

Evaluación de la Aguas Termales en el área de Santa Teresita, Provincia de La Rioja, Argentina

Carlos Martín FALCÓN^{1,2}, Gabriel Gastón MORENO² y Ana María COMBINA²

Resumen: *EVALUACIÓN DE LA AGUAS TERMALES EN EL ÁREA DE SANTA TERESITA, PROVINCIA DE LA RIOJA, ARGENTINA.* Desde mediados del siglo XX se conoce la existencia de recursos hidrotermales en el extremo norte de la sierra de Velasco, ubicados en la localidad de Santa Teresita y parajes aledaños como los Médanos, el palmar, la Chilca y Suri Yaco. Las primeras explotaciones de aguas subterráneas en la región, las realizó el Ejército Argentino, entre los años 1940 y 1950, en la localidad de Los Médanos, próximo a las riberas del río Salado o Abaucán, con el fin de fomentar el desarrollo de colonias agrícolas en la región. Las manifestaciones estudiadas se encuentran en el extremo sur de la Cuenca Hidrogeológica del Salar de Pipanaco, dentro de la Provincia Hidrogeológica de Valles Intermontanos de las Sierras Pampeanas (Sosic 1973). Las aguas subterráneas en este sector, se encuentran fundamentalmente en depósitos cuaternarios y en menor proporción, en sedimentitas terciarias. Para este trabajo se analizaron 10 muestras de pozos termales y 2 de vertientes, y se evaluaron parámetros físicos y químicos, tales como la temperatura de emergencia de la fuente, pH, caudal, conductividad, dureza, entre otros, y las concentraciones iónicas de cationes y aniones mayoritarios, que permitieron realizar su caracterización química y la aplicación de geotermómetros catiónicos.

Abstract: *EVALUATION OF THE HOT SPRINGS IN THE AREA OF SANTA TERESITA, PROVINCE OF LA RIOJA, ARGENTINA.* The first exploitations of groundwater in the area are made by the Argentine Army, between 1940 and 1950, in the Los Médanos on the banks of the Salt or Abaucán river to promote the development of agricultural colonies in the region. Hydrothermal manifestations studied are located in the southern extreme of the Hydrogeological Basin of the Pipanaco salt within the Hydrogeological Province Intermountain Valleys of Pampean Ranges (Sosic 1973). Groundwater in this sector are fundamentally Quaternary deposits and to a lesser extent, in Tertiary sediments. For this work were analyzed 10 samples thermal wells and 2 springs, where physical and chemical parameters were evaluated as the emergency temperature source, pH, flow, conductivity, hardness, among others, and the ionic concentrations of cations and major anions, allowing their chemical characterization and application of cationic geothermometers.

Palabras clave: Estudios hidrogeotermales. Santa Teresita. La Rioja. Argentina. Evaluación del recurso.

Key words: Hydrogeothermal studies. Santa Teresita. La Rioja. Argentina. Resource evaluation.

¹ Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO) Universidad Nacional de Tucumán. Código Postal 4000. camafa377@yahoo.com.ar

² Instituto de Geología y Recursos Naturales (INGEREN). Universidad Nacional de La Rioja. Dr. Luis Vernet 1000. Código Postal 5300. La Rioja. ana.maria.combina@gmail.com; gabymor_89@hotmail.com

Introducción

Las manifestaciones termales en el área de Santa Teresita se localizan en el sector centro norte de la provincia de La Rioja, cercano al límite con la provincia de Catamarca, entre los 28° 27' y 28° 37' de latitud sur y los 66° 24' y 66° 40' de longitud oeste.

El acceso al área se realiza a través de rutas provinciales asfaltadas y/o consolidadas (figura 1) y de picadas y sendas ocasionales, que permitieron el acceso a las zonas más alejadas, como los médanos, barrales, cauces secos y colinas con vegetación xerófita densa.

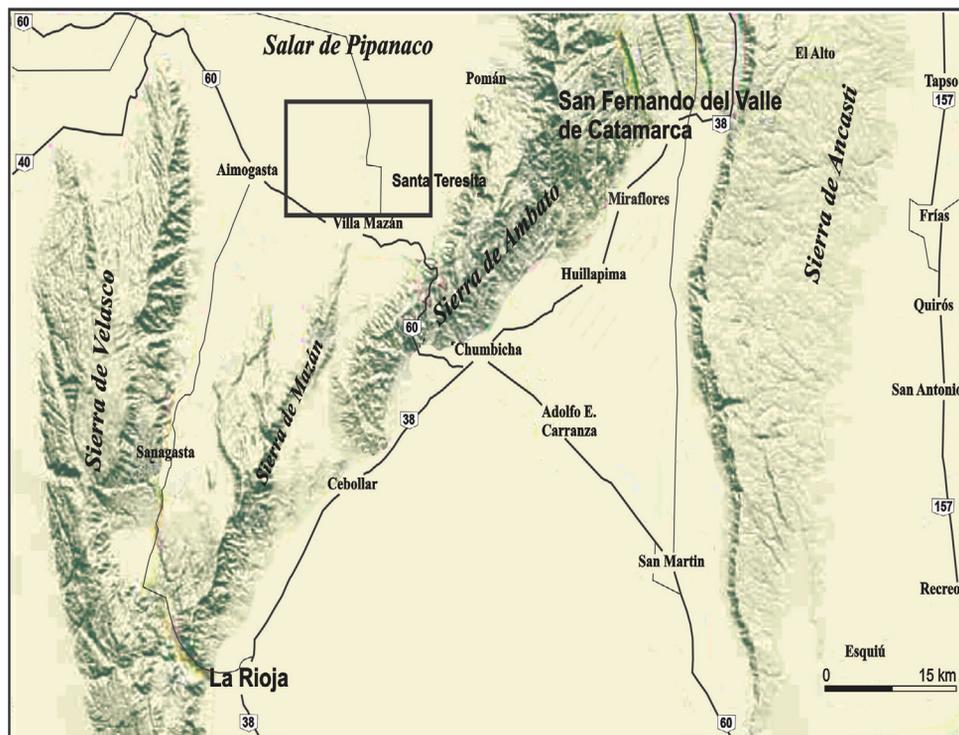


Figura 1. Mapa de ubicación. / Figure 1. Location Map.

Antecedentes de investigación

La existencia de aguas termominerales en la región analizada fue destacada por numerosos autores, entre los que se destacan los trabajos de Sosic (1973), en los que propone el ascenso de las aguas por fracturas y que de acuerdo al gradiente geotérmico determinado, provendrían de profundidades entre los 600 y 650 m.

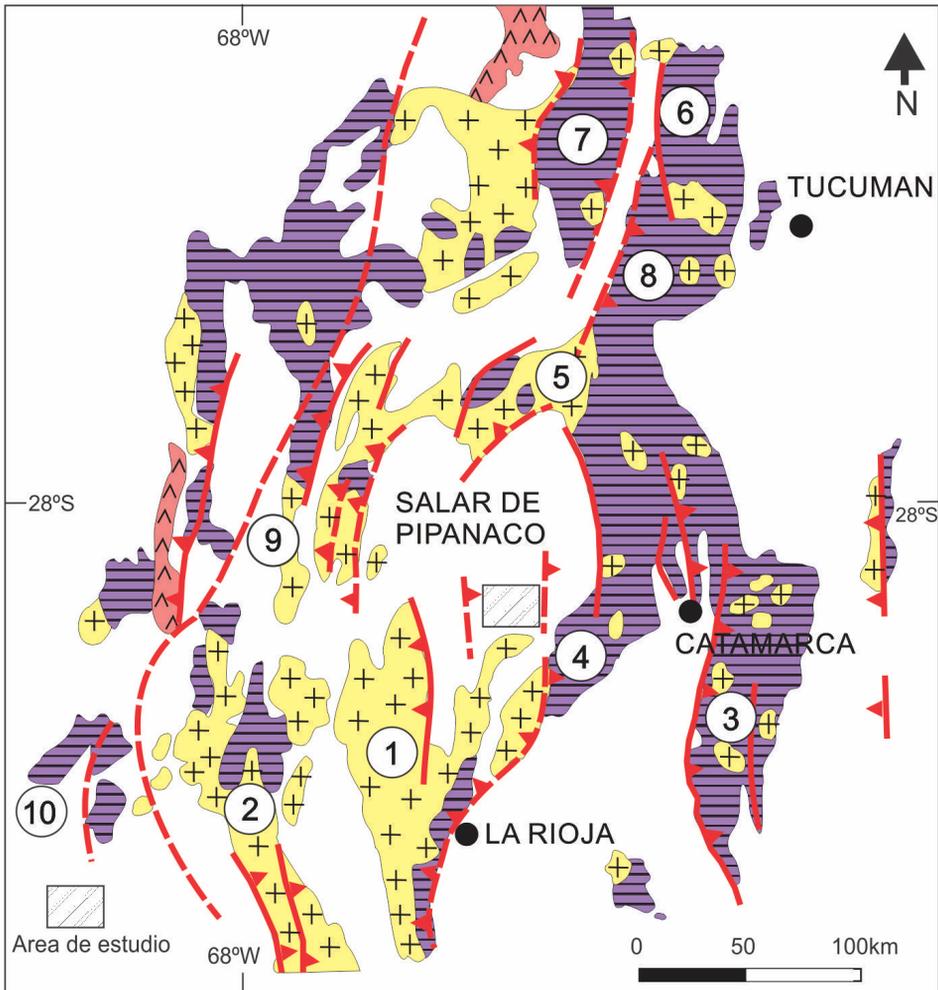
Zambrano y Torres (1996) confeccionaron el mapa hidrogeológico de la provincia de La Rioja y describen las principales características de cada cuenca. Con posterioridad, Mamani *et al.* (2000) estudian la distribución de resistividades eléctricas en la región de Santa Teresita, mediante la realización de sondeos magnetotéluricos profundos.

