de monitoreo debería servir para monitorear posibles cambios y tendencias no deseadas en la cantidad y calidad del agua del acuífero.

Expresiones de gratitud

Los autores agradecen al personal del Departamento General de Irrigación por la asistencia técnica y colaboración en el trabajo de campo, y a Leandro Álvarez (IANIGLA), Guillermo Corona y Pablo González por el apoyo cartográfico para el inventario de montañas.

Declaración de divulgación

El/los autor(es) no informaron ningún posible conflicto de intereses.

Fondos

Este trabajo contó con el apoyo de la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA, ARG 7/008), la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT PICT-2016-1590) y la Secretaría de Ciencia, Técnica y Postgrado, UNCuyo (SeCTyP B045).

ORCIDO

Nerina Belén Lana <http://orcid.org/0000-0002-4114-4495> Daniel Cicerone <http://orcid.org/0000-0003-2725-8573> Marisol Manzano <http://orcid.org/0000-0001-9732-6549>

Referencias

- [1] Tapia Baldis C, Trombottó Liaudat D, Ahumada A. Ambiente periglacial y regiones geocriológicas en los Andes de San Juan (28°–33°S) [Ambiente periglacial y regiones geocriológicas en los Andes de San Juan (28°–33°S)]. *Rev Asoc Geol Argent.* 2019;76(1):46–63. Español.
- [2] Servicio Meteorológico Nacional [Internet]. Argentina: Estadísticas Climatológicas 2001/2010. Fuerza Aérea Argentina. Comando de Regiones Aéreas. Buenos Aires, Argentina; 2018. Disponible en: <https://www.smn.gob.ar/estadisticas> [3] Hoke GD, Aranibar JN, Viale M, et al. Fuentes de humedad estacionales y composición isotópica de precipitaciones, ríos y carbonatos en los Andes a 32,5–35,5°S. *Geochem Geophys Geosyst.* 2013;14:962–978.
- [4] Morton N. Tras los pasos de Charles Darwin en Sudamérica. *Geol Today.* 1995;11(5):190–195.
- [5] Sironi O. Modos de vida mineros en los Andes australes: arqueología antropológica histórica en Mendoza, Argentina. *Int J Histor Archaeol.* 2019;23:153–171.
- [6] Vaca A. Descripción del mapa hidrogeológico preliminar del Valle de Uspallata. Informe interno D-166. INA-CRAS; 1985. Español.
- [7] INA-CRAS (Instituto Nacional del Agua-Centro Regional de Agua Subterránea). Aspectos hidrológicos e hidroquímicos del Valle de Uspallata; 1988. Español.
- [8] Hernández J, Álvarez A. Aspectos hidrológicos e hidroquímicos del Valle de Uspallata. informe DI-237 Mendoza; 1994. Español.
- [9] FUNC (Fundación Universidad Nacional de Cuyo). Estudio de la regulación del Río Mendoza en Uspallata. Informe final. Mendoza, Argentina: Convenio UNC-IPE; 1994. Español.
- [10] DGI (Departamento General de Irrigación). Análisis fisicoquímicos Valle de Uspallata. Interno Informe; 2009. Español.
- [11] Lana B, Rovira S, Gómez ML, et al. Análisis hidroquímico de las aguas superficiales y subterráneas del valle de Uspallata-Mendoza (1970–2015)). Sesión de carteles presentados en: XX Congreso Geológico Argentino; 7 al 11 de agosto de 2017; Tucumán, Argentina. Español [12] Ibáñez S, Lana B, Manzano M, et al. Estudio preliminar del origen del agua en el valle de Uspallata y su aporte al río Mendoza con técnicas isotópicas e hidroquímicas. *Bol Geol Min.* [En prensa.](#)
- [13] Terrizzano CM, Fazzito SY, Cortés JM, et al. Tomografía de resistividad eléctrica aplicada al estudio de estructuras neotectónicas, noroeste de la Precordillera Sur, Andes Centrales de Argentina. *Revista de Ciencias de la Tierra del Sur* 2012;34:47–60.
- [14] Caminos R. Cordillera Frontal en Geología Regional Argentina, Vol I. Córdoba, Argentina: Academia Nacional de Ciencias; 1979. Español.

- [15] Cortés JM, González Bonorino G, Koukharsky M, et al. Hoja Geológica 3369-09 Uspallata, Provincia de Mendoza. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:100.000. Buenos Aires, Subsecretaría de Minería de la Nación. Servicio Geológico Minero Argentino; 1997. (Boletín; 280). Español.
- [16] Trombottó Liaudat D, Lenzano M, Castro M. Inventario y monitoreo de crioformas y procesos criogénicos en los Andes Centrales de Mendoza, Argentina: nacimiento y extinción de un lago periglacial. Actas de la 10.ª Conferencia Internacional sobre Permafrost; Salekhard, Rusia; 2012. págs. 419–424.
- [17] IANIGLA-ING. Informe de la subcuenca de la cordillera Ansilta. Cuenca del río San Juan. Inventario Nacional de Glaciares. Mendoza: Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET); 2018; Español.
- [18] Consultores en Gestión del Agua. Balanza Hídrica, proyecto San Jorge- 3638/R1. Mendoza, Argentina; 2008. Español.
- [19] IANIGLA-ING. Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares. Inventario Nacional de Glaciares. Mendoza: Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET); 2014; Español.
- [20] IANIGLA-ING. Informe de las subcuencas del arroyo Uspallata y del sector Cordillera del Tigre. Cuenca del río Mendoza. Inventario Nacional de Glaciares. Mendoza: Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET); 2018. Español.
- [21] Mapa climatológico de Mendoza. [Internet]. Junta de Andalucía; Gobierno y Universidades de la Región Andina Argentina. Inventario de Recursos de la Región Andina Argentina. Sistema Físico Ambiental de Cuyo, Mendoza. Español. Disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/g0401.htm>.
- [22] Salomón M, Soria N, Fernández R, et al. Evaluación de degradación de tierras áridas: sitio piloto Mendoza, Departamento de Lavalle. Informe Técnico. LADyOT – IADIZA – CRICYT. Mendoza, Argentina; 2005; Español.
- [23] Segal H. Meteorológico de Uspallata Valle, Mendoza, Argentina: Departamento General de Irrigación. Informe técnico. Inédito.
- [24] Secretaría de Recursos Hídricos [Internet]. Argentina: Sistema Nacional de Información Hídrica, editado por Servicio de Recursos Hídricos, Secretaría de Obras Públicas. Español. Disponible en: <http://www.snih.hidricosargentina.gob.ar>.
- [25] Organismo Internacional de Energía Atómica/Red Mundial de Isótopos en Precipitaciones [Internet]. Austria: Guía de muestreo de precipitaciones (V2.02); 2014. Disponible en: http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_en_hq.pdf.
- [26] APHA/AWWA/WEF. Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales. 21.ª ed. Washington (DC): Asociación Estadounidense de Salud Pública/Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas/ Federación del Medio Ambiente del Agua; 2005.
- [27] Custodio E, Llamas MR. Hidrología subterránea. Barcelona: Omega; 1983. Español.
- [28] Hem JD. Estudio e interpretación de las características químicas del agua natural. Washington (DC): United States Geological Survey; 1992 (documento USGS Water Supply; 2254).
- [29] Vázquez-Suñé E, Serrano-Juan A. Easy_Quim. V.5.0. Software para el cálculo de los balances químicos en análisis de agua y su representación gráfica. Grupo de Hidrología Subterránea (GHS, UPC - CSIC) (<http://h2ogeo.upc.edu/es/investigacion-hidrologia-subterranea/software/42-easy-quim>); 2012. Español.
- [30] Craig H. Variaciones isotópicas en aguas meteóricas. Science. 1961;133(3465):1702–1703.
- [31] Dapeña C. Isótopos ambientales livianos: Su aplicación en hidrología e hidrogeología [doctoral tesis]. Universidad de Buenos Aires; 2007. Español.
- [32] Sileo N, Trombottó D, Dapeña C. Estudios preliminares del agua, nieve y hielo en la cuenca del río Vallecitos, Mendoza, Argentina. Acta Geol Lilloana. 2015;27:130–145. Español.
- [33] Cortés JM, González Bonorino G, Koukharsky M, et al. Hoja Geológica 3369-03 Yalguaraz, Provincias de San Juan y Mendoza. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:100.000. Buenos Aires, Subsecretaría de Minería de la Nación. Servicio Geológico Minero Argentino. 1997. (Boletín; 280). Español.



- [34] Departamento General de Irrigación. Mendoza: Boletín de Información Hidronivometeorológica. 2018. Español. Disponible en: <http://www.irrigacion.gov.ar/dgi/es/publications/bolet%C3%ADn-hidronivometeorol%C3%B3gico> .
- [35] Lana N, Ibáñez S, Rodríguez S, et al. Identificación de la relación agua superficial-agua subterránea en el arroyo San Alberto, Mendoza, Argentina, mediante la técnica de radón-222). Sesión de carteles presentados en: XIV Congreso Latinoamericano De Hidrogeología; X Congreso Argentino De Hidrogeología; 23 al 26 de octubre de 2018; Argentina. Español.
- [36] Carrasquero S, Rubinstein N, Belvins R. Paragénesis mineral de la Veta Tajo, Paramillos de Uspallata, Mendoza, Argentina. Acta Geol Lilloana. 2013;25:3–8. Español.
- [37] Carrasquero S. Caracterización petrológica y geoquímica del volcanismo Terciario en la región de Uspallata y su relación con las mineralizaciones hidrotermales del distrito minero Paramillos de Uspallata, Mendoza, Argentina. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata; 2015. Español.
- [38] Hoke GD, Garziona CN, Araneo DC, et al. El altímetro de isótopos estables: ¿los carbonatos pedogénicos cuaternarios predicen elevaciones modernas? Geología. 2009;37(11):1015–1018.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/350639644>

First conceptual hydrogeological model of two intermountain Andean basins based on isotopes and hydrochemistry

Article in *Isotopes in Environmental and Health Studies* · April 2021

DOI: 10.1080/10256016.2021.1905636

CITATION

1

READS

274

5 authors, including:



Belen Lana

National Scientific and Technical Research Council

33 PUBLICATIONS 446 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sandra Patricia Ibañez

National University of Cuyo

2 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)



Natalia Salvi

National University of Cuyo

2 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)

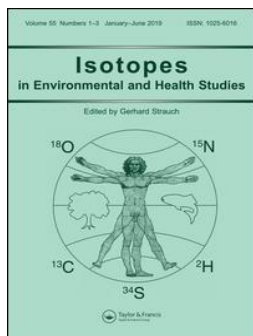


Daniel Salvador Cicerone

Comisión Nacional de Energía Atómica

42 PUBLICATIONS 894 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



First conceptual hydrogeological model of two intermountain Andean basins based on isotopes and hydrochemistry

Nerina Belén Lana, Sandra Ibañez, Natalia Salvi, Daniel Cicerone & Marisol Manzano

