

Estudios preliminares del agua, nieve y hielo en la cuenca del río Vallecitos, Mendoza, Argentina

Sileo, N.¹; Trombotto Liaudat, D.²; Dapeña, C.³

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica, G.A.S.N.yA., P.N.G.R.R., Investigación y Tecnología, Av. del Libertador 8250, CP. 1429, CABA, Argentina. noe_sileo@hotmail.com

² IANIGLA-CCT CONICET Mendoza, Casilla de Correo 330, 5500 Mendoza, Argentina.

³ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS, CONICET-UBA), Pabellón. INGEIS, Ciudad Universitaria, Intendente Güiraldes 2160, 1428 CABA, Argentina.

► **Resumen** — La zona de estudio se ubica entre los meridianos 69°19' y 69°26' W y los paralelos 32° 55' y 32° 59' S, en el Cordón del Plata, Cordillera Frontal, Mendoza, Argentina. El Cordón del Plata alcanza alturas de 6000 m snm aproximadamente, algunos de ellos comprendidos en la zona de trabajo. La cuenca del río Vallecitos, subcuenca afluente a la del río Blanco, se encuentra a alturas que varían desde 2.200 m en su punto más bajo, hasta los 5.500 m snm en la cumbre del Cerro Vallecitos. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar aguas de diversas proveniencias y diferentes composiciones hidrogeoquímicas de un ambiente criogénico típico como es la cuenca del río Vallecitos con glaciares cubiertos y descubiertos, glaciares de escombros, permafrost *in situ* y manchones de nieve temporarios y permanentes. Se pretende conocer también la dinámica del agua dentro del sistema criogénico, en particular en relación a un glaciar de escombros, para determinar potenciales reservorios de agua dulce, para ser utilizados por la población local, o su trayecto subterráneo. Se ha implementado una red de muestreo de aguas superficiales cuyos puntos principales corresponden a manantiales, arroyos y al río Vallecitos, conjuntamente con puntos de muestreo de manchones de nieve estacionales y hielo. Se ha instalado también un colector de precipitaciones líquidas el cual se muestrea por eventos para la construcción de una recta meteórica local.

Palabras clave: Hielo, agua, nieve, criohidroquímica, hidrología isotópica, glaciares de escombros.

► **Abstract** — "Preliminary studies of water, snow and ice in the Vallecitos river basin, Mendoza, Argentina". The study area is located between 69° 19' and 69° 26' W and 32° 55' and 32° 59' S, in the Cordon del Plata mountains, Cordillera Frontal, Mendoza, Argentina. The highest peaks in this region, reach heights of approximately 6000 m above sea level, some of them included in the study area. Vallecitos River sub- basin, a tributary of the White River basin, lies at altitudes ranging from 2,200 m at its lowest point, to almost 5,500 meters at the summit of Cerro Vallecitos. This paper details the beginning of the project «Study of the hydro-geochemical behavior of groundwater and surface water related to glaciers, covered glaciers and rock glaciers in the Vallecitos River basin, Front Range, Mendoza», which aims to characterize different water origins and the hydrogeochemical composition of a typical cryogenic environment as Vallecitos River basin, with covered and uncovered glaciers, rock glaciers, *in situ* permafrost and patches of temporary and permanent snow. It also seeks to understand the dynamics of water within the cryogenic system, in particular inside rock glaciers, to determine potential reservoirs of fresh water for the local population. A network of surface water sampling has been implemented where the main points correspond to springs, streams and Vallecitos River, together with sampling points for seasonal snow patches and ice. Moreover a rain collector sampled by events has been installed, to construct a local meteoric water line. The first results reveal several differences between the three main sub- basins that make up the Vallecitos River basin. Different water sources and circulation patterns can be identified which are reflected in the hydrogeochemical and isotopic results.

Keywords: Ice, water, snow, cryohydrochemistry, isotopic hydrology, rock glaciers.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Vallecitos se compone de tres subcuencas conformadas en antiguos valles glaciarios que actualmente se encuentran ocupados por cuerpos glaciarios pequeños ($< 1 \text{ km}^2$) y diversas geoformas criogénicas (Figura 1). En estas tres subcuencas es donde se produciría la principal recarga al sistema hidrogeológico, producto de precipitaciones níveas y líquidas. Se infiere que la infiltración se produce a través de los macizos fracturados que integran la Fm. El Plata, el Grupo Choiyoi y la Serie Vallecitos; así como también por medio de los depósitos cuaternarios glaciogénicos, periglaciales, coluviales y aluviales de altura. Estos sedimentos constituyen las geoformas con estructura abierta del sistema y el incipiente suelo que se desarrolla en la zona.

En el valle ocupado por el glaciar de escombros de Morenas Coloradas se realiza un monitoreo térmico del suelo desde el año 1989 en diferentes alturas (Trombotto y Borzotta, 2009), datos de precipitaciones y temperatura media anual del aire (TMAA) se han recolectado y complementado en diferentes sitios de monitoreo cercanos a la zona de trabajo (Balcón I, Vallecitos, refugios Hernández). Se cuenta también con información precedente de análisis isotópicos y calidad química del agua correspondiente al proyecto CRP F3.20.06 del OIEA (Martínez *et al.*, 2012). El caudal del río Vallecitos tiene una relación directa con las temperaturas superficiales, o de capa activa, de la cuenca criogénica y una dependencia directa con la altura (Trombotto *et al.*, 1997, 1999), por lo tanto es necesario estudiar el origen y el comportamiento de los flujos de agua subterráneos y sub-superficiales.

La precipitación sólida y su infiltración en la estructura criogénica abierta parecen ser los procesos dominantes en la recarga del sistema hidrogeológico de la cuenca hasta su salida como curso de agua, pero se desconoce la evolución de la misma, o las líneas de flujo entre el ingreso al sistema y la descarga hidrológica, como también las variables que la condicionan, o los nuevos

aportes que se podrían estar produciendo por el calentamiento global detectado por Trombotto y Borzotta, (2009).

Desde el mes de noviembre 2013, se realizan campañas estacionales de muestreo hidrogeológico. El objetivo de estos muestreos es la realización de análisis químicos en laboratorio, de componentes mayoritarios, y algunos metales traza, así como también análisis isotópicos, los cuales permitirán conocer el origen de las aguas y las zonas de recarga dentro de la cuenca, la presencia de mezclas de agua y la existencia de transporte reactivo, entre otros procesos.

2. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Vallecitos presenta una extensión aproximadamente de 11 kilómetros, desde su punto más alejado en la subcuenca Morenas Coloradas, hasta su encajonamiento en la zona del Refugio San Antonio. Su ancho varía desde 8 km en la región de altas cumbres hasta unos 350 m en su parte más baja, con una forma de embudo sus características son de una típica cuenca de montaña. El río Vallecitos es alimentado por múltiples manantiales que se ubican en la región de Las Veguitas y hasta aproximadamente los 4200 m. Éstos constituyen una red de cursos intermitentes y permanentes que luego se juntan para formar el río Vallecitos. Su caudal promedio fue calculado en 505 l/s entre 1991 y 1993 (Trombotto *et al.*, 1997, 1999).

En abril de 2013 se llevó a cabo un nuevo relevamiento de las crioformas presentes en la zona, comenzando por la zona más baja, en sector de Las Veguitas y el frente del glaciar de escombros Hans Stepanek ubicado en la Quebrada del Medio. Luego en las sucesivas visitas a la zona se continuó con la quebrada de Las Morenas Coloradas, Veguitas Superior, Piedra Grande y el Salto (Figura 1).