En el año 2003, Pesce y Miranda realizaron estudios sobre algunas características de las aguas termales de Santa Teresita.

La consultora Conhidro y otros organismos estatales (2013) propusieron un modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Pipanaco, contemplando todos aquellos factores que contribuyen a la dinámica de las aguas subterráneas.

Posteriormente, Giménez *et al.* (2014) analizan la cuenca de Pipanaco con el fin de entender su geometría, vinculación con las sierras vecinas y producir un modelo gravimétrico que refleje la realidad geológica.

Moreno (2015) realiza su tesina de grado en la carrera de Geología sobre termalismo en el área de Santa Teresita, en lo que constituye el aporte más completo y reciente sobre el tema.



1) Sierra de Velasco, 2) Sistema de Famatina, 3) Sierra de Ancasti, 4) Sierra de Ambato, 5) Batolito de Capillitas, 6) Cumbres Calchaquíes, 7) Sierras de Quilmes, 8) Sierras del Aconquija, 9) Sierra de Fiambalá, 10) Sierras de Toro Negro y Cumichango (Adaptado de Caminos, 1979).

Figura 2. Mapa de ubicación del Salar de Pipanaco / **Figure 2.** Location map of Pipanaco Salt.

Fisiografía

El área de Santa Teresita forma parte del área distal o cierre sur del Salar de Pipanaco, una extensa depresión tectónica circundada por cordones montañosos y abierta parcialmente hacia el sudeste (figura 2).

Este salar está cerrado al oeste parcialmente por las Sierras de Zapata, Fiambalá y Vinquis; al este por la Sierra de Ambato-Manchao; al norte por las estribaciones australes de las sierras de Aconquija, Belén, Capillitas y otros cerros menores y al sur por las sierras de Velasco y Mazán.

Presenta una red de drenaje con diseño centripeto en sus sectores norte, oeste y este; mientras que al sur, el río Salado o Abaucán se constituye ocasionalmente en el desagüe superficial de los excedentes de aguas de la cuenca, razón por la cual es considerada de tipo semiendorreica. Presenta un régimen permanente y es el principal colector fluvial de la región. Tiene sus nacientes en el valle de Fiambalá - Tinogasta (Catamarca) y desemboca en los Llanos Riojanos, en el departamento Capital.

Los ríos y arroyos que se originan en las sierras circundantes son de régimen transitorio, siendo algunos de ellos afluentes del río Salado o Abaucán.

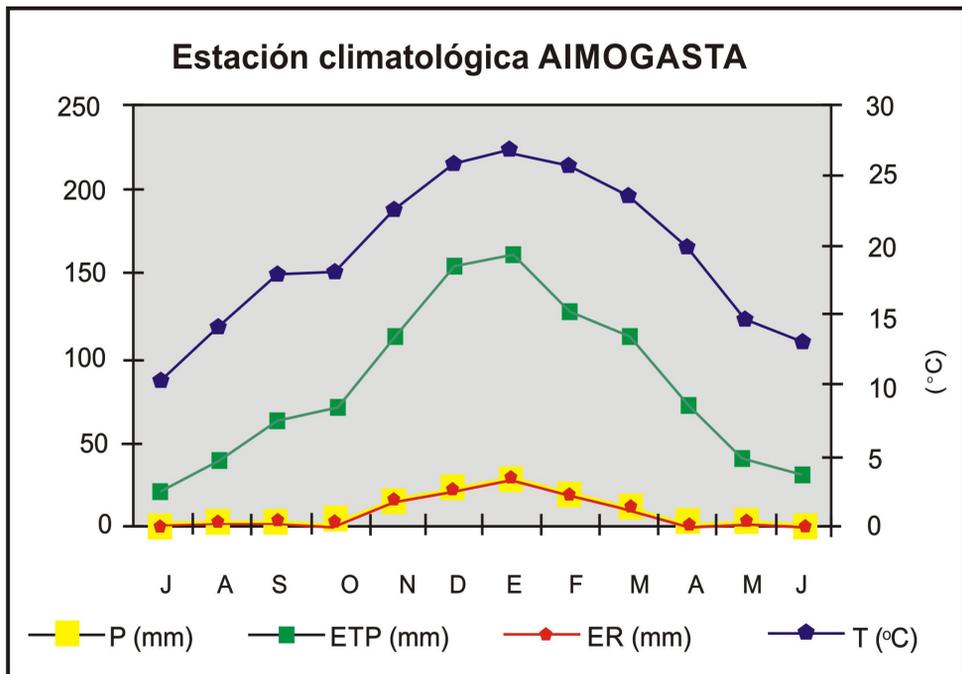


Figura 3 . Balance hidrológico/ Figure 3 . Hydrologic Balance.

Clima

El clima de la región corresponde a un tipo continental seco, árido a templado, con escasas lluvias de Octubre a Marzo y más frecuentes de Diciembre a Febrero, sin superar los 250 mm anuales. La temperatura media anual es de 19°C, con máximas de 45°C y mínimas de

8°C. Presenta una elevada evapotranspiración, lo que produce un déficit hídrico en todo el año.

Las lluvias son generalmente torrenciales y localizadas, con alta variabilidad tanto estacional como interanual.

La estación seca se extiende de 7 a 9 meses, si se consideran aquellos meses donde las precipitaciones no superan los 5 mm mensuales. La estación húmeda comienza en octubre y se prolonga hasta marzo y, en general, no hay sequías prolongadas que la interrumpan (figura 3-Balance hidrológico)

El tipo climático determinado según la clasificación de Köppen (1941) es BSh: Clima continental seco, semiárido con inviernos secos no rigurosos y con temperatura media anual mayor a 18°. El balance hidrológico determinado para la localidad de Aimogasta, permitió estimar una ETP de 1004 mm/año y un déficit de 904 mm/año. La ETR resultante del Balance Hídrico es igual al valor de la precipitación, que es de 101 mm/año.

Geología del área

El sector considerado pertenece a la Provincia Geológica de las Sierras Pampeanas Orientales (Caminos 1979), caracterizada por presentar núcleos montañosos constituidos por rocas del basamento cristalino, que presentan bloques fallados limitados por fracturas de ángulo alto y de extensión regional (figura 4).

La amplia depresión del Salar de Pipanaco en el sector estudiado estaría conformada por varios escalones tectónicos hundidos del basamento cristalino, controlados por fallas inversas de orientación Norte-Sur (Caminos *op cit.*)

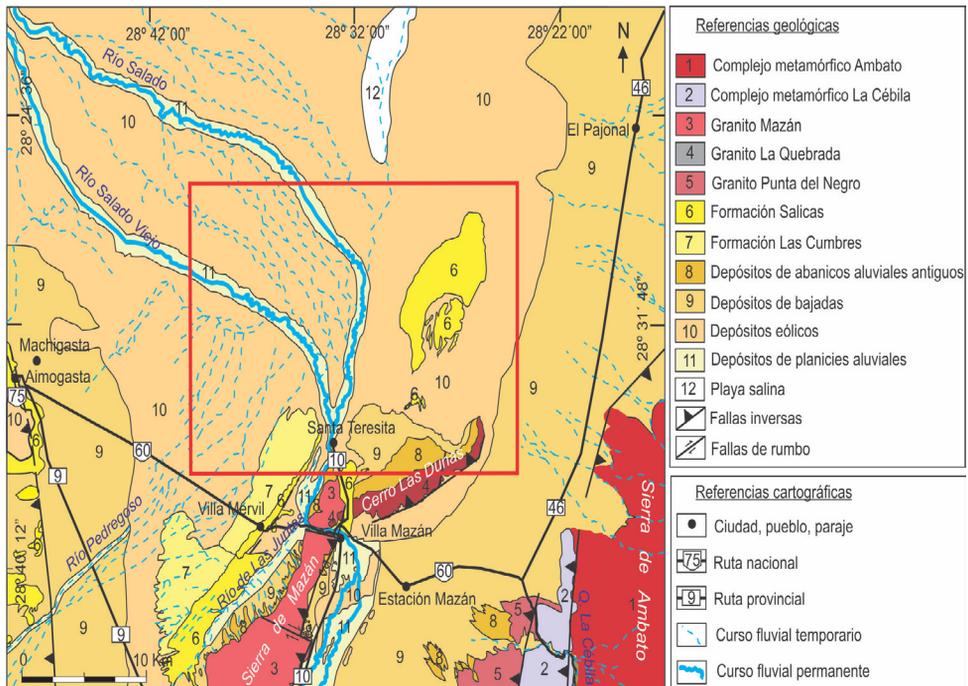


Figura 4. Mapa Geológico/ Figure 4. Geological Map.