To cite this article: Nerina Belén Lana, Sandra Ibañez, Natalia Salvi, Daniel Cicerone & Marisol Manzano (2021): First conceptual hydrogeological model of two intermountain Andean basins based on isotopes and hydrochemistry, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, DOI: [10.1080/10256016.2021.1905636](https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1905636)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1905636>



View supplementary material [↗](#)



Published online: 05 Apr 2021.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



First conceptual hydrogeological model of two intermountain Andean basins based on isotopes and hydrochemistry

Nerina Belén Lana ^{a,b}, Sandra Ibañez^c, Natalia Salvi^d, Daniel Cicerone ^{e,f} and Marisol Manzano ^g

^aInstituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Conicet, CCT-Conicet Mendoza, Mendoza, Argentina; ^bFacultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina; ^cFacultad de Ingeniería de la UNCuyo (FIUNCuyo), Centro Universitario, Mendoza, Argentina; ^dInstituto Nacional del Agua (INA), Mendoza, Argentina; ^eComisión Nacional de Energía Atómica, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina; ^fInstituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de San Martín, San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina; ^gDepartamento de Ingeniería Minera y Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España

ABSTRACT

Mountains arid environments are vulnerable under climate change scenarios. Variations in the recharge sources and the rising temperature can affect the water availability, threaten the socio-productive systems on local and regional scales. In this sense, two hydrological systems were studied in the Andes Range, Argentina, by hydrochemical and isotope techniques, with the purpose to understand the origin of water, the groundwater recharge, and to conceptualize the groundwater flow system. In the two sampling periods (winter and summer seasons) most of the waters were characterized by low mineralization and a $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type. The isotopic composition showed wide ranges of variation consistent with the altitudinal differences existing in the study systems. However, no significant isotope changes were observed between the samples collected in winter and summer periods. Therefore, little influence of liquid precipitation is inferred in the recharge source of both hydrological systems. This means that the western sector of the valley, where the ice bodies and permafrost are located, is the main recharge area for groundwater of both basins. This confirms the former hypothesis used for the hydrogeochemical conceptual model proposed, and highlights the importance of protecting these environments to ensure the provision of water in arid lands.

ARTICLE HISTORY

Received 30 August 2020
Accepted 25 February 2021

KEYWORDS

Argentina; Central Andes; groundwater source; hydrochemistry; hydrogen-2; isotope hydrology; oxygen-18; Uspallata; Yalguaraz

1. Introduction

In western Argentina, the Andes constitute a mountain range 4000 km long and an orographic barrier that allows the condensation of the wet air masses coming from the Pacific Ocean, originating a large reservoir of water for an extensive territory. From lower to higher latitude, the altitude of the mountain range decreases and its rainfall regime increases, which generates a diversity of climatic regions ranging from the desert

CONTACT Sandra Ibañez  sandra.ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

 Supplemental data for this article can be accessed at <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1905636>

© 2021 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

Andes (17.5°–31° S, average annual rainfall <250 mm) [1] in northern Argentina, to the Tierra del Fuego Andes (54°–60.5° S, 477 mm) [2] in the south of the country.

The central Andes (31–35° S, average annual rainfall 250–350 mm) [1] constitute an arid transition zone (Figure 1). During the winter months (Apr–Sep), rainfall comes mainly from storms generated in the western Pacific Ocean that enter the continent and discharge as snow. During the summer season (Oct–Mar), the arrival of wet air masses comes preferably from the eastern Atlantic Ocean [3]. Despite the convergence of two moisture sources in these mountains environments, the low rainfall, general increase in temperatures, and high evaporation rates can affect the water availability and, thus, threaten the socio-productive systems on local and regional scales.

From a local perspective, urban developments, agricultural and mining activities taking place in Central Andes put the sustainability of the water resources at risk, affecting their quality and quantity. Additionally, from a regional viewpoint, these zones constitute the main water source areas for the streams and aquifers supplying the Mendoza oasis, which is the most important socio-economic productive system in the west of Argentina. Thus, knowing the hydrodynamics of those mountain areas is of main interest to promote the local use of water resources in an efficient and sustainable way and to preserve their quantity and quality downstream in the oasis.

To gain insight into the hydrological processes controlling the amount and quality of water generated in those arid Andean areas, two contiguous intermountain valleys of the central Andes, the Yalguaraz and the Uspallata hydrological basins (YHB and UHB, respectively), were selected to study the sources of water, the relationships between

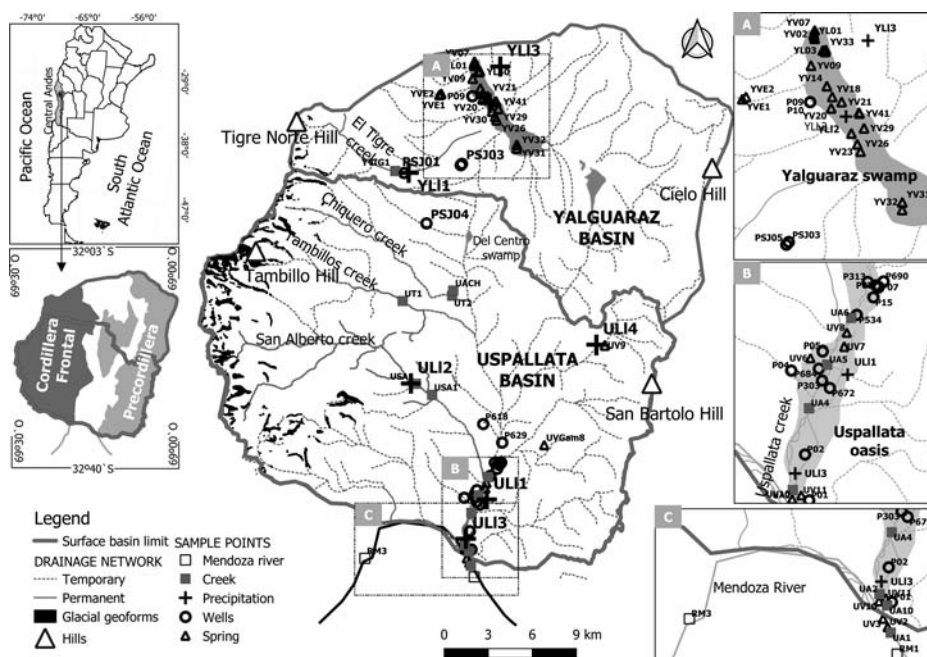


Figure 1. Location of the study area, geomorphologic provinces, and sampling sites. (A) Detail of the swamp area in the Yalguaraz Hydrological Basin. (B) Enlarged view of the central Uspallata Valley. (C) Detail of the discharge sector of the Uspallata Creek in the Mendoza River.

surface water and groundwater systems, and the origin of water chemistry and quality evolution within the basins.

The YHB is an arheic basin without permanent anthropogenic population, but of great ecological (for wildlife) and economic importance (due to the existence of valuable mineralogical deposits). The UHB supplies water to a region with ca. 10,000 inhabitants, with urban and touristic developments in the area. It is also part of the bi-oceanic corridor that connects Argentina with the Pacific Ocean, thus receiving a significant number of travellers on their way to Chile. The site has also historical and archaeological relevance, since it was part of the Inca Trail, the settlement of primitive towns, of mining activities during capitalistic industrialization, and the crossing place of the Andes by General José de San Martín [4,5], a paramount even in the history of the South American countries.

The UHB hydrological system discharges to the Mendoza River, the main Andean course that irrigates the largest socio-productive oasis in the Cuyo region, at the eastern feet of the Andes. Due to its local and regional importance, the UHB system has been monitored for the last 45 years [6–12]. However, for the last 20 years there has been an important increase in urban growth and a disordered development of agricultural, touristic, and real estate activities in the southern part of the valley. Urban expansion has led to the proliferation of clandestine boreholes for water supply and/or wastewater disposal, endangering the pristine conditions of the aquifer. But little is known about this hydrological system. Therefore, knowing and monitoring the system becomes crucial to ensure its sustainability.

This work attempts to understand which are the main water sources in both proposed systems and characterize their composition. This will allow us to ensure their preservation in the face of anthropogenic activities that may affect the quality and quantity of their waters, as well as to evaluate their vulnerability under climate change scenarios. It is forecasted that the climate change effects seen at high elevations will most likely introduce significant alterations in the hydrological cycles of snow/ice-fed rivers and groundwater recharge. These effects could have a particular impact on human activities at local and regional scales. In this sense, the main objective of this work was to develop a conceptual model on the origin and fate of surface water and groundwater in the YHB and UHB. To achieve that, we used mainly the chemical and isotopic characteristics of surface water, groundwater, and rain water, piezometric data, and geological and geophysical information. All this information has been used to characterize and to understand the origin of water, the processes associated with groundwater recharge, and to conceptualize the groundwater flow system. To the best of the authors' knowledge, this study constitutes the first chemical and isotopic report on the YHB waters.

2. Study site

The YHB and the UHB are located in the Argentinean central Andes, between the Cordillera Frontal to the west and the Precordillera to the east (Figure 1). Both basins are tectonics depressions on Cenozoic materials, formed during the latest orogenic cycle of the area (Andean Orogenic Cycle), which occurred during the Neogene and Quaternary times [13]. The Cordillera Frontal is predominantly constituted by igneous (volcanic and plutonic) and pyroclastic rocks (Figure 1S) [14,15]. There are also more ancient rocks, mostly sedimentary, which have been intruded by plutonic rocks or serve as the basis

for volcanic rocks. Although volcanic rocks (andesites, rhyolites) are predominant in the study area, greywackes, lutites, sandstones, and intrusive granitic rocks of Palaeozoic age are also present [16]. The Precordillera consists mainly of Paleozoic sedimentary rocks and Triassic sedimentary and volcanic rocks [6].

The YHB is an arheic basin of 665.26 km² with an elongated swamp in the centre of the valley, the Yalguaraz swamp. The topography significantly changes from a minimum height of 2183 m a.s.l. (in the swamp area), to maximum heights of 5220 m a.s.l., to the west, and 3300 m a.s.l. to the east (Tigre Norte in the western range, and Cielo hill in the eastern one; Figure 1). There are active rock glaciers and perennial snow patches in the highest parts of the Cordillera Frontal, covering an area of 1,078 km² [17]. The El Tigre Creek is the only permanent stream in the YHB that generates in this area (Figure 1). It had an average flow rate of 0.314 m³ s⁻¹ in the hydrological year 2007/2008 [18]. The stream infiltrates completely before reaching the Yalguaraz swamp (Figure 1(A)); which is located to the SW of the Yalguaraz fault, and interpreted as the product of the uplift of the Yalguaraz High (Figure 1S) and the consequent damming of the surficial drainage [13]. The Yalguaraz High constitutes a local elevation of the subsurface Paleozoic substrate covered by Quaternary sediments [13]. It develops in a NW–SE direction and has an approximate area of 37 km². According to geoelectric studies conducted in the area, the lowest resistivity values (<100 Ωm) were registered under the swamp deposits, indicating the presence of water. The existence of an important aquifer under the Yalguaraz swamp was suggested, which is consistent with the centripetal drainage network [13] and the identification of groundwater discharge through springs (YVx in Figure 1(A)).