Al momento se está trabajando en el relevamiento de las geoformas observadas en campo, teniendo como base para este trabajo, los mapas realizados por Trombotto y Buk (Trombotto *et al.*, 1997; Buk, 2002;

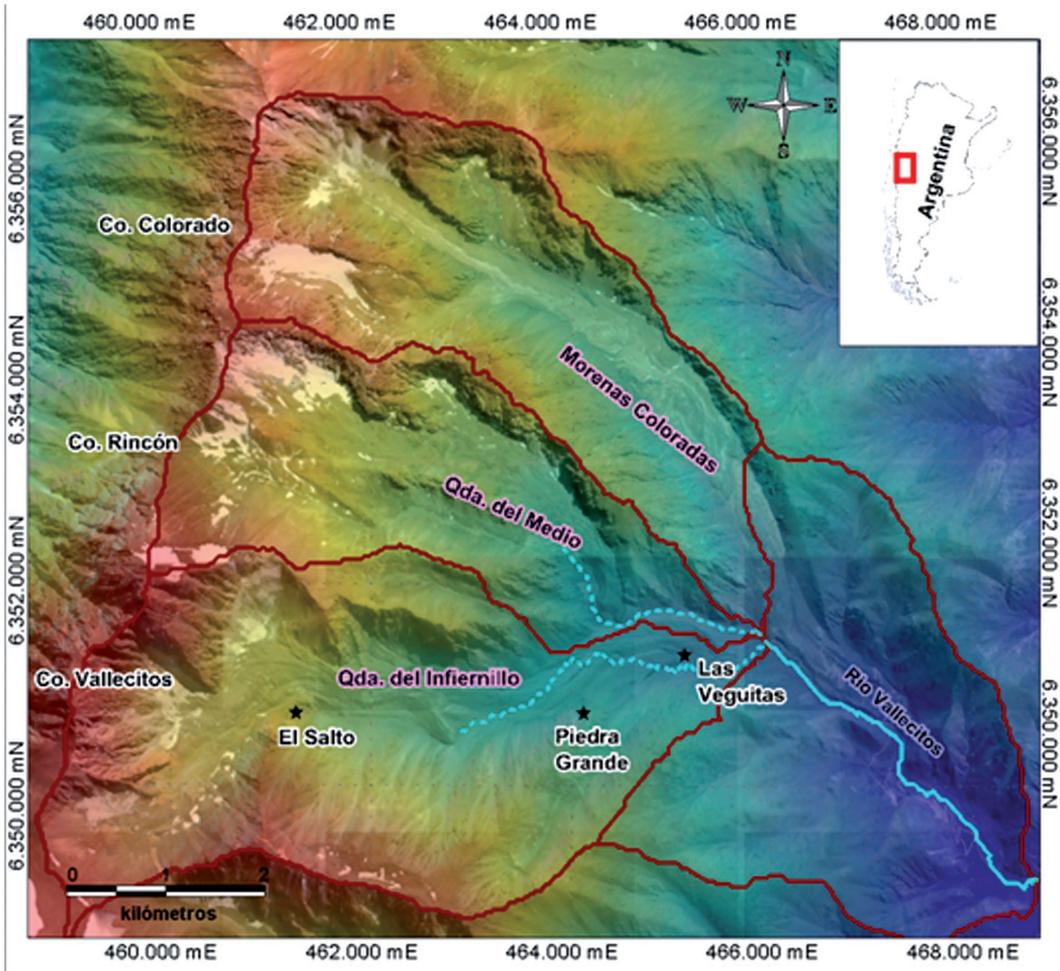


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, con los límites de la cuenca hidrológica del río Vallecitos y sus sub-cuencas

Trombotto, 2003) en el que se presentan los principales rasgos de la cuenca del río Vallecitos (Figura 2).

Los cuerpos de hielo descubierto están en el presente mucho más reducidos que en la Figura 2, apoyados con la imagen SPOT 5 (17/02/2015), Google Earth y en los relevamientos de campo los resultados *a priori* se muestran en la Tabla 1.

La temperatura media anual del aire medida en la estación meteorológica Vallecitos, ubicada a 2505 m snm es de 6,1 °C (1979-2007), los datos fueron, sin embargo, recolectados discontinuamente. La precipitación media anual en la estación es de 359

mm, de acuerdo a los datos registrados continua y mensualmente en el período 1979/83 y de acuerdo al totalizador anual de la unidad de Geociología (Figura 3). La temperatura registrada muestra un leve ascenso (ca 0,06 °C) con respecto a los datos de Trombotto calculados entre 1979-1984 y la precipitación decae 83 mm (cf. Trombotto, 1991).

El ambiente periglacial está caracterizado por la presencia de glaciares de escombros en las tres sub-cuencas que conforman la cuenca del río Vallecitos, lo que indicaría la presencia de permafrost reptante, según la clasificación de Trombotto (2003), a partir de los 3600 m snm en la zona de los va-