En el sector que abarca nuestra zona de estudio, entre las unidades geológicas que lo conforman, se destacan el Complejo Metamórfico Ambato, constituido por rocas de bajo a alto grado metamórfico, con una edad Cámbrico medio, según Larrovere *et al.* (2012).

Luego el Complejo Metamórfico La Cébila está formado por rocas metamórficas de grado bajo a medio. González Bonorino (1951) y Espizúa y Caminos (1979) definen a estas litologías como Formación La Cébila en la quebrada homónima entre las Sierras de Velasco y Ambato y le asignan una edad que va desde el Ordovícico inferior a medio. Verdecchia (2009) denominó recientemente a esta formación como Complejo Metamórfico La Cébila.

Integran también el basamento cristalino los Granitos Mazan, La Quebrada y Punta del Negro, constituidos por granitos porfídicos, equigranulares. Pankhurst *et al.* (2000) asignan una edad ordovícica inferior a los granitos Mazán y La Quebrada e igual edad pero con dudas, al granito Punta del Negro.

La extensa cubeta sedimentaria desarrollada al pie de las sierras y que forma el cierre sur del Salar de Pipanaco está cubierta por areniscas y limolitas agrupadas como Formación Salicas de edad Mioceno tardío y conglomerados, fanglomerados, gravas y arenas reunidos bajo el nombre de Formación de Las Cumbres, de edad Plio-Pleistoceno (Sosic, 1973).

En diversos sectores de la zona estudiada se reconocen extensos campos de médanos y mantos de arena que limitan con depósitos gruesos de los conos aluviales coalescentes que se originan en los piedemontes serranos y que constituyen la clásica geoforma de la bajada. El límite entre ambas unidades está dado por un marcado cambio en la pendiente topográfica.

Hidrología Subterránea

El área de Santa Teresita forma parte del extremo sur de la Cuenca Hidrogeológica del Salar de Pipanaco, que con una extensión de 9.000 km², pertenece a la Provincia Hidrogeológica de Valles Intermontanos de las Sierras Pampeanas (Sosic *op cit.*). Limita al este, sureste y sur con la Sierra de Mazán, al oeste con una zona de fallas y afloramientos terciarios, que la separan del piedemonte nororiental de la Sierra de Velasco. Los bordes noreste y norte están dados por los cordones montañosos de las Sierras Pampeanas en territorio catamarqueño.

En la zona se han realizado numerosas perforaciones para la provisión de agua, de las cuales se tiene muy poca información sobre las características geológicas e hidrogeológicas del subsuelo del área (Zambrano y Torres, 1996).

Características hidrogeológicas de las unidades litoestratigráficas

A partir de los tipos de porosidad y permeabilidad de las unidades litoestratigráficas del área, sean estas de tipo intergranular (primaria) o por fracturación o diaclasamiento (secundaria) se propone la existencia de tres unidades hidrolitológicas con características particulares, a saber:

- Basamento hidrogeológico: comprende a rocas compactas, impermeables excepto donde presentan fisuras u otros espacios porales secundarios. Integran el basamento resistivo las rocas metamórficas de las Sierras de Ambato y del Complejo Metamórfico La Cébila y las rocas intrusivas presentes en dicho basamento como ser los granitos Mazán, La Quebrada y Punta del Negro. Esta unidad resistiva es generalmente acuífuga. Cuando estas rocas están fisuradas, las fracturas generalmente se cierran a pocos metros bajo la superficie. En estas zonas se puede acumular agua subterránea, que da origen a acuíferos misceláneos.

- Acuíferos miocénicos y pleistocénicos: compuestos principalmente por alternancias de sedimentitas clásticas continentales, areniscas, conglomerados finos y limo-arcilitas pertenecientes a las formaciones Salicas y Las Cumbres.

Los acuíferos desarrollados en esta unidad contienen por lo general agua mineralizada, que según información de perforaciones, resulta inapta para todo uso. Solamente en algunas zonas se han perforado acuíferos utilizables en estos terrenos. Por esta razón y salvo esta última excepción, esta unidad se reconoce en los sondeos geoelectrónicos por su alta conductividad.

En algunas localidades predominan en su constitución las texturas finas que le otorgan un comportamiento hidrogeológico de acuitardo. Son frecuentes las ocurrencias de abundante material evaporítico, sobre todo yeso, que salinizan sus aguas.

Acuíferos modernos Pleisto-holocénicos: comprenden los depósitos de las bajadas pedemontanas y abanicos aluviales de las sierras de Ambato, Mazán y Velasco. Están compuestos mayormente por bloques, gravas, arenas y limos arcillosos de baja a moderada selección. Los depósitos de las llanuras aluviales de ríos y arroyos que drenan las laderas de las sierras antes mencionadas, están conformados por arenas, gravas y limos arcillosos de moderada a buena selección. Como lo han revelado distintas perforaciones, presentan condiciones de semiconfinamiento y confinamiento de los acuíferos en ellos desarrollados.

Los depósitos eólicos se extienden ampliamente en las áreas pedemontanas de las sierras de Velasco y Mazán y sectores deprimidos entre cauces fluviales en el centro de la cubeta. Son de escasa potencia, como lo demuestran los registros de perforaciones consultados y están conformados por arenas y arenas limosas de buena selección. Ocasionalmente, pueden constituir acuíferos libres en la zona de interfluvios. Finalmente, los depósitos de barreales y de playas salinas, están constituidos por arenas finas y limos arcillosos con costras salinas importantes. Los acuíferos desarrollados en este tipo de materiales presentan aguas de mala calidad, inutilizables para todo uso.

En su gran mayoría, los acuíferos explotados o explotables de la región se localizan en las arenas y gravas porosas y permeables que constituyen los extensos depósitos de abanicos y llanuras aluviales, como las de los ríos Salado o Abaucán y Salado Viejo, en el sector oeste y central del área.

Piezometría de los acuíferos termales en Santa Teresita y alrededores

El mapa hidrogeológico con las curvas de isopiezas y las líneas de flujo subterráneo del sector estudiado (figura 5) se confeccionó a partir de información propia obtenida en sucesivas campañas durante los años 2013 y 2014 y de estudios hidrogeológicos previos (Tineo, 1981; Conhidro, 2013). Es posible observar que las perforaciones que captan acuíferos surgentes con manifestaciones termales son del orden de los 100 m de profundidad y se localizan en tres sectores dominantes: el área de Santa Teresita y su Complejo Termal al sur y dos ramales que coinciden con sendos derrames del río Salado con fuerte control estructural, de extensión noroeste y noreste, respectivamente. En el ramal noroeste, conocido como Los Médanos - Puesto El Arenal, se extiende por unos 12 km aproximadamente. El ramal noreste, conocido como El Palmar - Culanao, se extiende por unos 3-4 km, pudiéndose correlacionar con la última ocurrencia de aguas termales en el Puesto de Suri Yaco, distante unos 14 km de esta última.

En la zona de Santa Teresita, el Ejército Argentino realizó numerosas perforaciones entre los años 1940 y 1950. Las mismas tuvieron como objeto, posibilitar el arraigo de población en la región y fomentar el cultivo por medio de canales, en una zona con extensos campos de

arena, en un trazado paralelo a las vías del ferrocarril.

Se cuenta con muy poca información de las mismas aportada por el Instituto Provincial del Agua de La Rioja (IPALAR 2014) lo que refiere a los materiales geológicos atravesados, características del diseño de entubado y filtros, etc. Se pudieron determinar *in situ* los caudales espontáneos y las temperaturas de las aguas en boca de pozo, que varían entre 5 y 35 m³/h y 32,2 y 48,2 °C.

Los máximos niveles piezométricos corresponden a las perforaciones del área de Santa Teresita y su Complejo Termal, con valores de hasta + 7,00 msnt (740 y 700 msnm). En el sector de Los Médanos – Puesto El Arenal se registran valores entre +4,00 y +5,00 msnt (700 y 680 msnm). Para el sector El Palmar – Culanao, los niveles piezométricos vuelven a aumentar, en el orden de +5,00 a +7,00 msnt (690 y 680 msnm). En el paraje de Suri Yaco, la piezometría registra valores de +5,00 msnt (700 msnm).