In the southern boundary of the YHB, a surface water divide produces a change in the direction of the regional runoff: surface water in the western side of the YHB drains to the northeast, while in the UHB it drains to the south (Figure 2S). Around the YHB-UHB divide, there are temporary streams with south drainage and a small swamp (Barreal del Centro, Figure 2S) which could collect water from the El Tigre Creek. Therefore, the existence of a possible underground hydraulic connection between both basins is under discussion.

The UHB has an area of 2701.87 km² (Figure 1). The topography changes significantly from N to S and from W to E; the latter being the direction with the greatest variation, from 1750 m a.s.l. (centre of the valley) to maximum heights of 5631 m a.s.l. to the west and of 3400 m a.s.l. to the east (the Tambillo Hill in the western range, and the San Bartolo hill in the eastern one; Figure 1). The Uspallata valley is a tectonic depression on Neogene sediments filled by Quaternary deposits. Therefore, the Quaternary materials form the Uspallata hydrological basin, supported on a foundation of Neogene sediments. The Quaternary thickness varies from 175 m to the north to 25 m at the southern end, with N to S downward slope. In these sediments, a water-table aquifer formed by coarse grained sediments has been developed. In a previous study, the total volume of Quaternary permeable sediments in the Uspallata depression was estimated ~6000 hm³, of which ~4100 hm³ are saturated [9]. Considering an average porosity of 10%, there could be approximately 400 hm³ of groundwater stored in the Quaternary deposits [9].

The Uspallata valley has several water courses coming from the Cordillera del Tigre (local name of the Cordillera Frontal) which runs from NE to SW along some 60 km. In this mountain range, and between ~3290 and ~5610 m a.s.l., there are, in order of

decreasing surface: several rock glaciers, clean-ice glaciers, debris-covered glaciers, and perennial snow patches, with a total area of 5.75 km² (Figure 1; only the ice bodies with a surface area greater than 0.01 km² have been mapped; those with smaller surfaces and the permafrost have not been inventoried; data from [19,20]). Among the most important permanent courses are the El Chiquero Creek, with an approximate average flow of 0.25 m³ s⁻¹; the El Tambillo Creek, with 0.35 m³ s⁻¹, and the San Alberto Creek, with 0.8 m³ s⁻¹ (hydrological year 1992/1993; [8]). None of them discharge to the Uspallata Creek streambed; they run from the Cordillera del Tigre to the central part of the valley and disappear there, mostly by infiltration or by redistribution through artificial irrigation channels. The Uspallata stream runs from north to south along the central part of the valley, and discharges into the Mendoza River to the south. It is the main collector of the UHB, with an average annual flow of ~1.8 m³ s⁻¹ (hydrological year 1992/1993; [10]). At the southern end of the UHB, the groundwater basin narrows and becomes thinner. From there to the UHB southern border, the groundwater levels are close to the soil surface, which results in significant groundwater inputs to the Uspallata stream and to the Mendoza River [9].

According to Norte [21], both study sites constitute a transition zone between a polar tundra climate (W) and a desert climate (E). The UHB rainfall is characterized by two rainy seasons: a main rainy season extending from November to March (summer rains from the eastern Atlantic Ocean), and a shorter rainy season, from June to August. Snowfalls from the western Pacific Ocean occur between May and October. Hence, the precipitation in the Uspallata basin does not show a strong seasonality as there is rainfall throughout the year [3]. Average annual liquid precipitation is <150 mm (1961–1990), and average annual potential evaporation exceeds 1300 mm (1961–1990) [22]. The air relative humidity is low (37–45%). The average annual temperature in the UHB reaches 22 °C, with monthly minimum and maximum averages of 15°C (Jun–Jul) and 28°C (Jan–Dec), respectively [23].

3. Materials and methods

3.1. Sample collection

Two sampling surveys were conducted, one in August 2016 (winter) and a second one in February 2017 (summer). The sampling included rainwater, groundwater (spring and wells), and permanent streams (El Tigre, Chiquero, Tambillos, San Alberto and Uspallata creeks, and the Mendoza River). Due to the absence of inhabitants, the YHB has a small number of wells. Only 5 are registered in the area, built by private mining companies. A total of 69 samples were obtained. Surface water and groundwater samples were collected in 1 L plastic bottles and 250 mL high-density plastic bottles for chemical and isotope analysis, respectively. Electric conductivity (EC), temperature, and pH were measured *on site* using an Orion multiparameter probe. The 250 mL sample bottles were sealed with parafilm to prevent evaporation during shipping. Samples were transported to the laboratory, where they were stored at 4°C, and analysed within the week.

Precipitation samples were collected in both hydrological basins (YLIx and ULIx, Figure 1). The YHB sample collectors were deployed in three sites: one located on the western side (Cordillera Frontal), a second one placed in the centre of the basin (Yalguaraz

swamp), and a third one located on the eastern side (Precordillera). Similar criteria were applied in the UHB: one sample collector was deployed on the western side, two were located in the Uspallata oasis (middle and southern end), and the fourth was located on the eastern side. The UHB have two meteorological stations, and the sample collectors ULI1 and ULI2 were deployed within 1 km around them in order to obtain data of precipitation amount for weighted mean isotope values calculation. Precipitation data use in this study were provided by Subsecretaría de Recursos Hídricos (Sub-Secretary of Water Resources) [24].

Station ULI1 was deployed in November 2016. Remaining sample collections began in January 2018. At the end of the sample collection period (May 2018), a total of 10 precipitation samples were successfully collected for both hydrological system.

The precipitation collectors were made of a plastic container (volume ~ 3 L), fitted with a funnel (diameter 15 cm) having a plastic tube which extended up to the bottom of the container and a long narrow hose (length ~ 150 cm) attached at the top to avoid evaporation. The collection and monitoring of rainwater for isotope analysis were made following the International Atomic Energy Agency (IAEA) guidelines [25].

3.2. Chemical and isotope analyses

All the samples were analysed for major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , and NO_3^-) at the Universidad Nacional de Cuyo following standard methods [26]. The results were subjected to a quality control process that included the ion balance with a maximum acceptable error of 10% [27]. In this text, the ion charges will be omitted for simplification. The hydrochemical information was represented by conventional Piper and Stiff diagrams [28], using the Easyquim free software [29]. Piezometric maps were drawn using water level data from streams, springs, and wells.

The stable isotopes of the water molecule were measured at the IAEA lab (Vienna, Austria) using laser spectroscopy. The results were expressed as isotope deviations (δ) per thousand (‰) relative to the IAEA Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). The analytical errors were 0.1 and 0.5 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$, respectively. The interpretation of the stable isotope data was first performed using the conventional $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ graph combined with the Global Meteoric Water Line (GMWL) [30].

4. Results

4.1. Hydrochemical composition of the waters

The waters from the YHB showed low to medium EC values (167–970 and 166–694 $\mu\text{S cm}^{-1}$ for samples collected in winter 2016 and summer 2017, respectively). The upper values correspond, however, to samples modified by evaporation processes evidenced in the field, so they were not considered representative of the unmodified waters. The pH values of these samples were close to neutral (ca. 7.5), with some values affected by the presence of animal feces as guanacos, cows, etc. use the springs as watering holes (Table 1S).

The main chemical facies of the YHB waters is Ca-HCO_3 (Figure 2(a), left), with little seasonal variations. There are a number of samples with $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ and $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$

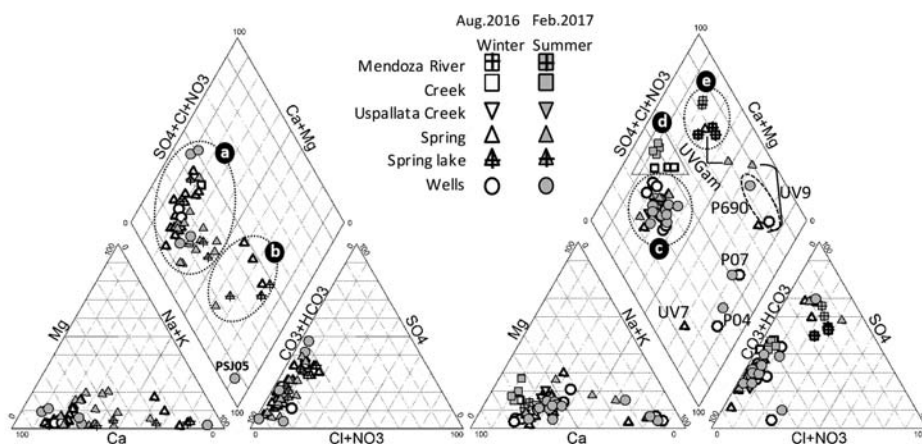


Figure 2. Piper diagram showing the chemical composition of the water samples from the YHB (left) and the UHB (right) valleys. Empty and filled symbols represent winter (Aug 2016) and summer (Feb 2017) campaigns, respectively. (a): main chemical facies of the YHB waters; (b): evaporated spring water; (c): springs and wells in the UHB; (d): permanent creeks in the UHB; (e): Mendoza River and UVGam spring in the UHB. The samples identified are commented in the text.

facies, and a small number of samples with a Na-HCO_3 typology (Figure 2(b), left). The last ones are from a zone of diffuse springs forming pools and ponds within the Yalguaraz swamp, which made the sampling process difficult. These samples might be affected by evaporation and by cation exchange in the sediments accumulated in the ponds, as will be discussed later. The sample PSJ05 (Figure 2, left) corresponds to a well located in the southwest sector of the study area. Its composition was not consistent with the rest of the waters in the basin (Table 1S) due to the presence of sodium tri-polyphosphate, used in the drilling fluid. For this reason, the chemical analysis was excluded in the present study.

The samples from the UHB showed slightly alkaline pH values (ca. 8) and EC values higher than those of the YHB (210–1840 and 206–1745 $\mu\text{S cm}^{-1}$ for samples collected in winter 2016 and summer 2017, respectively; Table 1S). Most of the samples were typified as Ca-HCO_3 , with little seasonal changes (Figure 2(c,d); right). However, there were some samples with different chemical facies: (i) samples of the UVGam spring (Precordillera; Figure 1) changed from Ca-SO_4 type in winter to Na-SO_4 type in summer, and those of the well P690 (east side of Uspallata Creek) and the spring UV9 (Precordillera; Figure 1) showed Na-SO_4 type waters in both stations; (ii) samples of the spring UV7 (eastern margin of Uspallata Creek) and the well P04 (western margin of the same creek) (Figure 1) were Na-HCO_3 ; and (iii) samples of the Mendoza River were Ca-SO_4 (Figure 2(e); right).