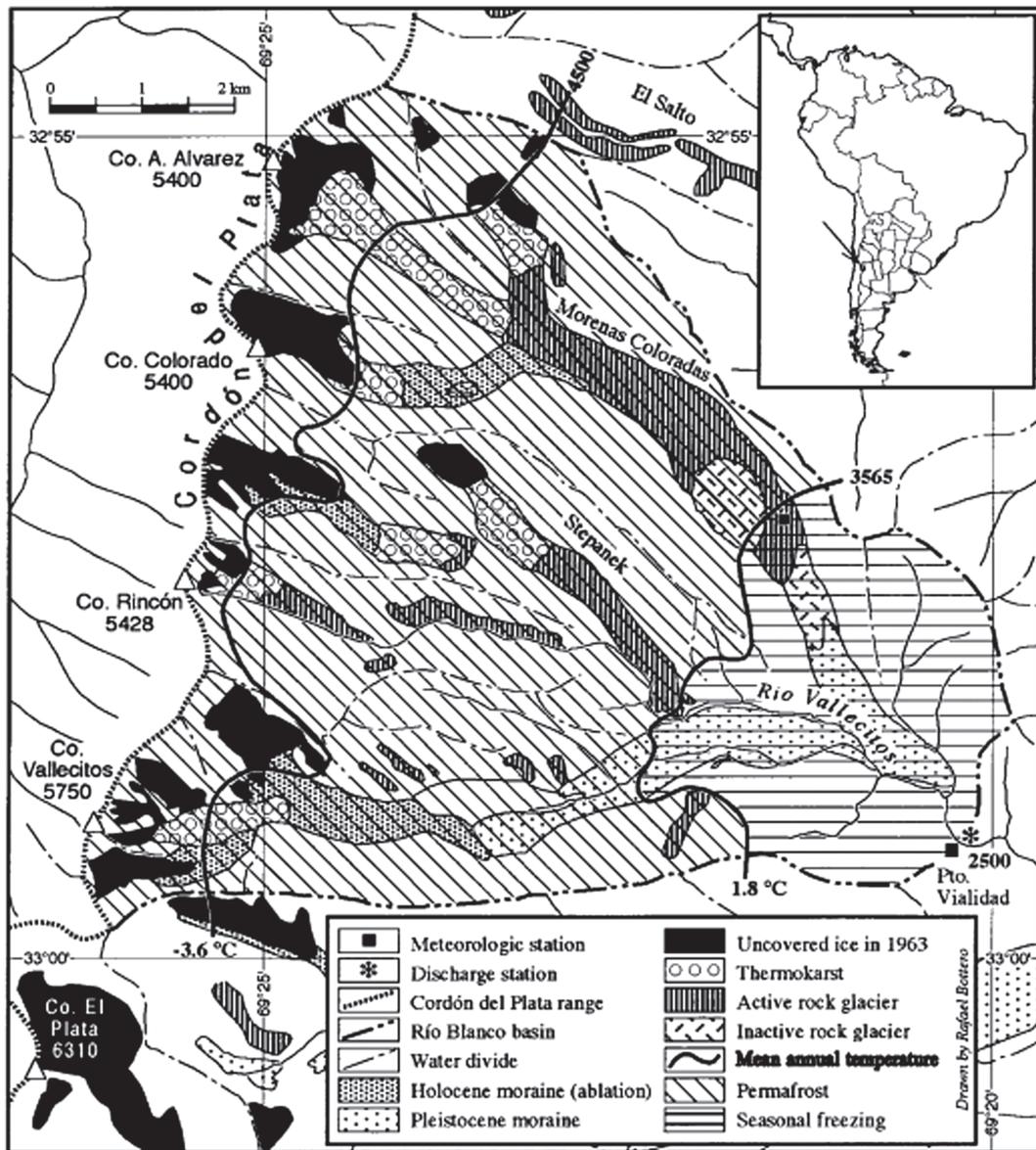


Figura 2. Mapa de crioformas y superficie de hielo de la cuenca del río vallecitos. Tomado de Trombotto et al. (1997).

lles y en las laderas que inclinan al noreste y sudoeste (Figuras 4a, b, c y d).

Entre los lóbulos de los glaciares de escombros de la Quebrada del Infiernillo y de Morenas Coloradas, se destacan depresiones de termokarst, las cuales, en algunos casos, presentan lagunas de aguas claras, con profundidades que van de unas pocas decenas de centímetros a más de 1 metro (Figuras

5a, b, y c) en verano y que indicarían degradación de hielo cubierto o de hielo en permafrost.

En la zona que comprende alturas entre 2800 y 3500 m snm se encuentra el ambiente con congelamiento estacional (Corte, 1981) y geoformas periglaciales fósiles. El congelamiento de la zona paraperiglacial (sin permafrost) se hace evidente a través de suelos

Tabla 1. Superficie de hielo descubierta en las tres sub-cuencas estudiadas.

Lugar	Superficie de Hielo Descubierta (km ²)
Quebrada de Morenas Coloradas	0,11
Quebrada del Medio	0,28
Quebrada del Infernillo	0,41

estructurados de diámetros en centímetros y lóbulos de soliflucción, observados entre la zona de Las Veguitas y Los Refugios. Ésta es también la zona donde se concentra la mayor cantidad de mallines de altura (ambiente de anmoor), y por ende de manantiales que descargan las aguas infiltradas, producto del derretimiento de nieve estacional y permanente y del hielo que se encuentra formando glaciares por encima de los 4500m snm.

El área de trabajo con arroyos y cursos de agua está delimitada a la parte S y SW de la cuenca. La zona ocupada por el glaciar de escombros de Morenas Coloradas presenta el agua subterráneamente. El agua superficial deja de ser visible a los 3000 m

aproximadamente, apareciendo únicamente en lagunas de termokarst a partir de los 3700 m de altura, sólo en primavera con cierto nivel de congelamiento, durante el verano.

3. METODOLOGÍA

En una primera instancia se han caracterizado las aguas de manantiales, arroyos y nieve *in situ* con un equipo multiparamétrico HANNA HI 9828 para obtener datos de pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales. Por otro lado, se ha determinado la turbidez con un turbidímetro portátil OAKTON y sometido a diferentes análisis *in situ* para determinar los siguien-

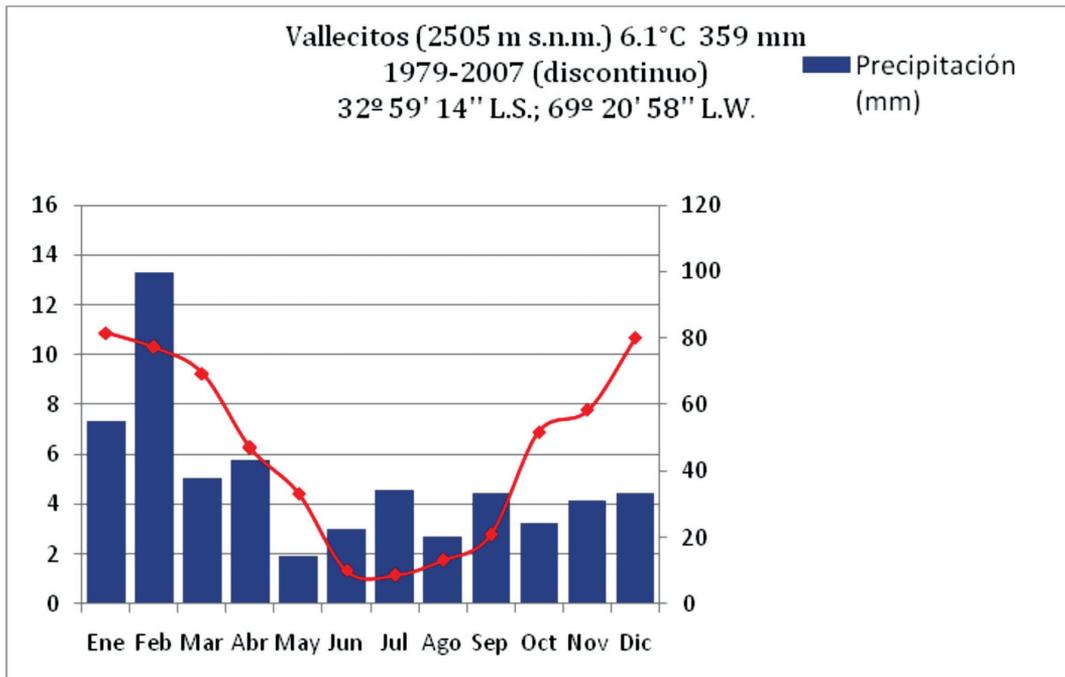


Figura 3. Climadiagrama de Vallecitos.



Figura 4. a) Glaciar de escombros Morenas Coloradas. b) Glaciar de escombros Stepanek. c) Glaciar de escombros Infiernillo. d) Glaciar de Escombros Franke.

tes elementos químicos: Fe, Al, Zn, SiO₂, Mn, SO₄, NO₃, NO₂ y Mo, utilizando un fotómetro portátil CHEMETRICS V2000. Los mismos fueron determinados de acuerdo a las posibilidades del equipo. Además se midieron la dureza y alcalinidad a partir de técnicas volumétricas por titulación. Las unidades de los valores se presentan en °C, pH, NTU (turbidez), en ppm los sólidos disueltos totales (TDS) y la conductividad eléctrica (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al momento se cuenta con los primeros análisis realizados mediante las técnicas de ICP-MS, absorción atómica e iónica provistos por la División de Servicios Analíticos de la CNEA. Estos resultados corresponden a las muestras tomadas en el mes de noviembre de 2014.

Al momento se cuenta con 11 sitios de muestreo distribuidos en toda la cuenca, los que incluyen agua superficial y subterránea:

manantiales (código Vmn), arroyos y río (código Vrn), manchones de nieve estacionales (código Vnn) y un punto de muestreo de agua de lluvia ubicado a 2800 m snm (Figura 5). Las muestras de nieve corresponden a la zona inferior del glaciar de escombros Morenas Coloradas, a la zona media del glaciar de escombros Hans Stepanek, en la Quebrada del Medio, quitando los primeros 10 cm superiores de la capa de nieve y realizando un «monolito de nieve» en el manchón de nieve estacional. Otra muestra proviene de la zona de las Veguitas las cuales fueron colectadas en agosto de 2014.