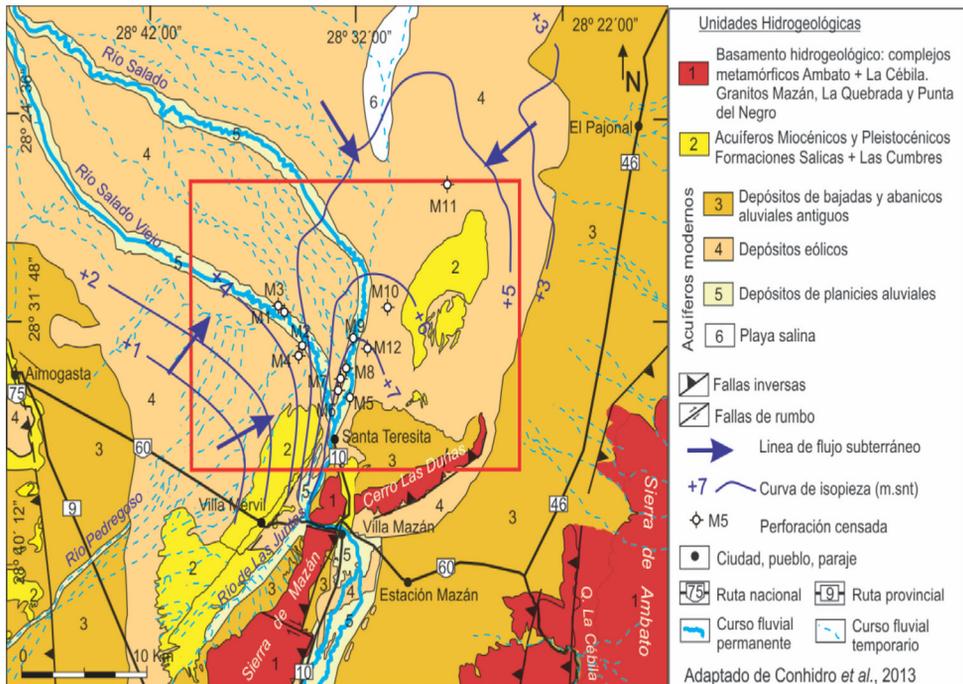


Figura 5 . Mapa hidrogeológico/ Figure 5 . Hydrogeological map.

La recarga de los acuíferos ocurre en el piedemonte oriental de la sierra de Velasco y occidental de la sierra de Ambato, principalmente a partir de las precipitaciones estivales en su sector cumbre.

El flujo subterráneo coincide a grandes rasgos con la pendiente regional del terreno, que para este sector que constituye el cierre sur del Salar de Pipanaco, presenta líneas de flujo subterráneo que se extienden al este y noreste de la sierra de Velasco y al oeste de la sierra de Ambato, en dirección al cauce del río Salado o Abaucán. Los acuíferos de naturaleza clásica y de edad cuaternaria y neógena, se recargan principalmente en la zona pedemontana de ambas sierras, en los abanicos aluviales y dunas escalantes y en la zona de llanura, a partir de la infiltración en suelos arenosos de campos de dunas y llanuras aluviales.

No obstante a esto, se propone la existencia de una recarga efectiva de los acuíferos que presentan anomalías termales a través de fracturas profundas, algunas ubicadas al pie de las

sierras y otras, que consideramos también efectivas, en la zona de llanura y que tendrían alguna conexión con las fracturas serranas, más profundas.

Evidencia de este fenómeno de recarga es la alineación observada en las manifestaciones termales en los sectores ya mencionados, donde todas las perforaciones coinciden con la posición de fallas inversas de dirección dominante norte-noreste y vergencia al este.

Este mecanismo de recarga profundo, explicaría los elevados valores de temperaturas de foco obtenidos por geotermómetros catiónicos para los acuíferos explotados en la región.

Captación de las aguas termales

Con el fin de analizar las características hidrogeológicas del área de estudio, se presenta una síntesis de 10 perforaciones surgentes y 2 vertientes (tabla 1), de los cuales, solo se pudo conseguir información detallada del perfil del subsuelo y constructivo del Pozo Los Médanos (M1). Las características más importantes de los pozos muestreados se detallan a continuación.

Pozo Los Médanos (M1): surgente termal entubado con caños de acero de 8".

Pozo Puesto Los Médanos (M2): surgente termal entubado con caños de acero de 8".

Pozo Puesto de Ávila (M3): surgente termal entubado con caños de acero de 8". Actualmente se lo utiliza para consumo humano y ganadero. El agua no utilizada se deja escurrir produciendo anegamiento se suelos.

Pozo Puesto El Arenal (M4): surgente termal entubado con caños de acero de 8". Las descargas de los pozos M1, M2 y M4 son transportadas por un canal de cemento subterráneo hasta la localidad de Santa Teresita para usos domiciliarios.

Pozo Piscina Hotel Termas de Santa Teresita (M5): surgente termal entubado con caños de acero de 6" que alimenta la piscina del hotel de Santa Teresita.

Pozo Parque Hotel Termas de Santa Teresita (M6): surgente termal entubado con caños de acero de 6", propiedad del Hotel Termas de Santa Teresita. Alimenta los servicios de agua potable, lavado y demás usos del hotel.

Pozo Antiguo Hotel Termas de Santa Teresita (M7): surgente termal entubado con caños de acero de 3". Es utilizado para uso humano y el excedente, escurre hasta formar una pequeña laguna.

Pozo Pueblo de Santa Teresita (M8): surgente termal entubado con caños de acero de 10". Por una reducción en boca de pozo, se conduce el agua hasta un tanque donde se almacenada y distribuye por medio de mangueras a los pobladores.

Pozo El Palmar 1 (M9): surgente termal entubado con caños de acero de 3". No se observó ninguna aplicación de sus aguas, derramándose hasta formar una pequeña laguna.

Pozo El Palmar 3 Sr. Pamelino (M10): surgente termal entubado con caños de acero de 3". Se utiliza para consumo humano y el excedente se almacena en una represa para el uso ganadero.

Vertiente Suri Yaco (M11): está ubicada en la cima de una pequeña loma que no supera los 5 m de altura. A su alrededor se construyó un pequeño refugio, el cual tiene una pileta que es alimentada con el agua de esta vertiente. La pileta tiene una descarga a través de un caño por un extremo de la loma, perdiéndose la descarga en los médanos. En la actualidad constituye un puesto ganadero transitorio.

Vertiente Culanao (M12): ubicada a la orilla de un camino de tierra esta vertiente acumula su agua en una pequeña laguna.

Puntos	Coordenadas geográficas		Caudales (m ³ /h)
	Latitud	Longitud	
M1 (S)	28° 34' 05,9"	66° 34' 28,4"	22
M2 (S)	28° 33' 43,8"	66° 34' 35,2"	18
M3 (S)	28° 33' 35,7"	66° 34' 39,7"	3
M4 (S)	28° 34' 12,8"	66° 34' 36,8"	34
M5 (S)	28° 35' 48"	66° 32' 55,5"	25
M6 (S)	28° 35' 47,8"	66° 32' 56,4"	25
M7 (S)	28° 35' 42,7"	66° 33' 00,9"	5
M8 (S)	28° 35' 36,1"	66° 32' 59,6"	S/D
M9 (S)	28° 33' 48,8"	66° 31' 45,8"	12
M10 (S)	28° 33' 10,4"	66° 31' 23,5"	11
M11 (V)	28° 27' 25,6"	66° 27' 28,6"	S/D
M12 (V)	28° 33' 59"	66° 31' 28"	S/D

Referencias	
Pozos surgentes	(S)
Vertientes	(V)

S/D= sin datos

Tabla 1 . Síntesis de perforaciones y vertientes/ Table 1 . *Synthesis wells and springs.*

Hidrogeoquímica

Se consideraron 12 análisis físico- químicos de muestras de agua subterráneas, especialmente seleccionadas, de las cuales solo se analizaron los elementos mayoritarios. Los resultados obtenidos, basados en un único criterio técnico metodológico, posibilitaron obtener datos confiables, tanto por las técnicas de muestreo utilizadas como por las metodologías de determinación del laboratorio de análisis (Tecnosuelos 2014).

Todas las técnicas y procedimientos empleados en este trabajo para la toma de muestras y los análisis químicos de las aguas subterráneas en laboratorio, se basan en los métodos empleados por el U.S. *Geological Survey* (1979, 1999) y por el Comité Conjunto de la *American Public Health Association*, *American Waterworks Association* y *Water Pollution Control Federation* (1963).

Los procedimientos normalizados de acuerdo con pautas establecidas por la U.S. *Environmental Protection Agency* (1993 a y b), que fueron los aplicados en este trabajo, son los siguientes:

Las concentraciones de los elementos químicos mayoritarios, en conjunto con los parámetros físicos – químicos que definen la composición y características de las muestras de aguas subterráneas, son consignados en las tablas 2, 3 y 4, para una mejor interpretación de los resultados, resaltando los valores extremos de cada una de las propiedades.