4.2. Isotopic composition of the YHB and the UHB waters

Figure 3 presents the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values of water samples collected in YHB and UHB. There is also shown the annual mean isotopic composition of the precipitation in the city of Mendoza (827 m a.s.l.) for the years 1983, 1984, 1986, 1987 and 1999 [31]; the

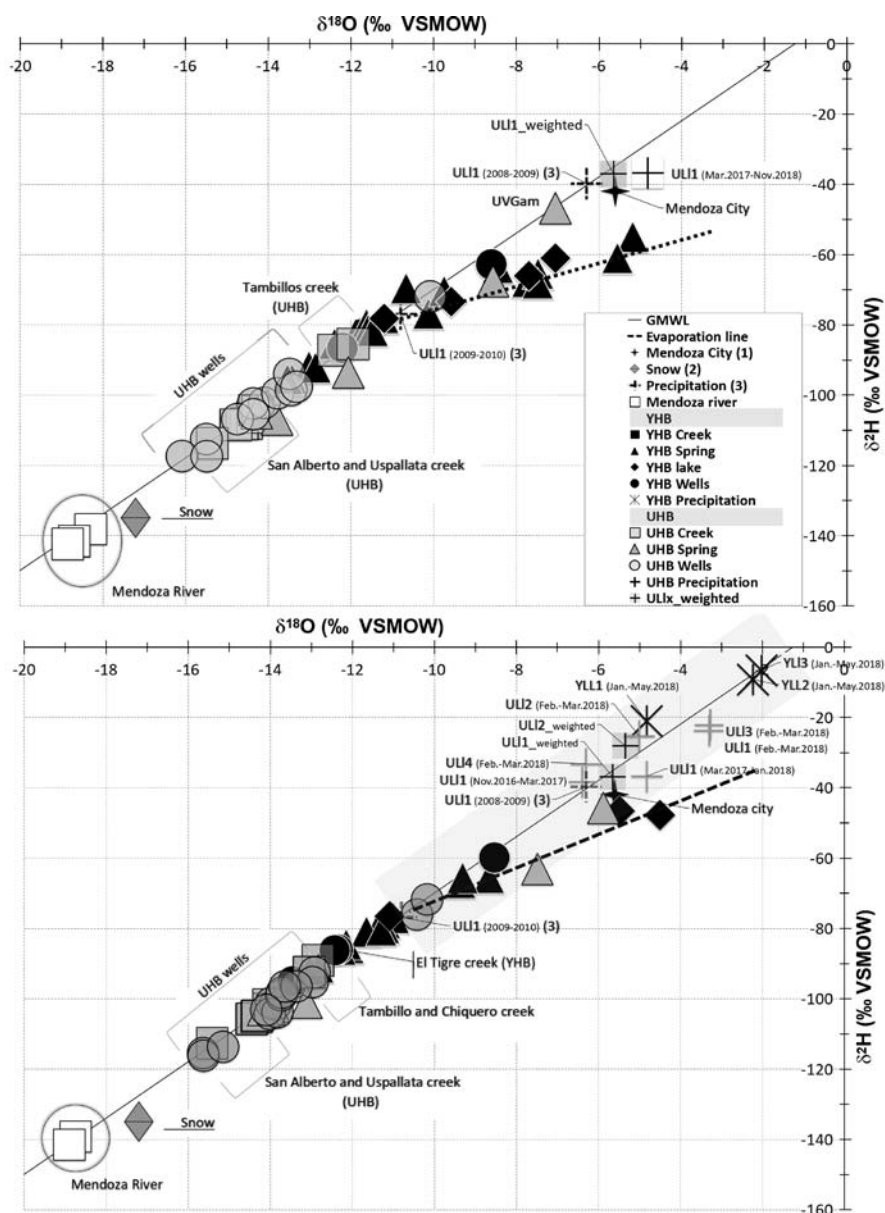


Figure 3. Stable isotope values for all the samples analysed in the YHB and the UHB, respectively, in the winter survey, Aug 2016 (above); and, the summer survey, Feb 2017 (below). The measured and weighted compositions of liquid precipitation in Mendoza city were also included. Both graphs also show the composition of the average precipitation in Mendoza city (1), from Dapeña [32], the composition of a snow sample from the Cordillera Frontal (2), from Sileo et al. [33], and the weighted mean isotope values of UHB precipitation (3), from Hoke et al. [3].

value of a snow sample from the Vallecitos River basin (Nov 2013, Cordillera Frontal, 3358 m a.s.l., south of the study area [32]); and the weighted mean isotope values for two sampling years (2008–2010) in the UHB [3]. They were included as references for the local samples.

All the samples plot near the GMWL. The isotope values varied from -19 to -6 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$, and from -140 to -40 ‰ for $\delta^2\text{H}$. Some water samples (e.g. springs and lake-springs) tend to plot below the meteoric water line, showing an evaporation effect. The samples of the Mendoza River were more depleted than those of the UHB, as expected from the higher altitude of the Mendoza River catchment upwards the Uspallata valley.

Almost the whole set of water samples from the YHB and the UHB showed an isotope variation between -16 and -8 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and an enrichment from south to north (Figure 3S), except for the samples of liquid precipitation. Although the waters showed wide ranges of isotopic composition, they were consistent with the altitudinal range present in the whole studied area (from 1750 to 5000 m a.s.l., approximately). On the other hand, there was no marked seasonal variation between the samples collected in the winter (Aug 2016) and summer (Feb 2017) periods (Figure 3).

The rainwater was isotopically more enriched than surface or groundwater samples. The isotope values varied from -19 to -6 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$, and from -140 to -40 ‰ for $\delta^2\text{H}$. The values of the weighted means of stable isotopes, which takes into account the amount of precipitation at each sampling period, were also plotted (ULlx weighted, Figure 3). Precipitation amount-weighted $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for UL11_weighted was similar to those reported by Hoke et al. [3], sampling year 2008–2009 and Dapeña [31] for Mendoza city (Table 1S and Figure 3).

5. Discussion

5.1. Origin of water in the Yalguaraz Hydrological Basin (YHB)

Rain water. At first sight, the isotopic composition of the precipitations collected in the basin were more enriched in heavy isotopes than the surface water samples of the Cordillera Frontal and the samples of wells and springs. This suggest a negligible contribution of local rainfall to groundwater recharge. However, the precipitation samples could be evaporated (Figure 3). Evaporation could occur during rainfall or in the sampling device, but due to the scarce data available this cannot be analysed. This subject deserves a detailed study in future works.

Surface waters. The western sector of the YHB allocates the highest areas of the basin and the main water recharge area. The El Tigre creek has a west–east direction in most of its course, but upon reaching its alluvial cone a runoff division takes place due to a topographic rise, and part of the flow heads northeast while another part heads south (Figure 2S). The alluvial cone of the El Tigre creek is constituted by Holocene sediments with coarse grain size (gravels and sands), and assumed to have high permeability [33], which favours infiltration. In the northeast channel, runoff infiltrates completely at $\sim 32^\circ 12'$ and $69^\circ 25'$ (2521 m a.s.l.), before reaching the Yalguaraz swamp. Although the stream reach may recede or advance depending on the hydrological year considered, there are no recent records confirming its surface drainage down to the bottom of the valley.

The chemistry of El Tigre samples shows a Ca-HCO_3 (Aug 2016) and $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ (Feb 2017) water type (YTIG1 in Figure 4) with low mineralization (EC of 267 and 238 $\mu\text{S cm}^{-1}$ in Aug 2016 and Feb 2017, respectively) and constant composition, reflecting the same source area. Their isotopic compositions were also similar and slightly more enriched



than other samples taken at lower heights in the basin (Figure 5(A)). This could reflect either some evaporation in the creek, or the discharge at lower elevation of groundwater recharged at greater heights.

The well PSJ01 is located close to the El Tigre creek sampling point at 50 m less elevation (Figure 2S). The only sample from this well (Feb 2017) showed the same chemical composition than El Tigre creek: both were $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ and have similar EC ($237\text{--}238\ \mu\text{S cm}^{-1}$) (Figure 4 and Table 1S). Moreover, both samples had very close isotopic compositions (Figure 5(A)). This suggest that either at the sampling zone the creek is infiltrating and the well is catching water infiltrated from the stream, or the creek has base flow of groundwater from the same source area than the flow lines caught by the well. The well is 73 m deep and the sample was taken at around 33.5 m depth. The alluvial cone of El Tigre creek is made up of highly permeable sediments [33] which favours infiltration, as mentioned previously. Field evidence of surface flow reduction would confirm stream infiltration and aquifer recharge. Additionally, although the small difference in isotopic composition between aquifer-creek is not significant, the lighter isotopic composition of the PSJ01 could mean a larger water volume.

The well PSJ05 is located at 240 m less elevation than the PSJ01. The only sample available is also from Feb 2017. Its composition is very different from that of PSJ01 well and the creek: it has Na-HCO₃ water (Figure 4), is much more mineralized (EC = 694 μS cm⁻¹;

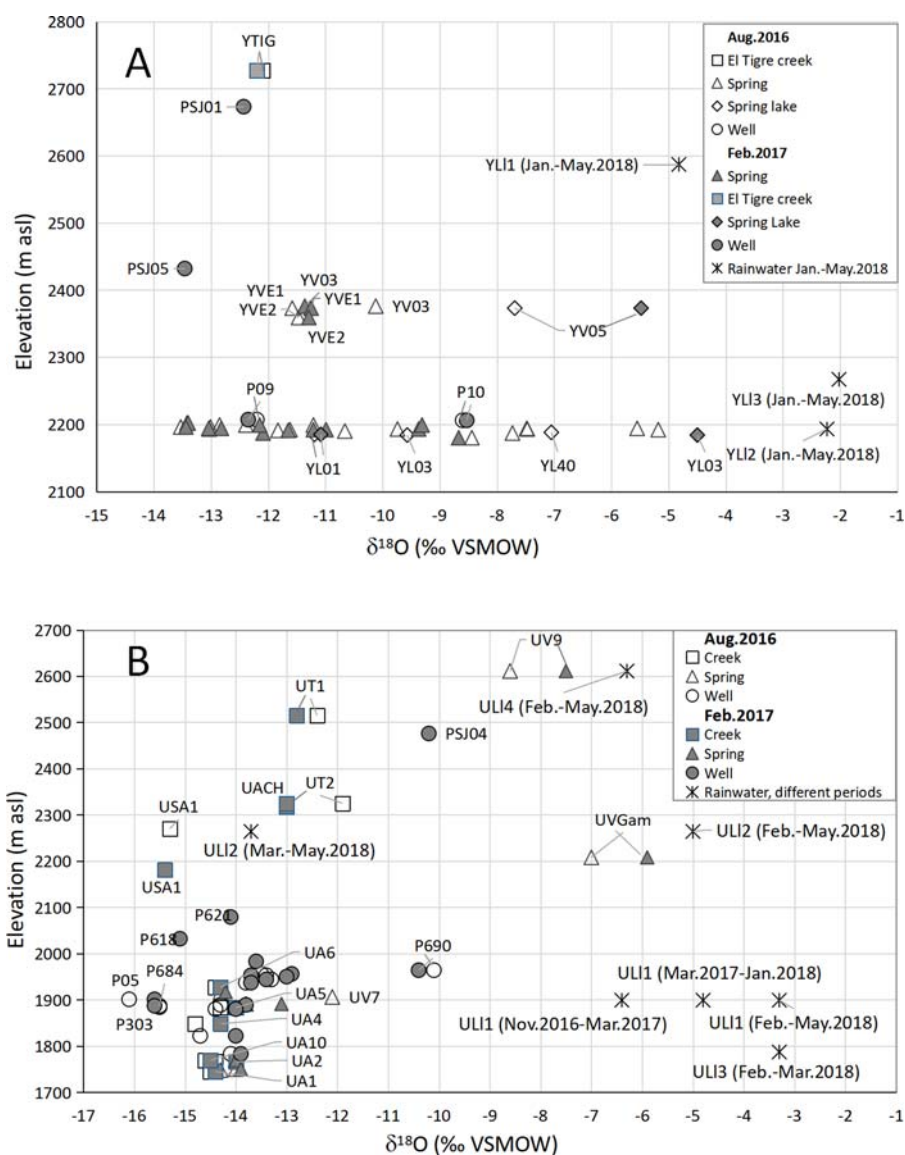


Figure 5. Isotope ($\delta^{18}\text{O}$) values of the water samples vs. elevation from (A) the YHB and (B) the UHB. The samples identified are mentioned in the text.