Los análisis isotópicos (²H y ¹⁸O) se realizaron mediante espectroscopia láser con un equipo «Los Gatos Research inc.» (OAICOS: Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) (Lis et al., 2008). El procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de



Figura 5. a) Laguna de termokarst, en el Infiernillo 3951 m snm, b) y c) Laguna y depresión de termokarst en Morenas Coloradas a 3723 m snm.

«Isótopos Estables del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica» (INGEIS, CONICET-UBA). Los resultados isotópicos se expresan como δ , definido como: $\delta = 1000(RS - RP)/RP$ ‰, donde: δ : desviación isotópica en ‰; S: muestra; P: referencia internacional; R: relación isotópica ($^2H/^1H$, $^{18}O/^{16}O$). La referencia utilizada es Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) (Gonfiantini, 1978). Las incertidumbres son $\pm 0,3\%$ para $\delta^{18}O$ y $\pm 1,0\%$ para δ^2H .

El parámetro exceso de deuterio (d) definido por Dansgaard (1964) como $d = \delta^2H - 8 * \delta^{18}O$ deriva de la correlación entre los contenidos de deuterio y oxígeno -18 y se utiliza para relacionar la composición isotópica de cualquier muestra de agua con la línea de aguas meteóricas. Este valor es inherente al vapor original y es la propiedad más útil para caracterizar su origen y además permite diferenciar procesos de equilibrio de los de no equilibrio. En la mayoría de las precipitaciones continentales $d = +10\%$.

Como parte de los relevamientos, durante cada campaña estacional, se midió la velocidad del flujo en todos los cursos de agua superficial muestreados y a la salida de los distintos mananciales. Dicho procedimiento se realiza con una sonda de flujo GlobalWater FP111, que consiste en un molinete de eje vertical que registra la velocidad del flujo al hacer girar una hélice. Con los datos de velocidad del flujo a lo largo de un perfil transversal al curso de agua, y midiendo el ancho del canal, se calculan posteriormente los caudales que circulan en cada estación del año.

4. MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA HÍDRICO SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEO

Al momento de plantear la circulación del agua en el ambiente periglacial, se tuvieron en cuenta una serie de factores determinantes del movimiento del agua, como: 1) la

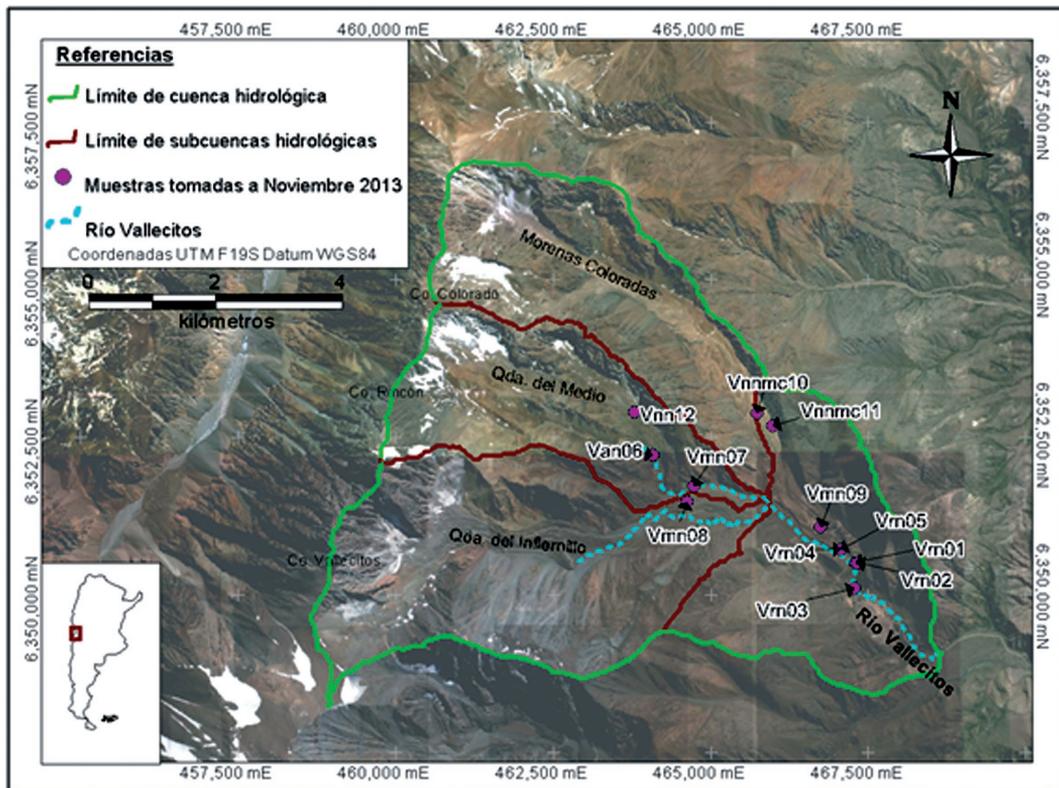


Figura 6. Mapa de sub-cuencas y sitios de muestreo a Agosto de 2014.

presencia de hielo subsuperficial y su correspondiente impermeabilidad; 2) la altura del terreno; 3) la temperatura del aire y del suelo; y 4) las estructuras presentes tanto en los macizos rocosos como en las crioformas constituidas por material sedimentario de diversas granulometrías.

El modelo conceptual planteado en este trabajo, se basa en el conocimiento adquirido hasta el momento de la zona en estudio. Principalmente se centra en el movimiento subsuperficial-subterráneo del agua que ingresa por precipitaciones níveas y líquidas. El ingreso del agua al sistema subterráneo

Tabla 2. Muestras tomadas en noviembre de 2013. La columna X e Y indica la ubicación de las mismas en coordenadas UTM, banda 19S.

muestra	tipo	x(m)	y(m)	altura (m)	ubicación
Vrn01	agua de río	467295	6350503	2622	rio Vallecitos
Vrn02	agua de arroyo	467328	6350509	2649	arroyo Andresito
Vrn03	agua de río	467281	6350106	2592	rio Vallecitos
Vrn04	agua de arroyo	467059	6350718	2703	zona refugio San Bernardo
Vrn05	agua de arroyo	467059	6350718	2703	zona refugio San Bernardo
Van06	agua de arroyo	464089	6352226	3479	Quebrada del Medio
Vmn07	agua de manantial	464735	6351730	3380	Quebrada del Medio
Vmn08	agua de manantial	464620	6351487	3356	Veguitas
Vmn09	agua de manantial	466738	6351085	2829	zona refugios Hernández
Vnnmc10	nieve de manchón estacional	465727	6352886	3358	Morenas Coloradas
Vnnmc11	nieve de manchón estacional	465979	6352678	3283	Morenas Coloradas

se puede pensar tanto a través de los macizos rocosos fracturados que permiten la circulación del agua hacia niveles inferiores en la estructura y luego ingresan en las crioformas, así como también directamente sobre las crioformas (Figura 6).

Observando la dinámica superficial en el campo, se hace visible que el agua subterránea se mueve siguiendo determinadas líneas de flujo dentro de las crioformas con un gradiente hidráulico definido. Esto se evidencia por la presencia de manantiales que luego conforman cursos superficiales que recorren distancias variables y pueden seguirse por metros hasta kilómetros para formar parte de la red de drenaje superficial, infiltrarse nuevamente, o conectarse con algunas lagunas de termokarst en altura.