Se determinaron los elementos mayoritarios Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺, CO₃²⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ y los parámetros temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos solubles. A partir de estas determinaciones se calcularon los índices de razón de adsorción de sodio (RAS),

Cationes Mayoritarias												
Puntos	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas geográficas		Na ⁺		Ca ⁺²		Mg ⁺²		K ⁺	
	X	Y	Latitud	Longitud	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)
M1	6840618	3443864	28° 34' 05,9"	66° 34' 28,4"	8,23	189	0,53	11	0,1	1	0,97	38
M2	6841297	3443676	28° 33' 43,8"	66° 34' 35,2"	9,15	213	0,71	14	0,13	2	1,01	39
M3	6841546	3443552	28° 33' 35,7"	66° 34' 39,7"	6,86	158	1,07	21	0,21	3	0,78	31
M4	6840404	3443637	28° 34' 12,8"	66° 34' 36,8"	5,41	124	0,28	6	0,07	1	0,59	23
M5	6837486	3446403	28° 35' 48"	66° 32' 55,5"	5,02	116	0,36	7	0,09	1	0,55	22
M6	6837492	3446379	28° 35' 47,8"	66° 32' 56,4"	6,04	139	0,32	6	0,1	1	0,7	27
M7	6837648	3446256	28° 35' 42,7"	66° 33' 00,9"	5,06	116	0,4	8	0,09	1	0,54	21
M8	6837852	3446290	28° 35' 36,1"	66° 32' 59,6"	5,75	132	0,35	7	0,12	1	0,71	28
M9	6841164	3448281	28° 33' 48,8"	66° 31' 45,8"	4,62	106	0,28	6	0,08	1	0,5	20
M10	6842349	3448882	28° 33' 10,4"	66° 31' 23,5"	4,48	103	0,28	6	0,08	1	0,52	20
M11	6852990	3455227	28° 27' 25,6"	66° 27' 28,6"	5,86	135	0,27	5	0,09	1	0,68	27
M12	6840853	3448766	28° 33' 59"	66° 31' 28"	4,02	92	0,22	4	0,08	1	0,44	17

Aniones Mayoritarios												
Puntos	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas geográficas		HCO ₃ ⁻		CO ₃ ⁻²		Cl ⁻		SO ₄ ⁻²	
	X	Y	Latitud	Longitud	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)
M1	6840618	3443864	28° 34' 05,9"	66° 34' 28,4"	1,63	99	0,35	11	4,57	162	3,28	157
M2	6841297	3443676	28° 33' 43,8"	66° 34' 35,2"	1,98	121	0,26	8	5,16	183	3,7	178
M3	6841546	3443552	28° 33' 35,7"	66° 34' 39,7"	2,07	126	0,1	3	4,45	158	2,3	110
M4	6840404	3443637	28° 34' 12,8"	66° 34' 36,8"	1	61	0,94	28	2,5	89	1,91	92
M5	6837486	3446403	28° 35' 48"	66° 32' 55,5"	0,95	58	0,89	27	2,37	84	1,81	87
M6	6837492	3446379	28° 35' 47,8"	66° 32' 56,4"	1,46	89	0,58	17	3,04	108	2,08	100
M7	6837648	3446256	28° 35' 42,7"	66° 33' 00,9"	0,98	60	0,9	27	2,38	85	1,83	88
M8	6837852	3446290	28° 35' 36,1"	66° 32' 59,6"	1,49	91	0,5	15	2,93	104	2,01	96
M9	6841164	3448281	28° 33' 48,8"	66° 31' 45,8"	1,3	79	0,84	25	1,61	57	1,73	83
M10	6842349	3448882	28° 33' 10,4"	66° 31' 23,5"	1,54	94	0,63	19	1,5	53	1,69	81
M11	6852990	3455227	28° 27' 25,6"	66° 27' 28,6"	2,72	166	0,41	12	2,18	77	1,59	76
M12	6840853	3448766	28° 33' 59"	66° 31' 28"	1,21	74	0,58	17	1,27	45	1,7	82

Referencias	Valores máximos	
	Valores mínimos	

Tabla 2 . Síntesis de información hidroquímica/ **Table 2 .** Summary of hydrochemical information.

porcentaje de sodio intercambiable y carbonato de sodio residual, parámetros estos sumamente útiles para determinar aptitud de aguas con fines agrícolas.

Los valores obtenidos de análisis en laboratorio se representaron en diferentes gráficos para su mejor interpretación, a la vez que estos, nos permiten clasificar las aguas, estudiar su evolución y determinar sus aptitudes para distintos usos (figura 6).

La media determinada de sólidos solubles para pozos surgentes es de 293,5 mg. L-1 y la máxima de 447 mg. L-1 para la perforación de Los Médanos (M1). En las vertientes la media es de 264 mg.L-1 y la máxima de 342 mg. L-1 para Suri Yaco (M11). Todas las aguas están dentro de las normas del Código Alimentario Argentino (1995), el cual establece un máximo de 1.500 mg. L-1 de sólidos solubles para consumo humano.

La dureza para los pozos surgentes tiene una media de 28 mg. L-1 y una máxima de 64 mg.L-1 en el pozo del Puesto de Ávila (M3). Para las vertientes el promedio es de 16 mg. L-1 y la máxima de 18 mg. L-1 para Suri Yaco (M11). A estas aguas se las clasifica como blandas de acuerdo con U.S. Geological Survey (1979).

La conductividad eléctrica media para los pozos surgentes es de 546 μ S/cm, con máximo de 912 μ S/cm y mínimo de 223 μ S/cm. En las vertientes se determinó una media de 592,5 μ S/cm, con máximo de 810 μ S/cm y mínimo de 375 μ S/cm, lo que infiere una mineralización media a importante, condicionando su uso en riego e industria.

Los valores de pH determinados en perforaciones varían entre 7,98 a 9,42 con una media de 8,78 y para las vertientes de 9,27 a 9,37 con una media de 9,32. Con estos valores existe un predominio del ion bicarbonato disuelto en las aguas subterráneas.

DIAGRAMA DE PIPER HILL LANGELIER

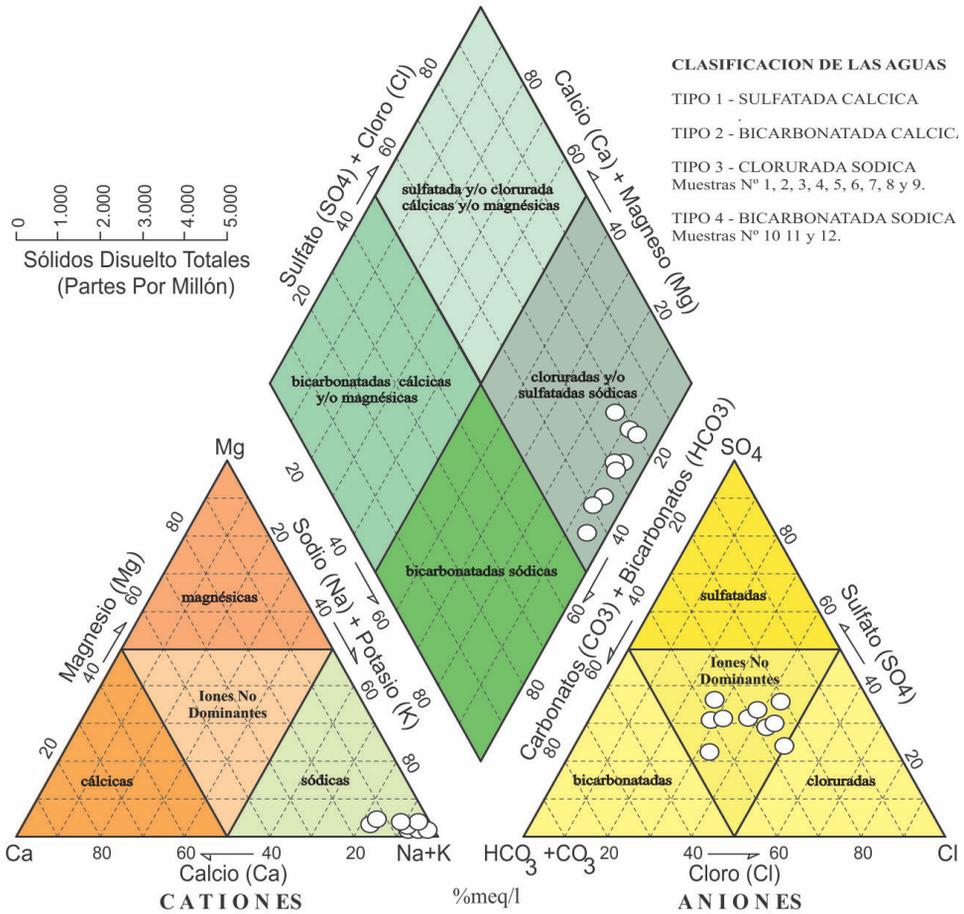


Figura 6 . Diagrama de Piper Hill Langelier / Figure 6 . Piper Hill Langelier diagram.