Table 1S), and is notably isotopically lighter (Figure 5(A)). The well is 160 m deep and the sample was taken at 124 m depth. The sample could represent chemically modified water by cation exchange inside the well due to evaporation and low natural renovation. Even if the sample was evaporated, its isotopic composition indicates that this well takes ground-water recharged at greater altitude than well PSJ01.

Wells P09 and P10 are close to each other (~10 m) and both are shallow (10 and 9.5 m depth, respectively). Both wells had very constant compositions in the two surveys. Although both presented Ca-HCO_3 type waters, the EC was higher in P10. This well has a larger diameter (1 m against 0.3 m in well P09) and it is not cased, thus behaving as

a pond, as indicated by its chemical and isotope values, concentrated by evaporation with respect to the other well.

Spring waters. Two springs are located in the western hillside of the basin (YVE1 and YVE2 in Figure 1) while the rest are in the swamp area. The Yalguaraz swamp is an optimal area for the generation of springs: it is a topographically depressed area that facilitates the concentration of groundwater flow lines from the surrounding high areas; furthermore, there is a structural control exerted by the Yalguaraz bedrock height and fault scarp (Yalguaraz height in Figure 1S). It acts as an obstacle for both surface and underground drainage, forcing the flow of groundwater from the Cordillera Frontal to emerge as springs. The circular shape of many springs suggests that groundwater flows upward vertically to the soil ground (Figure 4S). Although they are still to be quantified, springs generally constitute small flows that are evaporated by the high heliophany and low air humidity of the site, evidenced by the existence of salt deposits in the border of the springs (Figure 4S, a). In other cases, such as the springs YL01, YL03, YL40, and YV05, they form ponds that serve as watering holes for local fauna (Figure 4S, b).

The samples collected from springs were characterized by low EC (166–422 $\mu\text{S cm}^{-1}$; Table 1S) and neutral pH (ca. 7). The chemical typology of most of these samples was Ca-HCO_3 (Figure 4). The samples that did not fit into these generalities had a Na-HCO_3 or $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ type due to cation exchange, and were somewhat more mineralized and isotopically enriched due to evaporation (Figure 6). The isotopic composition of the hillside springs YVE1 and YVE2 was constant in the two surveys and consistent with the samples of the El Tigre Creek and the wells PSJ01 and PSJ05. In fact, the isotopic composition of all the spring samples is consistent with the heights of the Cordillera Frontal; thus, this cordillera has been assumed as the main recharge area of groundwater in the YHB. The isotopic composition of most of the lake-springs and circular-springs sampled twice showed evaporation-related changes between the two surveys, but some springs did not show changes (Figure 6). Any apparent spatial pattern was observed.

5.2. Origin of water in the Uspallata Hydrological Basin (UHB)

Rain water. The samples of liquid precipitation collected in the UHB showed a larger enrichment in heavy isotopes than samples from streams, springs and wells (Table 1S and Figure 3). Even though an isotopic depletion pattern with increasing elevation seems clear (Figure 5(B)), the fact that the samples correspond to different collecting periods prevents proposing robust hypothesis from them.

Hoke et al. [3] reported monthly isotopic composition values of precipitation samples that showed a wide variation range: -18.4 to -1.7 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$; and, -142.8 to -1.4 ‰ for $\delta^2\text{H}$ (Table 2S). The isotopic composition of the winter samples was lighter than that of the summer months. According to the authors, Uspallata basin represents an important boundary between the Pacific-sourced winter moisture and Atlantic-sourced summer moisture, as previously discussed. The isotope amplitude range between cold and warm seasons could be explained by the different origins of the atmospheric moisture.

The weighted isotope values obtained in the present work (ULIx_weighted, Figure 3 and Table 2S) and those reported by Hoke for the year 2008–2009 (ULI1_2008–2009) are similar to those registered in Mendoza city (east of the town of Uspallata, [31]).

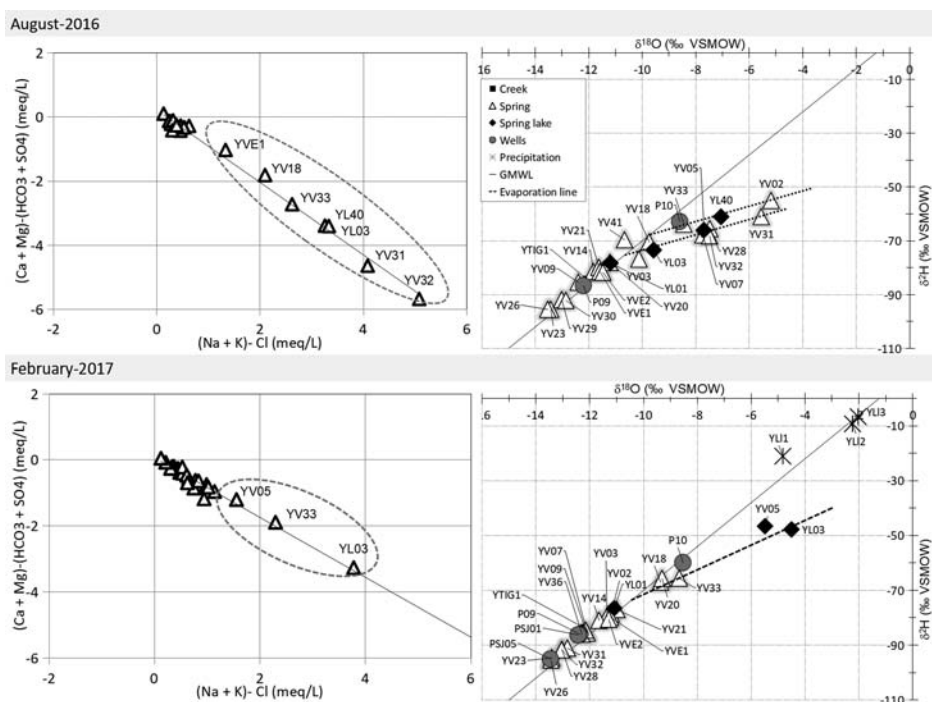


Figure 6. Left: Scatter plot of $([Ca] + [Mg]) - ([SO_4] + [HCO_3])$ vs. $([Na] + [K]) - Cl$ (meq/L) in spring samples of the Yalguaraz Hydrological Basin in the two sampling surveys. Right: Isotopic composition of water samples from the same basin and dates.

However, the weighted means change according to the hydrological year considered, as can be observed for the sampling year 2009–2010 (ULI1_2009–2010, [3]).

In general, as discussed for the Yalguaraz basin, little influence of the liquid precipitation is observed in most of the waters sampled in the UHB (Figure 5(B)). It seems clear that the main water source has an isotopically lighter composition than those reported for samples that would have a greater contribution of local precipitation (UVGam and UV9). This highlights the Cordillera Frontal as the main recharge area of the UHB.

Surface water. The permanent drainage network in the UHB comes from the western sector of the valley. In the eastern side, the water courses are temporary and active only during periods of intense rainfall. Thus, the permanent snow cover of the Cordillera Frontal originates the streams present in the study area, which have low mineralization ($EC = 215\text{--}329 \mu S cm^{-1}$). An increase of EC in the stream water was observed in the southern sector of the valley, close to its discharge into the Mendoza River, with EC reaching $1120 \mu S cm^{-1}$. This is related to the anthropic activities carried out in the valley, mainly due to the returns of the agricultural irrigation system.

In the San Alberto, Tambillos, and Chiquero creeks, to the NW of the UHB, the water has a $Ca\text{-}HCO_3\text{-}SO_4$ chemical type (Figure 7). Other studies carried out in the sub-basin of San Alberto creek indicated that in dry hydrological years (e.g. 2017), when the average annual rainfall is lower than the historical average (2005–2018 series, [34]), SO_4 prevails over HCO_3 , while in wet hydrological years the proportions of SO_4 and

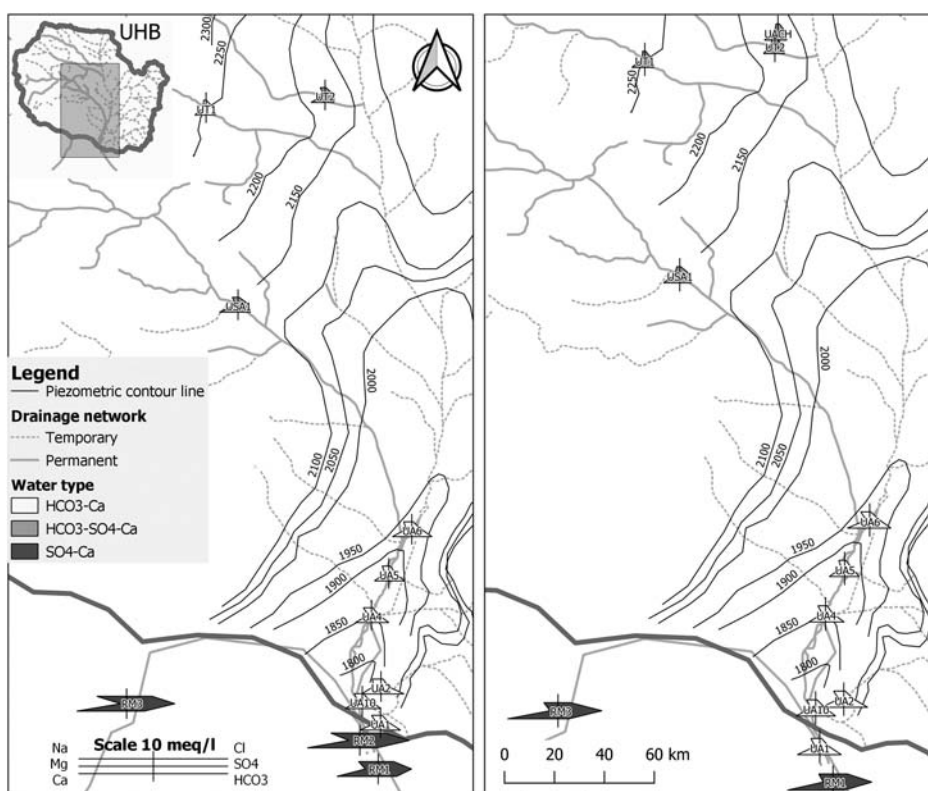


Figure 7. Stiff diagrams of the surface water samples and chemical types in the UHB in Aug 2016 (left) and Feb 2017 (right).