De acuerdo a la figura 1 se observa que la precipitación está distribuida en todo el año, pero muestra dos momentos importantes de mayor precipitación. El mes con más precipitación está en el verano, es en febrero, y está originada, de acuerdo a observaciones de campo, por tormentas del Pacífico pero también del Atlántico (ya que muchas nevadas fueron corroboradas en el Cordón del Plata, no así en la Cordillera Principal). En invierno la mayor precipitación es en julio.

Según los relevamientos realizados estacionalmente, la mayoría de los manantiales monitoreados presentan un flujo de agua continuo durante todo el año que varía su caudal según la estación. Los mayores caudales se han registrado durante el verano. En contraste, los valores mínimos medidos se obtuvieron durante el invierno. La región cuyana acumula casi el total de su derrame anual de noviembre a marzo, como producto del derretimiento estival de la nieve precipitada en altas cumbres durante todo el año. Es por esta continuidad en el flujo de agua, que se podría hablar de aguas subterráneas y no meramente un flujo sub-superficial, el cual sólo sería visible cierto tiempo después de la ocurrencia de precipitaciones. Se ha observado que ciertos cursos superficiales, ubicados en la Quebrada del Infiernillo, aumentan su caudal de agua luego del mediodía, muy probablemente debido al derretimiento de hielo o manchones de nieve, producto del aumento de la temperatura por la incidencia de los rayos solares. Es únicamente en esta zona, donde algunos arroyos y manantiales no presentan agua fluyendo pasado el mes de mayo, indicando posiblemente que la fuente ya se encuentra congelada en la zona de recarga, y a una mayor altura topográfica.

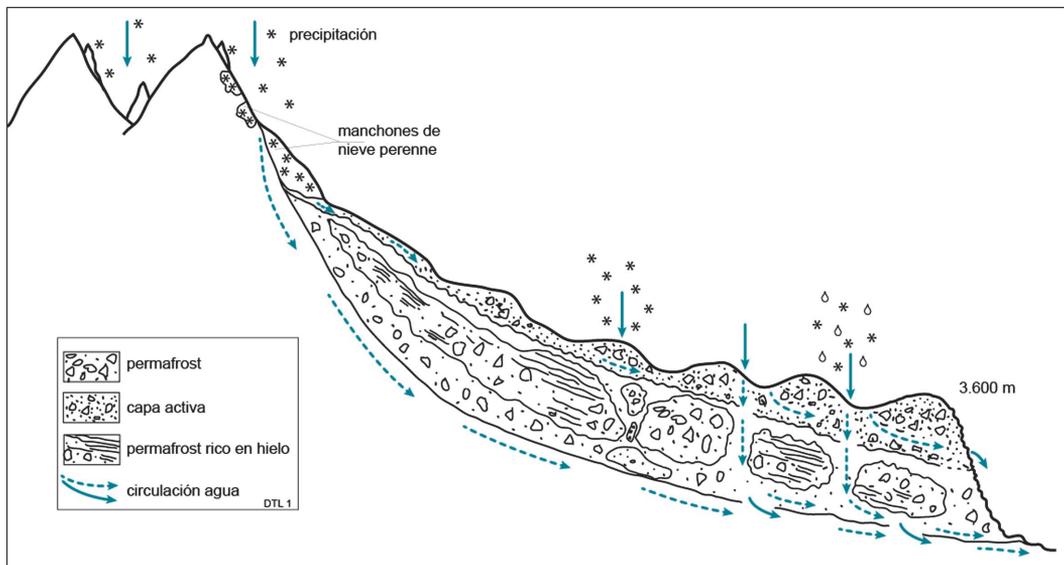


Figura 7. Modelo Conceptual Tridireccional DTL1 de circulación de agua en el sistema periglacial hídrico superficial-subterráneo.

5. RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIÓN

De acuerdo al modelo anteriormente mencionado y las observaciones de campo se podría inferir el siguiente esquema de circulación:

5.1. *Movimiento de flujos de agua subsuperficial y subterránea a través de la capa activa de una crioforma y capa de congelamiento estacional de la cuenca y geoformas.*— Los datos relevados en el campo indican la disminución de la temperatura del agua en aproximadamente 2°C en el punto de muestreo Vmn07, respecto del punto en superficie, en donde ingresaría al glaciar de escombros Hans Stepanek (Van06) (Figura 6). Se han detectado también, cambios en la composición química entre estos dos puntos, siendo Van06 el punto con las concentraciones de analitos más elevados de la zona. Di-

chas muestras han mostrado valores elevados de algunos metales como Ni ($0,928 \pm 0,093 \text{mg/L}$), que supera el valor de referencia sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de $0,07 \text{mg/L}$ (OMS, 2006), Cd ($0,023 \pm 0,002 \text{mg/L}$), y Zn ($4,2 \pm 0,4 \text{mg/L}$), éstos últimos casi llegando al límite establecido por la OMS de $0,03 \text{mg/L}$ y 5mg/L (OMS, 2006), respectivamente. Teniendo en cuenta el origen natural de estos elementos, es posible que el Ni movilizado por las aguas subterráneas en esta zona, sea retenido mediante adsorción o intercambio de iones con el material fino que forma la matriz superior del glaciar de escombros Stepanek porque no se observa aguas abajo en Vmn07. Respecto al Zinc, la solubilidad de este elemento en agua es función del pH y de la concentración de carbono inorgánico. Se observó un notorio aumento de pH entre los puntos Van06 y Van07, en un rango que varía entre 5-6 para el primero y 7-9