Se han determinado valores de bicarbonatos en perforaciones de 88 mg. L-1, con máximo de 126 mg. L-1 y mínimo de 58 mg. L-1. En las vertientes el máximo determinado es 166 mg. L-1 y el mínimo 74 mg. L-1.

Los acuíferos de Santa Teresita presentan una elevada concentración de sulfato debido a la presencia de capas de yeso en niveles terciarios, el cual disminuye hacia niveles superiores de la misma edad debido a la presencia de nódulos y no de capas. El cloruro se asocia a los sulfatos como integrante de las capas de yeso, tal como pudo observarse en afloramientos de las formaciones Salicas y La Cumbres y depósitos más jóvenes.

En perforaciones surgentes la media de sulfatos es de 107mg L-1, con extremos de 178mg. L-1 y 81mg. L-1 respectivamente. Para los cloruros se ha determinado una media 108mg. L-1 y extremos de 183 mg. L-1 y 53 mg. L-1. De acuerdo a los valores de estos iones podemos establecer que las aguas de esta zona son aptas para consumo humano.

A partir de la evidencia en los diferentes diagramas, podemos definir que las aguas de

Propiedades físico - químicas								
Puntos	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas geográficas		pH	Conductividad a 25 °C (µS/cm)	Sólidos solubles (mg/L)	Dureza total (mg/L CaCO ₃)
	X	Y	Latitud	Longitud				
M1	6840618	3443864	28° 34' 05,9"	66° 34' 28,4"	8,44	912	447	31,5
M2	6841297	3443676	28° 33' 43,8"	66° 34' 35,2"	8,1	876	437	42
M3	6841546	3443552	28° 33' 35,7"	66° 34' 39,7"	7,98	690	343	64
M4	6840404	3443637	28° 34' 12,8"	66° 34' 36,8"	9,15	505	259	17,5
M5	6837486	3446403	28° 35' 48"	66° 32' 55,5"	9,38	520	342	22,5
M6	6837492	3446379	28° 35' 47,8"	66° 32' 56,4"	9,42	492	242	21
M7	6837648	3446256	28° 35' 42,7"	66° 33' 00,9"	8,66	223	208	24,5
M8	6837852	3446290	28° 35' 36,1"	66° 32' 59,6"	8,62	453	267	23,5
M9	6841164	3448281	28° 33' 48,8"	66° 31' 45,8"	9	404	210	18
M10	6842349	3448882	28° 33' 10,4"	66° 31' 23,5"	8,94	390	180	18
M11	6852990	3455227	28° 27' 25,6"	66° 27' 28,6"	9,37	810	342	18
M12	6840853	3448766	28° 33' 59"	66° 31' 28"	9,27	375	187	15

Referencias	Valores máximos	
	Valores mínimos	

Tabla 3 . Propiedades físico – químicas (pH, conductividad, sólidos solubles, dureza total)/ **Table 3 .** *Physical - chemical properties (pH, conductivity , soluble solids , total hardness).*

perforaciones surgentes para el Sistema Acuífero Termal en el área de estudio, muestran una clara evolución química, ya que indican una composición predominantemente clorurada y/o sulfatada sódica. Esto puede ser resultado de que la distancia al área de recarga está muy lejana y en donde la concentración de cloruros y sulfatos se ha ido incrementando, a la vez que los carbonatos han evolucionado de forma inversa, o también es producto de un mayor tiempo de interacción agua – roca.

Propiedades físico - químicas							
Puntos	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas geográficas		RAS	% Na ⁺ (%)	Na ₂ CO ₃ Res.
	X	Y	Latitud	Longitud			
M1	6840618	3443864	28° 34' 05,9"	66° 34' 28,4"	14,63	83,79	1,36
M2	6841297	3443676	28° 33' 43,8"	66° 34' 35,2"	14,1	83,42	1,39
M3	6841546	3443552	28° 33' 35,7"	66° 34' 39,7"	8,54	76,85	0,87
M4	6840404	3443637	28° 34' 12,8"	66° 34' 36,8"	12,35	85,02	1,55
M5	6837486	3446403	28° 35' 48"	66° 32' 55,5"	10,86	83,72	1,42
M6	6837492	3446379	28° 35' 47,8"	66° 32' 56,4"	13,84	85,07	1,64
M7	6837648	3446256	28° 35' 42,7"	66° 33' 00,9"	10,28	83,44	1,4
M8	6837852	3446290	28° 35' 36,1"	66° 32' 59,6"	12,36	83,55	1,56
M9	6841164	3448281	28° 33' 48,8"	66° 31' 45,8"	10,55	83,97	1,75
M10	6842349	3448882	28° 33' 10,4"	66° 31' 23,5"	10,26	83,58	1,8
M11	6852990	3455227	28° 27' 25,6"	66° 27' 28,6"	14,42	85,32	2,79
M12	6840853	3448766	28° 33' 59"	66° 31' 28"	10,66	85,11	1,5

Referencias	Valores máximos	
	Valores mínimos	

Tabla 4 . Propiedades físico – químicas (RAS, % Na⁺, Na₂CO₃)/ **Table 4 .** *Physical - chemical properties (RAS, % Na⁺, Na₂CO₃).*

Para este trabajo, puede apreciarse que las aguas de perforaciones surgentes, se ubican en el campo de “Potables”, según normas de calidad establecidas por la U.S. Environmental Protection Agency (1982) y el Código Alimentario Argentino (*op cit.*).

Geotermalismo

En Santa Teresita, en un acto de desconocimiento o desidia, miles de litros de aguas termales de buena calidad son dejados fluir a diario de manera descontrolada, atentando contra la calidad y cantidad del recurso hídrico subterráneo. Es por ello que este trabajo, a partir del abordaje del origen, distribución, comportamiento y potencialidad del recurso geotermal, plantea un modelo hidrogeológico conceptual que permita el aprovechamiento racional y sustentable del mismo.

Estudios geofísicos recientes mediante la aplicación de sondeos eléctricos verticales, llevados a cabo por la consultora Conhidro (2013), permitieron diferenciar una serie de depresiones tectónicas para el sector sur del Salar de Pipanaco, entre la sierras de Velasco y Ambato, conformadas por grabens y *horst* elongados en sentido norte-sur. Estos estudios destacan la presencia de un pilar tectónico emergido de rocas de basamento en el centro de la sección aludida, correspondiente a la sierra de Mazán y que oficia de divisoria local de los flujos de aguas subterráneas.

Basados en información proporcionada por esta consultora, se determinó para el área de Santa Teresita un potente relleno sedimentario con formaciones geológicas de edades que varían desde el Mioceno hasta la actualidad.

Estas formaciones por su génesis, poseen características litológicas muy variables, siendo en muchos casos similares entre sí, dificultando incluso su reconocimiento en las perforaciones que las han atravesado. Esta variación facial, además de la similitud en los paleoambientes en los que se depositaron, hacen sumamente difícil la identificación exacta de cada formación por métodos geofísicos.

Luego de establecer el modelo más acorde a las condiciones geológicas-geomorfológicas de la zona de estudio, Conhidro (*op cit.*) distingue cuatro unidades geoelectricas mayores que fueron denominadas, de arriba hacia abajo:

- Unidad 1 o Zona Resistiva a Semiresistiva Superior (sedimentos holocenos).
- Unidad 2 o Zona Semiconductiva (sedimentitas poco consolidadas plio/pleistocenas).
- Unidad 3 o Zona Conductiva Inferior (sedimentitas mio/pliocenas).
- Unidad 4 o Zona Resistiva Inferior (rocas del Basamento Cristalino).

Modelo Geotérmico Local y Sistema Geotérmico

Partiendo de la interpretación del subsuelo realizada por la consultora Conhidro (*op cit.*), se propone un “Modelo Geotérmico Local” (Moreno, 2015), donde el “Sistema Geotérmico” queda definido por:

- Zona de Recarga: desarrollada en el flanco oriental de la sierra de Velasco y occidental de la sierra de Ambato, constituye en conjunto el cierre austral de la Cuenca del Salar de Pipanaco. También se recarga a partir de los ríos que drenan la ladera oriental de la Sierra de Vínquis y meridional de Capillitas.

- Zona de Conducción: se la define en los niveles permeables del Terciario correspon-

dientes a las Formaciones Salicas y La Cumbres y unidades más antiguas, sumado a estructuras profundas correspondientes a fallas regionales y locales de alto ángulo que podrían estar conectadas hidráulicamente en profundidad.

- Zona de Almacenamiento: se genera en niveles terciarios permeables de las Formaciones Salicas y La Cumbres. También es posible una conducción más somera en los niveles arenosos y gravosos de los depósitos de abanicos aluviales, cauces actuales y paleocauces, llanuras de inundación e interfluvios ocupados por campos de dunas.

- Sello del Reservoirio Geotérmico: queda definido por niveles de arcilitas y limolitas arcillosas de variados espesores, que constituyen las Formaciones Salicas y La Cumbres.