HCO_3 are close to 50%. Sulphate is assumed to represent the influence of lithology on water chemistry, while bicarbonate is assumed to represent the influence of solid precipitation [35].

Despite the composition of the subsidiary streams of the Uspallata Creek, this one presented a Ca-HCO_3 typology, which is assumed to be due to the underground contribution received by the main stream of the valley, which has been corroborated through water flow and measurements of ^{222}Rn activity [35].

Quite differently, the ionic concentrations measured in the Mendoza river waters were two to three times higher than those in the Uspallata creek; the Ca-SO_4 typology of the former is consistent with the existence of Tertiary formations containing gypsum and anhydrite in the river basin.

The isotopic compositions of the surface water samples in the UHB ranged from -15.4 to -11.9 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$, and from -113.8 to -85.4 ‰ for $\delta^2\text{H}$ (Table 1S). Within this range, the waters of San Alberto Creek (USAx in Figure 5(B)) were isotopically more depleted than those from the Tambillos and Chiquero creeks (UTx and UACH in Figure 5(B)). Considering the drainage basin areas and the hypsometric curves (Table 3S and Figure 5S), the San Alberto sub-basin catchment area is located at higher altitudes than those of Tambillos and Chiquero. Therefore an altitudinal effect is observed in the isotopic composition of their waters. The isotope values of the Uspallata Creek samples (UAX in Figure 5(B))

correspond to mixtures of water from these sub-basins, maintaining a relative stable composition along its course until its discharge into the Mendoza River.

Well water. Most of the wells (75%) sampled in the Uspallata basin are located in the western part of the valley. Those wells had low mineralization and Ca-HCO₃ waters; and, according to the piezometric map show in Figure 8, they catch groundwater coming from the Cordillera Frontal to the W. A few wells located to the NE of the UHB had more mineralized water with either Na-SO₄ (P690) or Na-HCO₃ (P04 and P07) water types (Figure 8). According to the piezometric map, those wells have water contributions from the Precordillera to the E. Thus, a clear difference in terms of chemical typology was observed between the samples coming from one or another side of the valley and mountain range.

Regarding the mineralization of groundwater in the UHB, a general increase of ionic concentrations was observed from north to south. The lithology of the sediments in the alluvial intermountain Uspallata valley consists of Psephite and Psammite rocks, mostly unconsolidated and therefore very permeable. These sediments allow rapid and effective water infiltration from surface water courses [9]. As described for surface water, the highest EC values were detected in the southern part of the valley, with values of 944 and 1017 $\mu\text{S cm}^{-1}$ for the shallow wells P01 and P02, respectively (Table 1S and Figure 8). The increase in ionic concentrations (e.g. Cl⁻ and NO₃⁻) holds an environmental negative connotation, since anthropogenic activities developed in the valley are decreasing water quality in both superficial and groundwater systems.

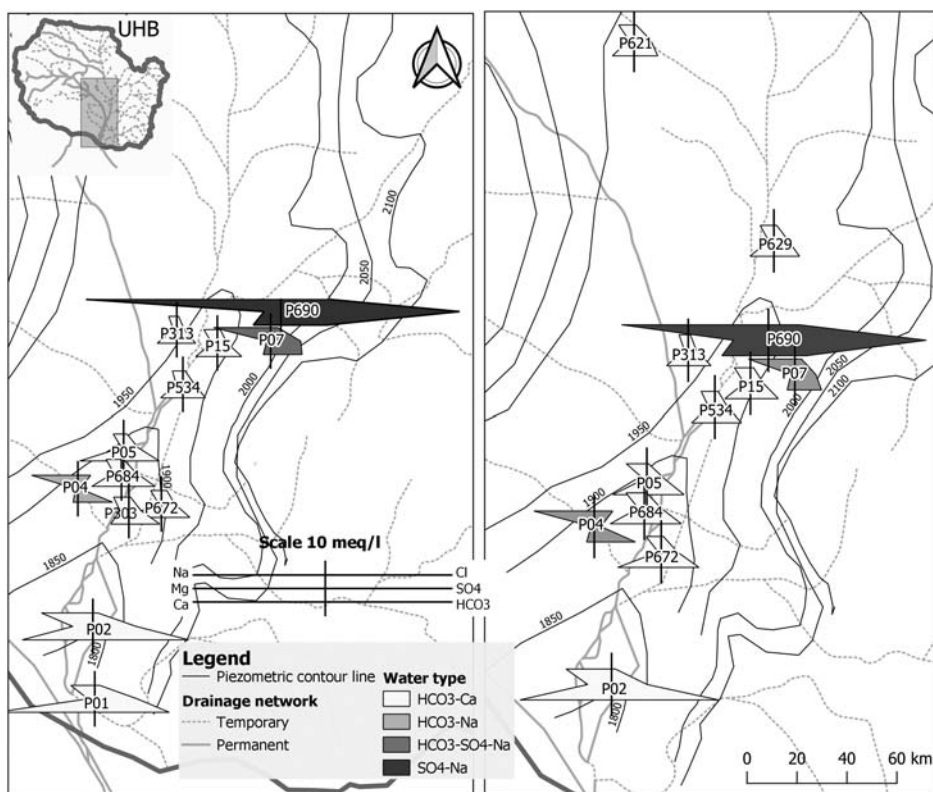


Figure 8. Groundwater chemical types in the UHB in Aug 2016 (left) and Feb 2017 (right).

The isotopic compositions of well samples were in the range of -16.1 to -10.1 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -117.5 to -72 ‰ for $\delta^2\text{H}$. Figure 9 shows the rough existence of three groups of samples that define a mixing-like pattern:

- There is a group of samples significantly more depleted than the rest ($\delta^{18}\text{O} = -16.1$ to -15 ‰). They are from the wells P05 (54 m), P618 (29 m), P684 (26 m), and P303 (70 m) (Figure 9, left). These values suggest higher recharge heights and, consequently, deeper flows discharging to the Quaternary filling probably through the diastatic, cracking and fracture network of the mountain range [9].
- There is another group of samples significantly more enriched than the rest but apparently showing little evaporation ($\delta^{18}\text{O} = -11$ to -10 ‰). They are from the wells P690 and PSJ04. The well PSJ04 is located to the NW of the UHB, close to the Yalguaraz basin. Its height and isotopic composition are consistent with those of the Tambillos Creek (samples UT1 and UT2; Figure 7), that generates in the Cordillera Frontal to the W. The well P690 is located in the NE part of the valley, in an area where groundwater comes from the Precordillera. Its chemical facies is different to the others (Na- SO_4 typology) and its isotopic composition confirms that the eastern sector of the valley has

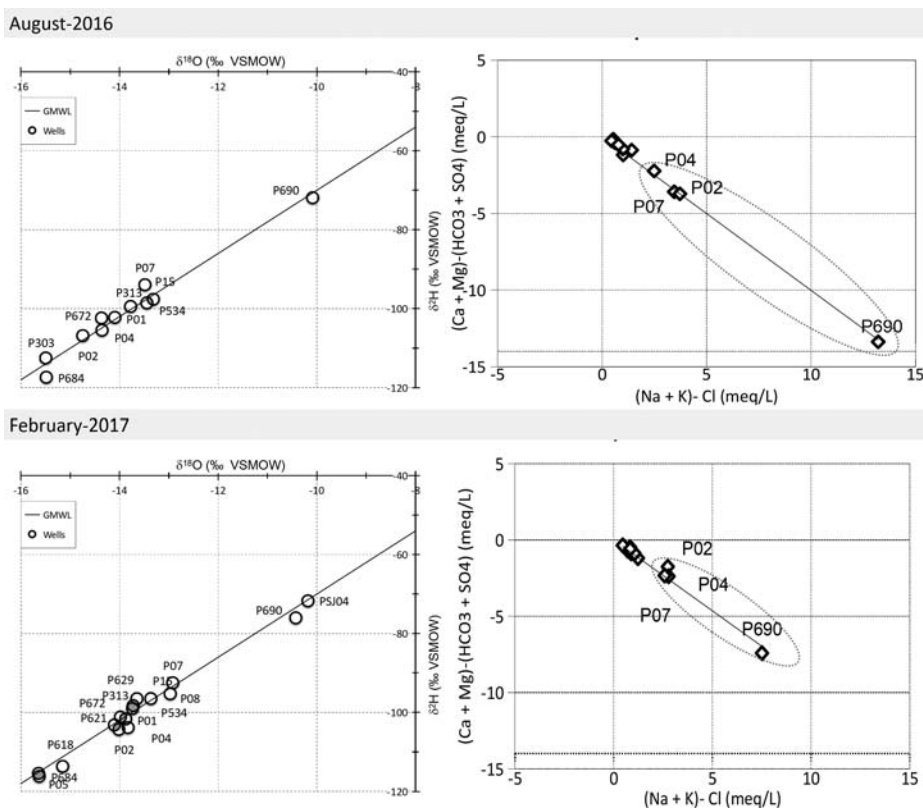


Figure 9. Left: Isotopic composition of groundwater of the UHB in the two sampling surveys performed. Right: Scatter plot of $([\text{Ca}] + [\text{Mg}] - [\text{SO}_4] - [\text{HCO}_3])$ vs. $([\text{Na}] + [\text{K}] - [\text{Cl}])$ (meq/L) for the same dates.

groundwater recharged at lower heights than the western sector, which means greater contribution from liquid precipitation than from snow.

- Most of the rest of the samples seem to be mixtures of the two previous groups, but with a chemical and isotopic composition approaching the waters coming from the Cordillera Frontal to the W (Figures 8 and 9 left).

Concerning the chemical facies of well P690, it is important to note that in the area there are no geological formations containing gypsum. However, in the surrounding area there are polymetallic sulphides [36] belonging to the Paramillos de Uspallata mining district, which is also formed by disseminated deposits (Paramillos Norte, Paramillos Centro, Paramillos Sur, and Cerro Canario) and an epithermal deposit (Oro del Sur) [37]. Given the magnitude of the mining district, it is likely that the SO_4 ion present in the groundwater is a result of the oxidation of sulfides. With respect to the origin of Na, cation exchange was confirmed in Figure 9 (right), where a large excess of Na was observed with respect to Cl in parallel to a deficit of Ca plus Mg with respect to HCO_3 plus SO_4 .