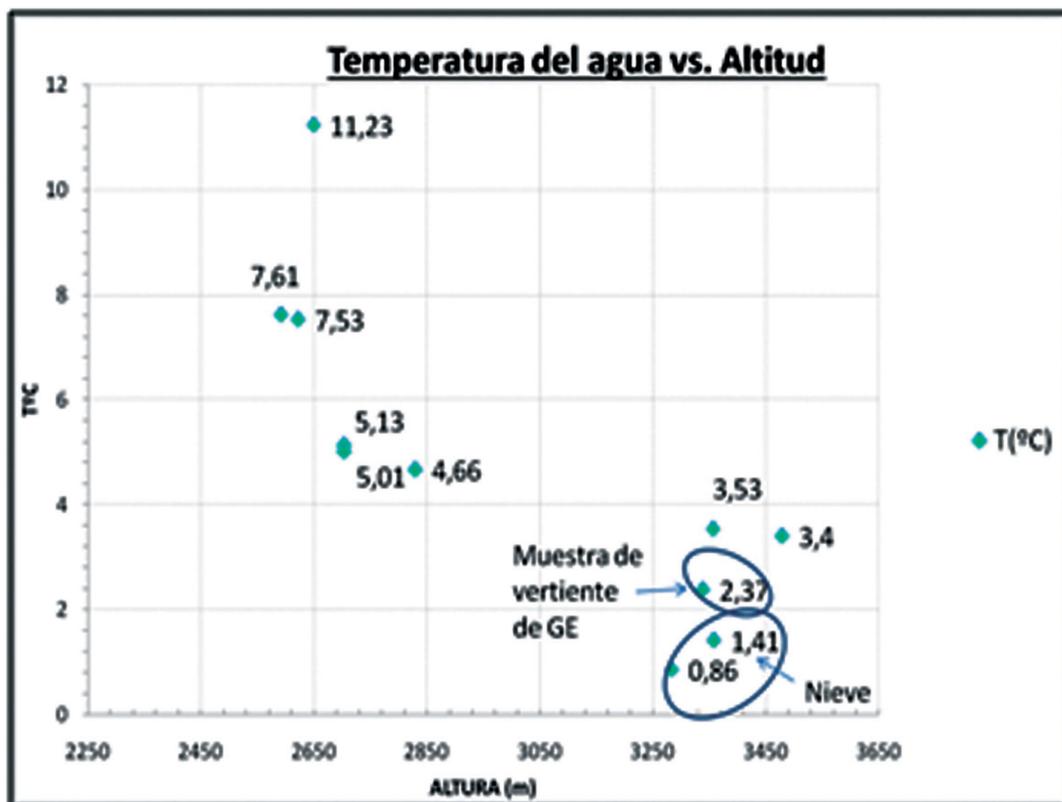
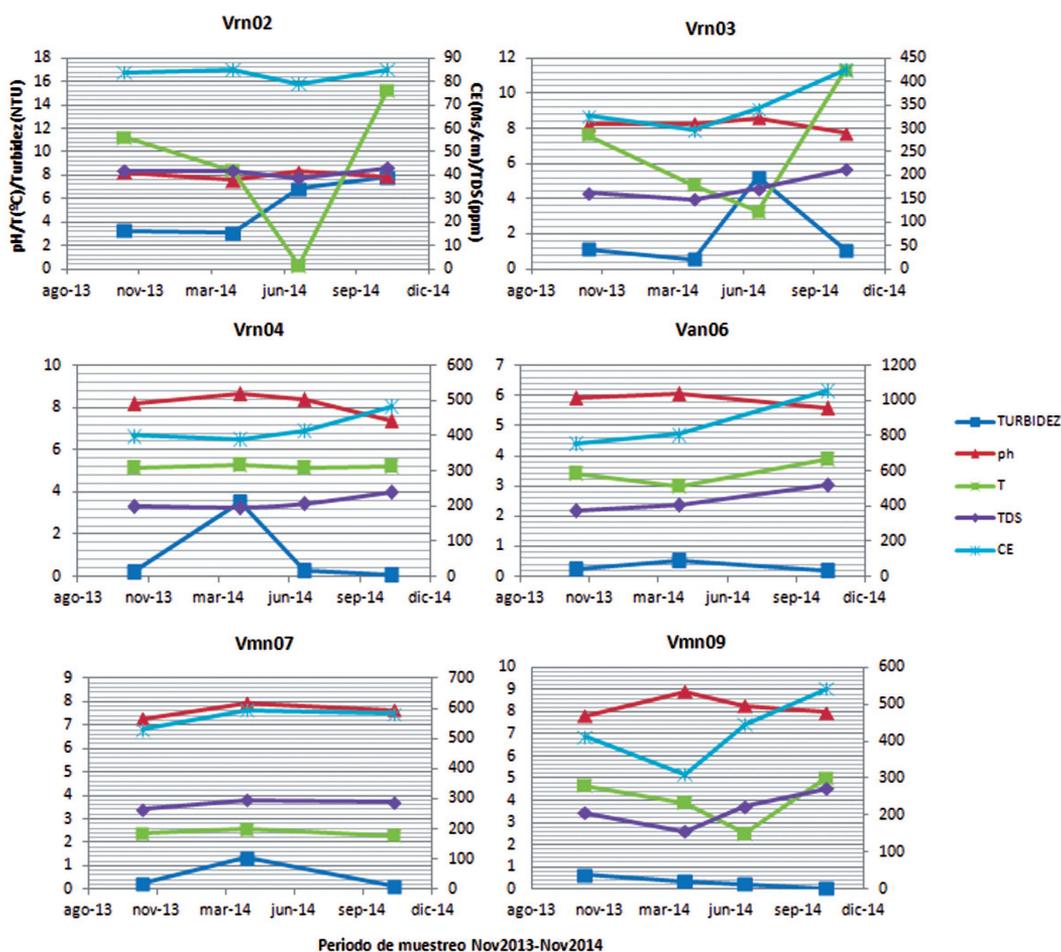


Figura 8. Variación de la temperatura T °C con la altura topográfica en los distintos puntos de muestreo.



SERIES DE CE ($\mu\text{S/cm}$) para cada muestreo

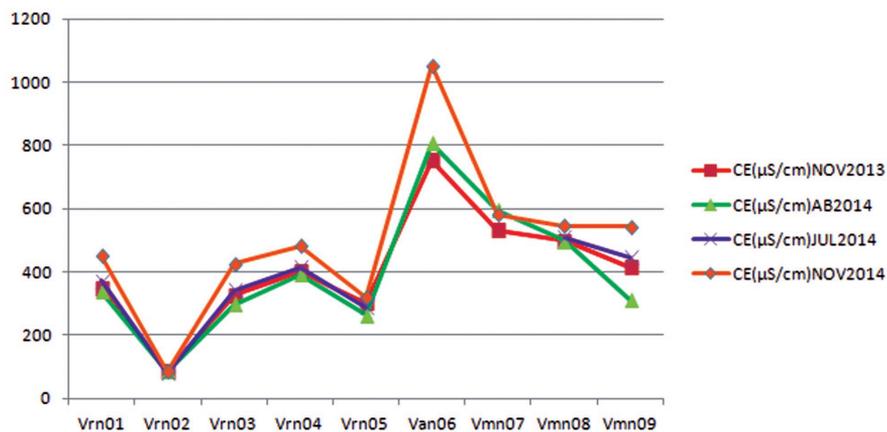


Figura 9. Variación de parámetros medidos *in situ* entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014 en cada punto de muestreo.

para el segundo, y teniendo en cuenta que un pH superior a 8, en aguas de baja alcalinidad, alcanzaría para comenzar a inmovilizar el Zn libre en el agua, se espera la disminución en las concentraciones entre un punto y otro; esto se evidencia en los resultados, lo que podría estar indicando, por ejemplo, una disolución de esfalerita (ZnS) aguas arriba del punto de muestreo Van06. Se considera que el Zn podría ser un buen marcador para determinar el movimiento del agua subterránea.

5.2. *El movimiento del agua infiltrada en los macizos rocosos fracturados y criometeorizados que enmarcan las crioformas.*— Durante las sucesivas campañas de muestreo hidrogeológico, se pudo observar la presencia de estructuras que cortan los macizos rocosos, generando fracturas por las cuales el agua de las precipitaciones ingresa al sistema hidrológico- hidrogeológico. En muchos casos, estas fracturas muestran signos del paso de agua, aún cuando hayan pasado varios días o semanas desde la última precipitación. Esto podría

indicar que el agua es retenida o que se transporta lentamente por estas fracturas hacia zonas más bajas, donde luego se une a los distintos cursos superficiales, o ingresa a las geoformas, para desaguar finalmente en el río Vallecitos. Al momento se están utilizando los isótopos estables del Hidrógeno y el Oxígeno como trazadores naturales para comprender la circulación subterránea y ajustar el modelo conceptual planteado. Además se deberá determinar la petrología y geoquímica de la matriz rocosa por la que circula el agua infiltrada para establecer relaciones químicas agua-roca y agua-sedimento.

5.3. *Circulación superficial de agua de precipitación nival y líquida producida sobre las crioformas.*— Este agua precipitaría directamente sobre el cauce superficial de ríos y arroyos, sin ingresar al sistema subterráneo; a lo que podría atribuirse la presencia de aguas poco mineralizadas y aquellos arroyos intermitentes que tienen actividad sólo durante y poco después de ocurridas las precipitaciones.