- Zona de Descarga: se la define en el sector central del área de estudio, al norte de la sierra de Mazán, debido al calentamiento de las aguas subterráneas por terrenos profundos y un aumento progresivo de la presión de confinamiento.

- Fuente de Energía Calorífica: queda definido por un adelgazamiento cortical, generado por el proceso de subducción de las placas tectónicas, que generan un acercamiento de la Astenósfera hacia la superficie o el desarrollo de una pluma mantélica en niveles someros.

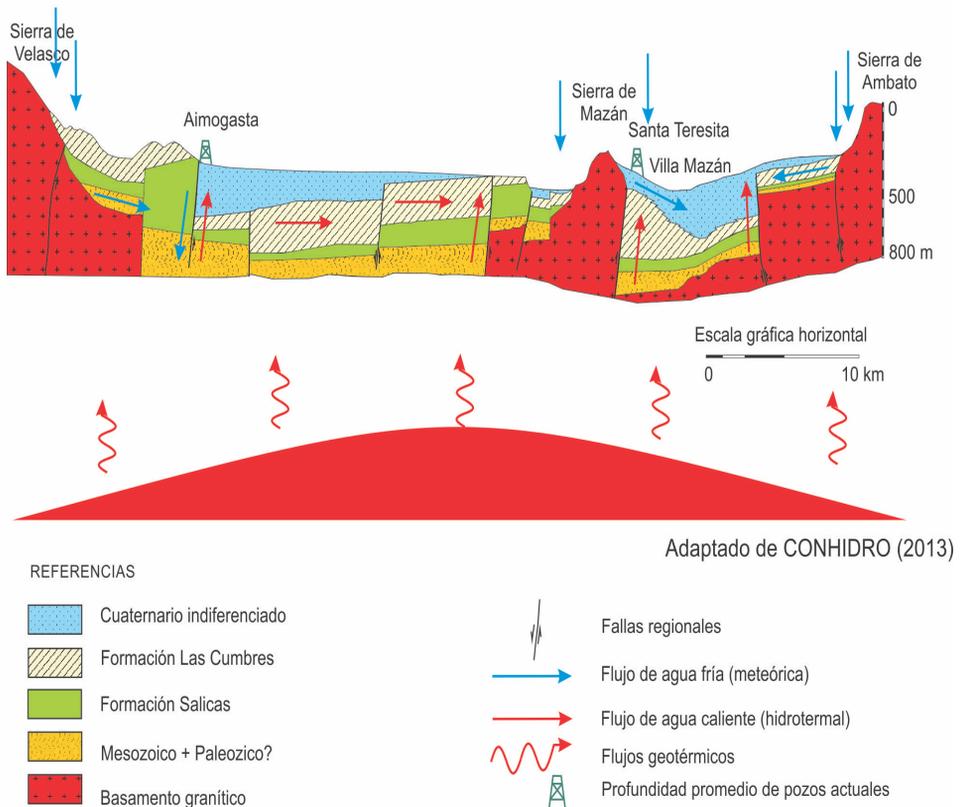


Figura 7 . Modelo geotérmico para el sector sur del Salar de Pipanaco/ **Figure 7 .** Geothermal model for the southern sector of the Pipanaco Salt.

El modelo geotérmico que se propone en este trabajo para el extremo norte de la sierra de Velasco, en Santa Teresita y áreas aledañas, está dominado por fracturas regionales profundas (fallas inversas de vergencia oriental y occidental), que limitan grandes bloques de basamento con su cobertura sedimentaria cenozoica (figura 7). Por estas fracturas infiltran las aguas meteóricas que precipitan en las sierras de Velasco y Ambato, más los aportes que provienen de los depósitos aterrazados, fluviales y eólicos que conforman el cierre sur del Salar de Pipanaco.

Los flujos subterráneos que circulan más profundamente a través de las fracturas regionales, se calientan adiabáticamente, hasta alcanzar temperaturas de foco de 232 °C en Suri Yaco y El Palmar. En su ascenso, pierden calor por contacto con las rocas de caja suprayacentes, más frías, y emergen con temperaturas en boca de pozo de hasta 48 °C en El Arenal.

La intersección de la superficie topográfica con el nivel piezométrico en zonas de descarga, ocasiona la formación de manantiales calientes como en Suri Yaco, Culanao o El Arenal.

Geotermómetros catiónicos

Definimos geotermómetros químicos como la relación entre los elementos químicos solubles en un fluido subterráneo y que aparecen en estado iónico en íntima relación y equilibrio químico con la roca que los contiene. Conociendo su composición y concentración nos pueden informar sobre la temperatura que originó los procesos de disolución y que es indicadora de la temperatura de foco del proceso geotérmico que le dio origen. Por esta razón, la composición química de las aguas termales que alcanzan la superficie, está determinada por las reacciones de interacción en un sistema agua – roca – gas, cuyos equilibrios se alcanzan a altas temperaturas. Las concentraciones de ciertos componentes reflejan la temperatura a la cual se alcanzó el equilibrio, lo cual es un indicador de la temperatura en profundidad (temperatura de foco o de reservorio).

Para poder definir estas temperaturas en el punto donde se tomó cada muestra y relacionarla a cada temperatura en boca de pozo, en este trabajo se utilizó el método isotópico de iones mayoritarios. Para ello se aplicaron los geotermómetros de relación Na - K - Ca de Fournier y Truesdell (1973) y Na - K - Ca con corrección por Mg de Fournier y Potter (1979), con un rango de 0 - 350 y un Beta = 1/3, con sus correspondientes R variables, a 12 muestras seleccionadas de perforaciones surgentes y vertientes.

- Geotermómetro Na- K- Ca (Fournier y Truesdell *op cit.*): este geotermómetro incluye al Ca²⁺, el cual es un elemento muy común aportado por minerales como calcita, plagioclasas y epidoto. Es recomendable y satisfactoria su aplicación para temperaturas de foco entre 100 y 300 °C, y se determina a partir de la ecuación:

$$T (\text{Na- K-Ca}) = [1.647 / ((\log \text{Na} / \text{Ca}) + \beta \times \log (\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}) + 2,24)] - 273,15$$

Geotermómetro Na - K - Ca / Mg (Fournier y Potter *op cit.*): permite estimar la temperatura del yacimiento hidrotermal a partir de la relación entre los cuatro cationes mayoritarios disueltos en aguas subterráneas. Para determinar la temperatura de la reacción de equilibrio es el más utilizado, preciso y apropiado para temperaturas de entre 4 y 340 °C. En conclusión, las temperaturas de las aguas medidas en boca de pozo varían entre 32 °C y 48 °C (tabla 5). La aplicación del geotermómetro Na-K-Ca / Mg, indica temperaturas de los focos que dan origen a este recurso en valores de 142 °C a 200 °C. En consideración al gradiente geotérmico local, se estima una profundidad de foco del orden de los 600 - 700 m.

Puntos	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas geográficas		Temperatura en boca de pozo (°C)	Cálculo de temperatura de foco (°C)			
	X	Y	Latitud	Longitud		K/Mg	Na/K	Na - K - Ca	Na - K - Ca/Mg
M1	6840618	3443864	28° 34' 05,9"	66° 34' 28,4"	45,4	10	278	231	200
M2	6841297	3443676	28° 33' 43,8"	66° 34' 35,2"	43,5	15	264	225	166
M3	6841546	3443552	28° 33' 35,7"	66° 34' 39,7"	32,2	21	274	218	142
M4	6840404	3443637	28° 34' 12,8"	66° 34' 36,8"	48,2	14	266	223	168
M5	6837486	3446403	28° 35' 48"	66° 32' 55,5"	39,7	14	269	221	168
M6	6837492	3446379	28° 35' 47,8"	66° 32' 56,4"	41,5	13	273	229	178
M7	6837648	3446256	28° 35' 42,7"	66° 33' 00,9"	44,3	15	262	217	167
M8	6837852	3446290	28° 35' 36,1"	66° 32' 59,6"	45	12	286	232	184
M9	6841164	3448281	28° 33' 48,8"	66° 31' 45,8"	36,3	15	268	221	161
M10	6842349	3448882	28° 33' 10,4"	66° 31' 23,5"	39,2	15	272	222	162
M11	6852990	3455227	28° 27' 25,6"	66° 27' 28,6"	37,8	13	277	232	176
M12	6840853	3448766	28° 33' 59"	66° 31' 28"	37,5	16	265	221	146

Referencias	Valores máximos	
	Valores mínimos	

Tabla 5. Temperaturas de foco por geotermómetros catiónicos / Table 5. Temperatures of focus cationic geothermometers.

Distribución espacial de la temperatura

En el mapa geotérmico de isoterma de boca de pozo se puede observar como aumentan estos valores de temperatura desde la vertiente de Suri Yaco al norte hacia las perforaciones ubicadas más al sur. Esto se aprecia para ambas ramas del río Salado o Abucacán.