Springs. The samples of the springs showed a Ca-HCO_3 typology. Waters from the eastern sector of the valley differed from this generality and were characterized by higher levels of solutes and a Na-SO_4 typology. Regarding the chemical composition, all the spring samples showed an excess of Na with respect to Cl in both sampling campaigns, suggesting additional sources of this element other than the atmospheric contribution. The water samples belonging to the UV9, UVGam, and UV7 springs reflected more intense modifications by cation exchange process (Figure 10(A)). Moreover, in the piezometric map it can be observed that the well P690 is located downstream of the spring UVGam, so in principle it can be inferred that both have the same catchment area in the Precordillera.

Within these springs of the eastern sector, the UVGam and the UV9 had an isotopic composition similar to rainfall collected in the valley (Figure 10(B)), indicating that recharge of local precipitation is the main water source. This is consistent with the information provided by the chemical composition and the hydrodynamic location of both springs. Also, the samples of both springs were isotopically enriched by evaporation (Figure 10(B)).

5.3. Recharge heights

The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values of meteoric water vary with elevation, providing a means to deduce the height of the recharge area for groundwater collected in areas of stepped recharge areas. Although the technique may present errors in the $\delta^{18}\text{O}$ elevation gradient due to evaporation effects in surface water, sublimation of snow, changes in moisture transport routes related to climatic variations and/or changes in the initial isotopic composition of air masses, it is a useful tool to explore the spatiotemporal evolution of the topographic origin of groundwater and surface water in streams of mountain ranges.

In the Uspallata Valley, a preliminary isotope ($\delta^{18}\text{O}$) gradient of precipitation with altitude was calculated aiming to identify the main recharge heights of the hydrological system. Two gradients were established, a western slope gradient and an eastern one,

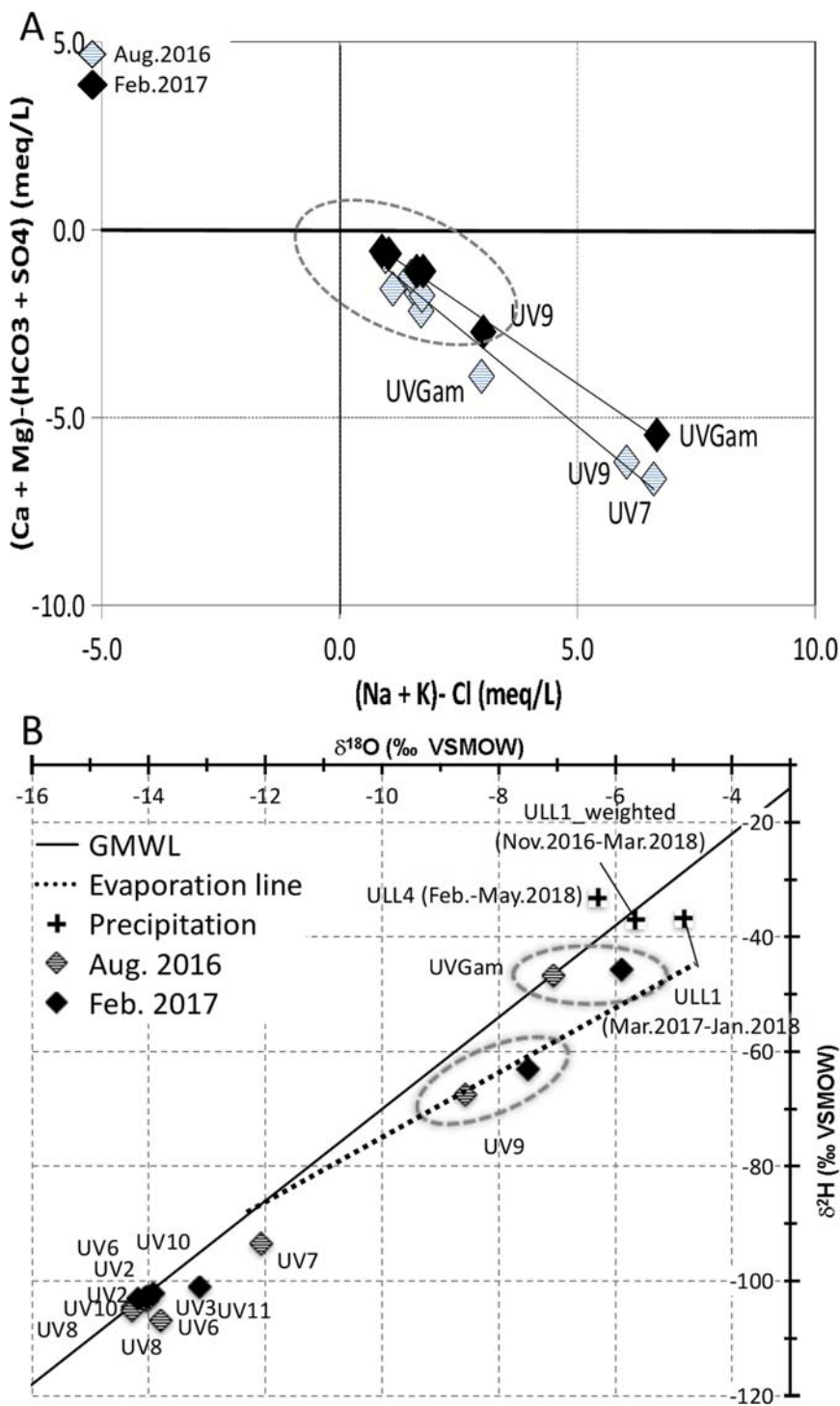


Figure 10. (A) Scatter plot of $([Ca] + [Mg]) - ([SO_4] + [HCO_3])$ vs. $([Na] + [K]) - [Cl]$. (B) Isotopic composition of springs of the UHB.

using the data from the precipitation stations located in the centre of the valley (ULI1), in the western Cordillera Frontal (ULI2), and in the eastern Precordillera (ULI4, Figure 1). They were estimated using the isotopic data available from the same sampling period (Feb–Mar 2018) and the altitude of the considered stations. Quite similar gradients were obtained for both margins of the valley, being $-0.5\text{‰}/100\text{ m}$ for the western slope and $-0.4\text{‰}/100\text{ m}$ for the eastern one. These gradients are comparable to those reported by Hoke et al. [38] for the upper Mendoza River basin, which was $-0.48\text{‰}/100\text{ m}$. Although the gradients reported in this paper were obtained using only the isotopic composition of summer precipitation (which may be influenced by the Atlantic convective storms), similar gradients were reported by Hoke et al. [38] for storms coming from the E and the W. Following these authors, the latter suggests that the origin of the moisture sources (Atlantic or Pacific) may have a minor effect on the $\delta^{18}\text{O}$ evolution with height, as is observed in Figure 5(B).

The gradients calculated for the UHB were extrapolated to higher heights, thus obtaining preliminary theoretical isotope functions for the whole area (Figure 11). The $\delta^{18}\text{O}$ compositions of surface water and groundwater samples from the valley were also plotted in the graph and an estimated recharge height was calculated for each of them (Table 4S). These heights were between ~ 2500 and 3580 m a.s.l. in the eastern sector of the valley, and between ~ 3900 and 4500 m a.s.l. in the western sector. It is important to mention that at these altitudes not only glaciers are registered, but also the permafrost, with a lower limit estimated at around 3600 m a.s.l. [16].

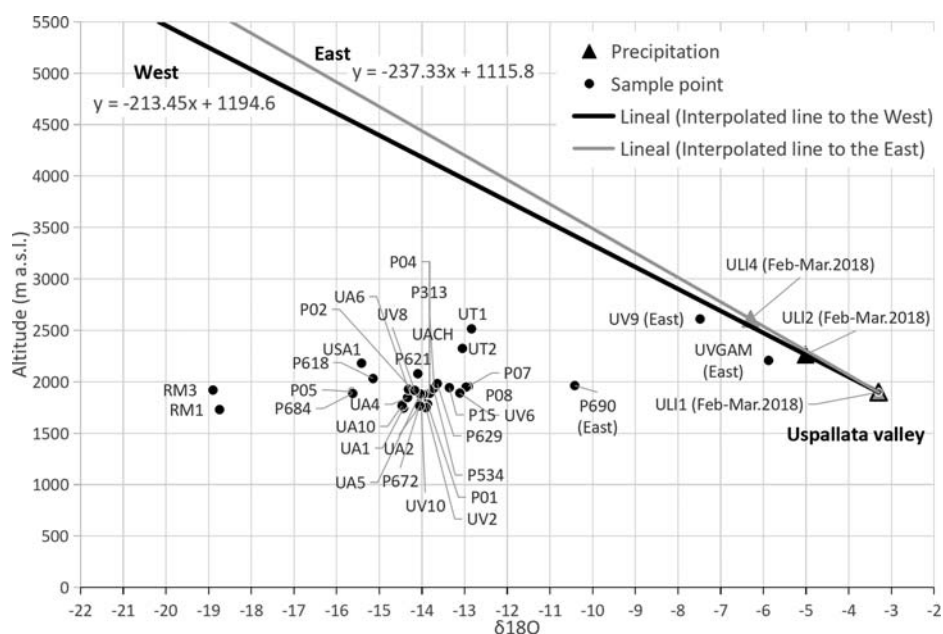


Figure 11. Tentative $\delta^{18}\text{O}$ altitude gradient in the western (black line) and eastern (grey line) sectors of the Uspallata Valley established using data from liquid precipitation collected in the Uspallata Valley in the summer of 2018 (Feb–Mar). Also shown are the isotope values of the surface water (UA, USA, UT, UACH) and groundwater (P, UV; UGAM) samples taken in the valley. The intercept point of the $\delta^{18}\text{O}$ value of water samples on the negative trend line represents the derived altitude value for possible recharge heights.

Furthermore, no marked seasonal variation was observed between the samples collected in the winter and summer period (Figure 3), although this should be supported with a long data series. These observations lead to the following hypothesis: (i) the main water sources supplying both the surface and the underground systems must come from sources whose isotopic composition is homogeneous all along the year, such as ice bodies (e.g. rock glaciers, clean-ice glacier, debris-covered glacier, etc.). This allows to state that both in the UHB and in the YHB the recharge of the system occurs mainly in the western sector of the valley and at great heights, where the existence of glaciers and permafrost are confirmed. The presence of permanent streams in the western sector and their similar isotopic composition with the groundwater samples (wells and springs) confirm this observation. (ii) Little influence of liquid precipitation is evidenced in the recharge to the system. Its influence can only be observed in a small number of samples (e.g. P690, UV9, and UVGam) that receive groundwater flows from the eastern slope of the valley (Precordillera) and that showed an isotopically enriched composition (-10.4 to -5.9 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$), similar to the precipitation samples collected in the Uspallata Valley (ULI1 and ULI3) and eastern area (ULI4 in Table 1S), as discussed previously.