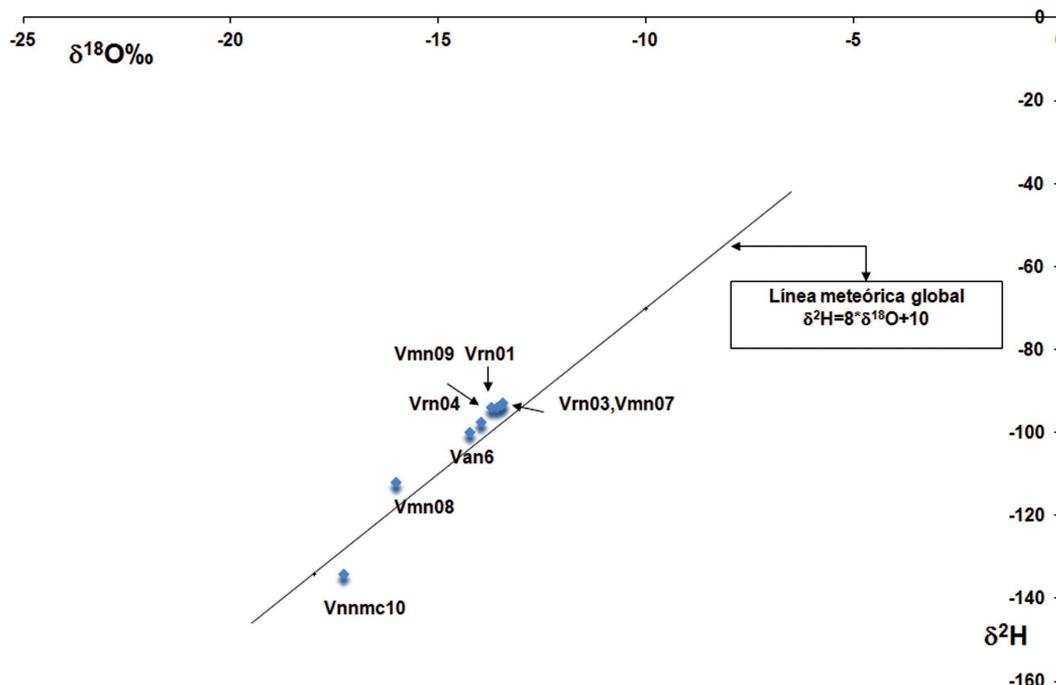


Figura 10. δ²H vs δ¹⁸O para las muestras tomadas en noviembre de 2013 junto con la recta meteórica mundial.

Con los datos obtenidos *in situ*, se ha realizado el gráfico de temperatura del agua *versus* altura topográfica (Figura 8), donde se observa un descenso de la temperatura del agua a mayor altitud, con una variación de aproximadamente 9°C desde los 2600m snm hasta los 3500m snm, para las aguas de arroyos y manantiales muestreadas. De esta forma se observó una subcuenca homogénea térmicamente y se descartó una posible incidencia volcánica o estructural en ella que pudiera incidir en variar su gradiente geotérmico zonal.

Respecto a los parámetros medidos *in situ*, se realizó una serie de gráficos para observar su evolución temporal entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014. En la Figura 9, se presenta la variación de temperatura, pH, turbidez, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica en nueve de los puntos de muestreo, correspondientes a las muestras de agua líquida.

Debido a que se trata de muestreos estacionales, uno de los objetivos fue identificar cómo se comportó cada parámetro en las distintas estaciones del año, y ver también si ocurrían variaciones interanuales en los mismos. Como se puede observar en la Figura 9, si bien existen pequeñas diferencias, todos los parámetros se comportan muy similarmente tanto en noviembre de 2013, como en noviembre de 2014. Si se observa la temperatura, se puede ver que la misma se corresponde muy bien con cada estación, siendo mínima en invierno y aumentando hacia la primavera y verano como es de esperar. En los puntos Van06 y Vmn07, este fenómeno no se observa debido a que no se pudo acceder durante el invierno y por lo tanto se carece de datos. Así mismo, el punto Vmn07 presenta las menores temperaturas registradas durante todo el año (menores a 3°C). Éste se ubica al pie del glaciar de escombros Stepanek, el cual podría estar afectando al agua subterránea circulante cuando lo intercepta. En el frente actual del glaciar de escombros Stepanek se observan hoy zonas superficiales con fenómenos criodinámicos que podrían expresar situaciones de degradación (del supra, infra o del intrapermafrost?) o simplemente de variacio-

nes de espesor de capa activa (ver Bodin y Trombotto en este volumen).

En lo que concierne al pH, se puede ver que en todos los casos, los valores mayores son en la temporada invernal y descienden en la primavera. Esto podría reflejar el aporte por derretimiento de las precipitaciones níveas caídas durante el invierno previo. Cabe destacar que en el punto Van06, el pH presenta durante todo el año valores inferiores a 6, en comparación al resto que siempre tienen valores mayores a 7,5.

La CE presenta un patrón similar al de los TDS, debido a que el segundo está directamente relacionado con los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en agua, se lo considera un buen indicador de la calidad del agua. El comportamiento de estos parámetros, si bien es variable para cada sitio muestreado, presenta la misma tendencia en el tiempo. Como puede observarse en la Figura 8, pueden reconocerse 4 grupos con CE características. El primer grupo comprendería a las muestras Vrn01, Vrn03, Vrn04 y Vrn05; el segundo a las muestras Vmn07, Vmn08 y Vmn09, y el tercero y cuarto a las muestras Vrn02 y Van06 respectivamente. En la Figura 8 se observa también un aumento generalizado de la CE para noviembre de 2014, mientras que los menores valores se registran en la campaña de abril de 2014. Se destaca el punto Vrn02, que presenta muy bajo contenido de sales con valores de CE inferiores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durante todo el año, que podrían indicar una zona de recarga muy cercana a la zona de muestreo.

Finalmente, la turbidez es muy variable en cada punto, presentando los mayores valores en Vrn02. Esto se puede deber a que se trata de un arroyo de poco caudal y por ende de baja competencia por lo cual el transporte de finos es predominante. Otro factor a tener en cuenta es que se trata de un punto meramente de agua superficial, en contraste con otros cuya agua ha tenido un recorrido subterráneo a través de la cobertura cuaternaria.

Las muestras tomadas para análisis isotópicos de ^2H y ^{18}O fueron graficadas en

diagramas convencionales $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ junto con la recta meteórica mundial *i.e.* $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ (Craig, 1961) como referencia (Figura 10).

La composición isotópica de las aguas superficiales muestra un grupo de muestras con valores relativamente más enriquecidos entre -14,3‰ y -13,5‰ para $\delta^{18}\text{O}$ -100‰ y -93‰ para $\delta^2\text{H}$ y la muestra VNM8 con un contenido isotópico de -16,0‰ y para $\delta^{18}\text{O}$ y -112‰ para $\delta^2\text{H}$. Los excesos de deuterio (d) de todas las muestras varían alrededor de 15‰. Esto podría indicar que se trata de aguas de fusión de nieve, sin descartar en ellos un aporte de lluvia que se observa en el presente hasta los 3600 m de altura y que se mezclaría con las primeras. El punto VNM8 corresponde a la boca de un manantial, a 3356 m de altura, que sale hacia un mallín (o *anmoor*) andino. La composición más empobrecida de esta muestra indica que se recarga a mayor altura y que se trata de nieve infiltrada y derretida.

La muestra VMN07, sin embargo, al pie de un glaciar de escombros, se localiza a aprox. 3400 m snm, denota un mayor enriquecimiento isotópico con respecto a las otras, posiblemente por tener un aporte diferente, como un posible aporte hídrico por derretimiento de la crioforma.

La muestra de nieve VNNMC10 corresponde propiamente a una muestra tomada de un manchón de nieve ubicado en el glaciar de escombros activo de Morenas Colorada, presenta el contenido isotópico más empobrecido ($\delta^{18}\text{O} = -17,3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -134\text{‰}$ y $d = 4\text{‰}$) señalando que el área de aporte es diferente. Su exceso de deuterio menor que 10‰ es característico de procesos de sublimación y evaporación que sufre la nieve a través del tiempo (Arnasson, 1981; Gat, 2010), indicando que este manchón de nieve, a 3770 m snm aproximadamente, si bien es estacional, es antiguo y puede ser un remanente del año anterior. Los valores encontrados en la nieve son más empobrecidos debido al efecto de altitud, fenómeno encontrado también en años anteriores por Martínez *et al.* (2012).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo presenta los primeros resultados hidroquímicos de la cuenca del Río Vallecitos, en donde hasta el momento se ha podido observar cómo la geomorfología y los procesos criogénicos estarían influenciando al sistema hidrológico- hidrogeológico.

Se observan distintos mecanismos de circulación del agua desde que precipita en la zona de recarga y sobre los cursos superficiales de agua, generalmente como nieve, tanto en zonas de altas cumbres por encima de los 5000 m de altura, como en las formas características de ambientes periglaciales que luego de infiltrarse puede o no recorrer desde kilómetros a metros debajo de la cobertura cuaternaria y adquirir características propias de cada subcuenca, hasta que finalmente se encuentra nuevamente en superficie a través de manantiales.

El monitoreo continuo de tipo estacional, permitió conocer las variaciones del sistema como un conjunto y en forma local. Se han podido determinar zonas de particular interés, para comprender los mecanismos y efectos de las crioformas sobre la circulación subterránea, como es el caso del punto de muestreo Vmn07, ubicado al pie del glaciar de escombros Stepanek, el cual presenta temperaturas del agua del orden de los 2°C, a 3380m snm, únicamente explicable con aporte de agua de menor temperatura, producto de derretimiento de manchones de nieve a baja altura o por la degradación de zonas congeladas.

El análisis de la CE en series temporales ha develado el comportamiento característico de los distintos sitios muestreados, permitiendo organizarlos en cuatro grupos correlacionados principalmente con su ubicación espacial y altitudinal.

Los primeros resultados isotópicos demuestran que las muestras tomadas en zonas más bajas, estarían enriquecidas, respecto de las ubicadas a mayor altura, indicando una dependencia de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ con la altitud, como era de esperarse.

Con la ayuda de imágenes satelitales y software para procesamiento de imágenes se construirá un mapa a escala 1:10500 con las geoformas identificadas en campo, diferenciando cuerpos de hielo, hielo cubierto y crioformas periglaciales.

Durante los próximos monitoreos se ampliará la red de muestreo, incluyendo lagunas de termokarst y manantiales existentes a mayor altura, así como también las zonas en donde se encuentran glaciares cubiertos y descubiertos, para así poder obtener información de la química de la fuente. Se instalarán nuevos colectores de precipitación a distintas alturas y en las distintas subcuencas para determinar las variaciones isotópicas de las precipitaciones dentro de la misma cuenca y conocer también si hay diferencias en el volumen de precipitación que recibe cada una. Otro parámetro que se medirá es la temperatura en la capa activa de los glaciares de escombros Stepanek y El Infiernillo, instalando «data loggers» de temperatura en el subsuelo de cada uno, para realizar perfiles y estudiar el estado en el que se encuentra el permafrost de cada zona. A futuro se pretende analizar si los puntos de muestreo analizados isotópicamente están influenciados por el efecto de altitud.

Los modelos de circulación serán constataados con trazadores, inyectándolos en las zonas de recarga y midiendo su concentración a lo largo de su supuesto recorrido.

Se deberá analizar la geoquímica tanto de las nieves recién caídas sobre las crioformas como de manchones de nieve perennes y glaciares cubiertos y descubiertos, y compararla con los manantiales al pie de las crioformas, como por ejemplo en la nariz de los glaciares de escombros, para determinar su semejanza o no respecto a dónde se produciría la recarga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Comisión Nacional de Energía Atómica y al IANIGLA por el apoyo institucional, material y logístico en campañas. A la Lic. Ivanna Peccker Marcossig y a Pepe Hernández por la ayu-

da en los muestreos. Al Dr. Néstor Fuentes y la Lic. Estefanía Bottegal y al personal de los refugios de montaña UNCUYO y San Bernardo.

BIBLIOGRAFÍA

- Árnason, B. 1981. Ice and snow hydrology. En: Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in The Water Cycle. IAEA. Vienna. Technical Report Series No. 210: 143-170.
- Buk, E. 2002. Hidrología en ambientes periglaciares Cuenca morenas Coloradas- Vallecitos, Cordon del Plata, cordillera Frontal, Mendoza. Publicación de Geocriología IANIGLA 1973- 2002.
- Corte, A.E., 1983. Los conceptos: geocriogénico - parageocriogénico y glacial - paraglacial en los Andes Centrales de Argentina , latitud 30. Acta Geocriológica Nr.1, Mendoza: 48-61.
- Craig, H., 1961. Isotope variations in meteoric waters. Science, 133: 1702-1703.
- Dansgaard, W., 1964. Stable Isotopes in precipitation. Tellus 16, 436-468.
- Gat, J. R., 2010. Isotope Hydrology A study of the water cycle. Series on Environmental Science and Management. Imperial College Press. Vol. 6: 189 pp.
- Gonfiantini, R., 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. Nature 271: 534.
- Lis, G., Wassenaar, L.I. y Hendry, M.J. 2008. High-Precision Laser Spectroscopy D/H and 18O/16O measurements of Microliter Natural Water Samples. Analytical Chemistry. 80:287-293.
- Martínez, D. Vich, A., Trombotto, D., Quiroz Londoño, M., Ferrante, A. y Massone, H., 2012. Caracterización Isotópica de agua, hielo y nieve en el Cordón del Plata, Mendoza, Argentina. Actas de trabajos completos E-ICES 8: 248-247. CD.
- Organización Mundial de la Salud, 2006. Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición. ISBN 92 4 154696 4.
- Trombotto, D. 2003. «Mapping of permafrost and the periglacial environment, Cordón del Plata, Argentina». 8th International Conference on Permafrost. Permafrost, Extended Abstracts, Reporting Current Research and New Information, Edited by W. Haeblerli & D. Brandová, Zurich, Switzerland: 161-162.
- Trombotto, D. y Borzotta, E. 2009. Indicators of present global warming through changes in active layer-thickness, estimation of thermal diffusivity and geomorphological observations in the Morenas Coloradas rock glacier, Central Andes of Mendoza, Dry Andes, Argentina. Cold Regions Science and Technology, 55: 321-330.

- Trombotto, D, Buk, E. y Hernández, J. 1997. Monitoring of Mountain Permafrost in the Central Andes, Cordon del Plata, Mendoza, Argentina. *Permafrost Periglacial Process.*, 8: 123-129. doi:10.1002/(SICI)1099-1530(199701)8:1<123::AID-PPP242>3.0.CO;2-M.
- Trombotto, D., Buk, E. y Hernández, J. 1999. Rock glaciers in the Southern Central Andes (appr. 33 S.L.), Mendoza, Argentina: a review. *Bamberger Geographische Schriften* 19: 145-173.