6. Conclusions

In this study, hydrochemical and isotope techniques were applied to characterize and identify the sources of surface water and groundwater in two intermountain valleys in the Andes range, the Yalguaraz basin to the N and the Uspallata basin to the S. For the Yalguaraz basin, this study constitutes the first chemical and isotope report on its waters. A low chemical mineralization and a Ca-HCO_3 type characterized waters of both hydrological systems. This chemical facie represents waters mainly coming from the Cordillera Frontal to the W. Regarding the stable isotope composition of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$, the rain waters showed a higher isotope enrichment than samples from streams, springs and wells waters. Among them, wide ranges of variation were reported according to the sampling period, and a temporal enrichment of heavy isotopes was observed during the summer period. Furthermore, the isotopic compositions of groundwater (spring and wells) and permanent streams indicate little seasonal variation, which confirms that the main source of aquifer recharge does not come from rainwater, but from more isotopically stable composition sources, such as glaciers and other ice bodies. These sources are located at recharge heights above 3900 m a.s.l. which emphasized the importance of the Cordillera Frontal as the main recharge zone of the basins. In arid environments, knowing the origin of water and the sources of recharge is fundamental to improve monitoring networks and the prediction of resource availability, for example through remote sensing measurements of glaciers, snow coverage, and pollution control. Especially for the Uspallata basin the design of monitoring networks should serve to monitor possible changes and undesired trends in the quantity and quality of the water in the aquifer.

Acknowledgements

The authors thank to General Department of Irrigation staff for technical assistance and collaboration on fieldwork, and Leandro Alvarez (IANIGLA), Guillermo Corona, and Pablo Gonzalez for map supports on mountains inventory.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Funding

This work was supported by International Atomic Energy Agency (IAEA, ARG 7/008), Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT PICT-2016-1590), and Secretaria de Ciencia, Técnica y Postgrado, UNCuyo (SeCTyP B045).

ORCID

Nerina Belén Lana  <http://orcid.org/0000-0002-4114-4495>

Daniel Cicerone  <http://orcid.org/0000-0003-2725-8573>

Marisol Manzano  <http://orcid.org/0000-0001-9732-6549>

References

- [1] Tapia Baldis C, Trombotto Liaudat D, Ahumada A. Ambiente periglacial y regiones geocriológicas en los Andes de San Juan (28°–33°S) [Periglacial environment and geocryological regions in the San Juan Andes (28°–33°S)]. *Rev Asoc Geol Argent.* 2019;76(1):46–63. Spanish.
- [2] Servicio Meteorológico Nacional [Internet]. Argentina: Estadísticas Climatológicas 2001/2010. Fuerza Aérea Argentina. Comando de Regiones Aéreas. Buenos Aires, Argentina; 2018. Spanish. Available from: <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>
- [3] Hoke GD, Aranibar JN, Viale M, et al. Seasonal moisture sources and the isotopic composition of precipitation, rivers, and carbonates across the Andes at 32.5–35.5°S. *Geochem Geophys Geosyst.* 2013;14:962–978.
- [4] Morton N. In the footsteps of Charles Darwin in South America. *Geol Today.* 1995;11(5):190–195.
- [5] Sironi O. Mining ways of life in the southern Andes: historical anthropological archaeology in Mendoza, Argentina. *Int J Histor Archaeol.* 2019;23:153–171.
- [6] Vaca A. Descripción del mapa hidrogeológico preliminar del Valle de Uspallata. Informe interno D-166. INA-CRAS; 1985. Spanish.
- [7] INA-CRAS (Instituto Nacional del Agua-Centro Regional de Agua Subterránea). Aspectos hidrológicos e hidroquímicos del Valle de Uspallata; 1988. Spanish.
- [8] Hernández J, Alvarez A. Aspectos hidrológicos e hidroquímicos del Valle de Uspallata. Informe DI-237 Mendoza; 1994. Spanish.
- [9] FUNC (Fundación Universidad Nacional de Cuyo). Estudio de la regulación del Río Mendoza en Uspallata. Informe final. Mendoza, Argentina: Convenio UNC-IPE; 1994. Spanish.
- [10] DGI (Departamento General de Irrigación). Análisis fisicoquímicos Valle de Uspallata. Internal Report; 2009. Spanish.
- [11] Lana B, Rovira S, Gómez ML, et al. Análisis hidroquímico de las aguas superficiales y subterránea del valle de Uspallata-Mendoza (1970–2015)). Poster session presented at: XX Congreso Geológico Argentino; 2017 Aug 7–11; Tucumán, Argentina. Spanish
- [12] Ibañez S, Lana B, Manzano M, et al. Preliminary study of water origin in the Uspallata valley and its contribution to the Mendoza river with isotopic and hydrochemical techniques. *Bol Geol Min.* In press.
- [13] Terrizzano CM, Fazzito SY, Cortés JM, et al. Electrical resistivity tomography applied to the study of neotectonic structures, northwestern Precordillera Sur, Central Andes of Argentina. *J South Am Earth Sci.* 2012;34:47–60.
- [14] Caminos R. Cordillera Frontal en Geología Regional Argentina, Vol I. Córdoba, Argentina: Academia Nacional de Ciencias; 1979. Spanish.

- [15] Cortés JM, González Bonorino G, Koukharsky M, et al. Hoja Geológica 3369-09 Uspallata, Provincia de Mendoza. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:100.000. Buenos Aires, Subsecretaría de Minería de la Nación. Servicio Geológico Minero Argentino; 1997. (Boletín; 280). Spanish.
- [16] Trombotto Liaudat D, Lenzano M, Castro M. Inventory and monitoring of cryoforms and cryogenic processes in the Central Andes of Mendoza, Argentina: birth and extinction of a periglacial lake). Proceedings 10th International Conference on Permafrost; Salekhard, Russia; 2012. p. 419–424.
- [17] IANIGLA-ING. Informe de la subcuenca de la cordillera Ansilta. Cuenca del río San Juan. Inventario Nacional de Glaciares. Mendoza: Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET); 2018; Spanish.
- [18] Water Management Consultants. Balance Hídrico, proyecto San Jorge- 3638/R1. Mendoza, Argentina; 2008. Spanish.
- [19] IANIGLA-ING. Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares. Inventario Nacional de Glaciares. Mendoza: Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET); 2014; Spanish.
- [20] IANIGLA-ING. Informe de las subcuencas del arroyo Uspallata y del sector Cordillera del Tigre. Cuenca del río Mendoza. Inventario Nacional de Glaciares. Mendoza: Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET); 2018. Spanish.
- [21] Mapa climatológico de Mendoza. [Internet]. Junta de Andalucía; Gobierno y Universidades de la Región Andina Argentina. Inventario de Recursos de la Region Andina Argentina. Sistema Físico Ambiental de Cuyo, Mendoza. Spanish. Available from: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/g0401.htm>.
- [22] Salomón M, Soria N, Fernández R, et al. Evaluación de degradación de tierras en zonas áridas: sitio piloto Mendoza, Departamento de Lavalle. Informe Técnico. LADyOT – IADIZA – CRICYT. Mendoza, Argentina; 2005; Spanish.
- [23] Segal H. Meteorologic of Uspallata Valle, Mendoza, Argentina: Departamento General de Irrigacion. Technical report. Unpublished.
- [24] Secretaria de Recursos Hídricos [Internet]. Argentina: Sistema Nacional de Información Hídrica, edited by Servicio de Recursos Hídricos, Secretaría de Obras Públicas. Spanish. Available from: <http://www.snih.hidricosargentina.gob.ar>.
- [25] International Atomic Energy Agency/Global Network of Isotopes in Precipitation [Internet]. Austria: Precipitation Sampling Guide (V2.02); 2014. Available from: http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_en_hq.pdf.
- [26] APHA/AWWA/WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st ed. Washington (DC): American Public Health Association/American Water Works Association/ Water Environment Federation; 2005.
- [27] Custodio E, Llamas MR. Hidrología subterránea [Groundwater hydrology]. Barcelona: Omega; 1983. Spanish.
- [28] Hem JD. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Washington (DC): United States Geological Survey; 1992 (USGS Water Supply paper; 2254).
- [29] Vázquez-Suñé E, Serrano-Juan A. Easy_Quim. V.5.0. Software para el cálculo de los balances químicos en análisis de agua y su representación gráfica. Grupo de Hidrología Subterránea (GHS, UPC - CSIC) (<http://h2ogeo.upc.edu/es/investigacion-hidrologia-subterranea/software/42-easy-quim>); 2012. Spanish.
- [30] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. Science. 1961;133(3465):1702–1703.
- [31] Dapeña C. Isótopos ambientales livianos: Su aplicación en hidrología e hidrogeología [doctoral thesis]. Universidad de Buenos Aires; 2007. Spanish.
- [32] Sileo N, Trombotto D, Dapeña C. Estudios preliminares del agua, nieve y hielo en la cuenca del río Vallecitos, Mendoza, Argentina. Acta Geol Lilloana. 2015;27:130–145. Spanish.
- [33] Cortés JM, González Bonorino G, Koukharsky M, et al. Hoja Geológica 3369-03 Yalguaraz, Provincias de San Juan y Mendoza. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:100.000. Buenos Aires, Subsecretaría de Minería de la Nación. Servicio Geológico Minero Argentino. 1997. (Boletín; 280). Spanish.

- [34] Departamento General de Irrigación. Mendoza: Boletín de Información Hidronivometeorológica. 2018. Spanish. Available from: <http://www.irrigacion.gov.ar/dgi/es/publications/bolet%C3%ADn-hidronivometeorol%C3%B3gico>.
- [35] Lana N, Ibañez S, Rodríguez S, et al. Identificación de la relación agua superficial-agua subterránea en el arroyo San Alberto, Mendoza, Argentina, mediante la técnica de radon-222). Poster session presented at: XIV Congreso Latinoamericano De Hidrogeología; X Congreso Argentino De Hidrogeología; 2018 Oct 23–26; Argentina. Spanish.
- [36] Carrasquero S, Rubinstein N, Belvins R. Paragénesis mineral de la Veta Tajo, Paramillos de Uspallata, Mendoza, Argentina [Mineral paragenesis of the Tajo vein, Paramillos de Uspallata, Mendoza, Argentina]. Acta Geol Lilloana. 2013;25:3–8. Spanish.
- [37] Carrasquero S. Caracterización petrológica y geoquímica del volcanismo Terciario en la región de Uspallata y su relación con las mineralizaciones hidrotermales del distrito minero Paramillos de Uspallata, Mendoza, Argentina. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata; 2015. Spanish.
- [38] Hoke GD, Garzione CN, Araneo DC, et al. The stable isotope altimeter: do quaternary pedogenic carbonates predict modern elevations? Geology. 2009;37(11):1015–1018.



Gobierno de la Provincia de Mendoza
República Argentina

Hoja Adicional de Firmas
Anexo

Número:

Mendoza,

Referencia: Modelo Hidrológico

El documento fue importado por el sistema GEDO con un total de 49 pagina/s.