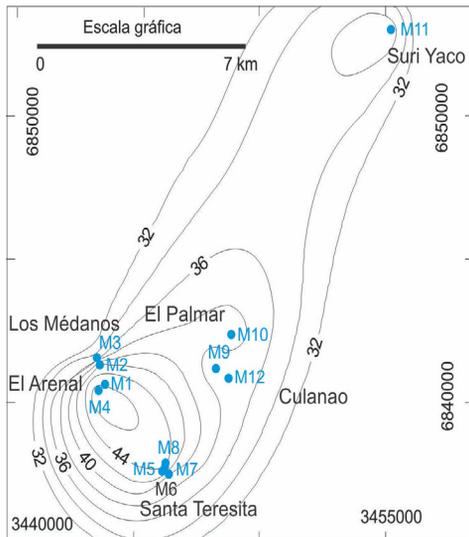


Figura 8 Isotemperaturas en boca de pozo (°C).

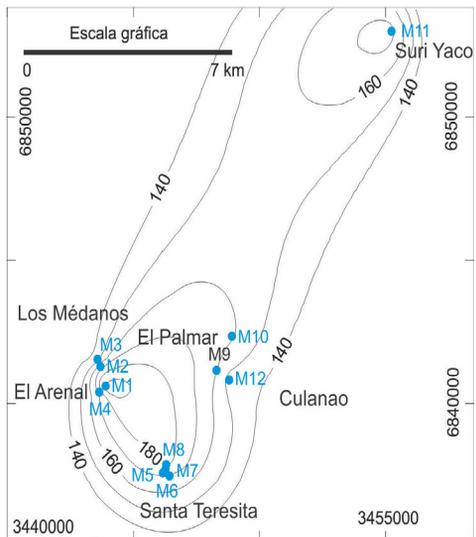


Figura 9 Isotemperaturas de foco, determinadas por geotermómetro de Na - K - Ca / Mg (°C).

Figura 8 y 9. Mapas de isotemperaturas en boca de pozo y de foco por geotermómetros / Figure 8 y 9. Maps isotemperaturas wellhead and focus on geothermometers.

En el mapa geotérmico de isotermoduras de foco se aprecia exactamente lo mismo que en la descripción anterior, en una precisa relación entre ambos (figura 8 y 9).

Este hecho podría obedecer a que las aguas subterráneas circular por sistemas de fracturas en el basamento que permiten su calentamiento profundo y posterior ascenso por las mismas fracturas o materiales acuíferos granulares, desde el centro de la cubeta al norte hasta posiciones más someras al sur de la región, en Santa Teresita.

Aplicaciones de la energía geotérmica

En el sector analizado se obtiene agua termal de baja entalpía (< 50 °C) mediante perforaciones y vertientes. Si bien los acuíferos explotados han demostrado ser una importante fuente de aguas termales de buena calidad, solo encuentran hoy aplicación para consumo humano, ganadero o turístico en balneoterapia.

Con inversiones apropiadas y una fuerte culturización de la importancia del recurso, se podría aumentar el uso de las actuales fuentes de aguas calientes a actividades como la piscicultura, horticultura, floricultura, secadero de frutas y verduras, y procesos de refrigeración.

La realización de perforaciones profundas que superen los 700 m, aprovechando el recurso natural existente, aumentaría la posibilidad de ampliar estas actividades.

Conclusiones

- En la localidad de Santa Teresita y sus alrededores, se han determinado anomalías termales de baja entalpía, tanto en vertientes como en perforaciones profundas que captan acuíferos surgentes con anomalías termales en del orden de los 100 m de profundidad. Las mismas se localizan en tres sectores dominantes: el área de Santa Teresita y su Complejo Termal al sur y dos ramales que coinciden con sendos derrames del río Salado con fuerte control estructural, de extensión noroeste (Ramal Los Médanos - Puesto El Arenal) y noreste (El Palmar - Culaño).

- Se determinaron *in situ* caudales espontáneos y temperaturas de las aguas en boca de pozo que varían entre 5 y 35 m³/h y 32,2 y 48,2 °C, y niveles piezométricos máximos en las perforaciones del área de Santa Teresita y su Complejo Termal, con valores de hasta + 7,00 m.s.n.t. (740 y 700 m.s.n.m.).

- Los acuíferos de edad cuaternaria y neógena se recargan por infiltración de agua de lluvias en el piedemonte de las sierras de Velasco y Ambato, en los abanicos aluviales y dunas escalantes y en suelos arenosos de los campos de dunas y llanuras aluviales de la llanura. El flujo subterráneo coincide a grandes rasgos con la pendiente regional del terreno, con líneas de flujo que se extienden al este y noreste de la sierra de Velasco y al oeste de la sierra de Ambato, en dirección al cauce del río Salado o Abaucán. Se propone para este trabajo la existencia de una recarga efectiva de los acuíferos con anomalías termales a través de fracturas regionales profundas que limitan grandes bloques de basamento con su cobertura sedimentaria cenozoica, algunas ubicadas al pie de las sierras y otras, que consideramos también efectivas, en la zona de llanura y que tendrían alguna conexión con las fracturas serranas, más profundas.

- Los acuíferos de Santa Teresita presentan una elevada concentración de sulfato debido a la presencia de capas de yeso en niveles terciarios. El cloruro se asocia comúnmente a los sulfatos como integrante de las capas de yeso.

- Se propone un modelo Geotérmico donde es posible diferenciar los siguientes com-

ponentes: zona de recarga, zona de conducción, zona de almacenamiento, sello del reservorio geotérmico, zona de descarga y fuente de energía calorífica.

- La aplicación del geotermómetro Na-K-Ca / Mg arroja temperaturas de focos que varían entre 142 °C y 200 °C. En consideración al gradiente geotérmico local, se estima una profundidad de foco del orden de los 600-700 m. En el sector analizado las manifestaciones termales son de baja entalpía (< 50 °C), tanto en perforaciones como en vertientes. Las aguas termales de Santa Teresita se utilizan para consumo humano, ganadero o turístico en balneoterapia.

- Inversiones apropiadas y una fuerte culturización de la importancia del recurso, podrían aumentar el uso de las actuales fuentes de aguas calientes a otras actividades como la piscicultura, horticultura, floricultura, secadero de frutas y verduras, y procesos de refrigeración, mediante la realización de perforaciones profundas que superen los 700 m, aprovechando el recurso natural existente, aumentaría la posibilidad de ampliar estas actividades.

Agradecimientos

Esta investigación fue desarrollada con fondos del Proyecto de Investigación 27A/520 “Estudios Hidrogeotermales en el sector centro-Norte de la Provincia de La Rioja y posibles aplicaciones de sus aguas termominerales de baja entalpía” de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de La Rioja”.

Referencias

- APHA, AWWA y WPCF. 1963. Métodos Estándar para el Examen de Aguas y Aguas Residuales. Editorial Interamericana S.A. Undécima Edición.
- Caminos, R. 1979. *Sierras Pampeanas Noroccidentales, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan*. Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba. 1: 225-291.
- Código Alimentario Argentino. 1995. *Calidad de aguas de bebida*. Ministerio de Salud de la Nación. 12°, E-243, DNPH. 5 pp.
- Conhidro S.R.L., IHLLA y DPH y ERH. 2013. [Estudio Hidrogeológico: modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Pipanaco. Versión Resumida. San Fernando del Valle de Catamarca, 68 pp. Informe Inédito.]
- Espizúa, S. y Caminos R. 1979. Las rocas metamórficas de la Formación La Cébila, Sierra de Ambato, provincias de Catamarca y La Rioja. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 53(1-2): 125-142.
- Föurnier, R.O. 1990. The interpretation of Na-K-Mg relations in geothermal waters. *Geothermal Resources Council Transactions*, 14 (2): 1421-1425.
- Föurnier, R.O. and Truesdell, A.H. 1970. Chemical indicators of subsurface temperature applied to hot spring waters of Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A. United Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa. *Geothermics Special Issue*, 2(2): 529-535.
- Föurnier, R.O. and Truesdell, A.H. 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim.* 37°: 1255-1275.
- Föurnier, R.O. and Potter R.W. 1979. Magnesium correction to Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochim. Cosmochim.* 43°: 1543-1550.
- González Bonorino, F. 1951. Una nueva formación precámbrica en el Noroeste Argentino. *Comunicaciones Científicas del Museo de La Plata* 5.
- Instituto Provincial del Agua de La Rioja (IPALAR). 2014. [Registros de perfiles litológicos de Santa Teresita. *Informe del Instituto Provincial del Agua de La Rioja*. La Rioja, 8 pp. Inédito].
- Larrovere, M.A., De Los Hoyos, C. y Grosse, P. 2012. Los complejos metamórficos del retro-arco Famatiniano (noroeste de Argentina): caracterización geoquímica e isotópica de sus protolitos e implicancias geotectónicas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(3): 676-695.
- Mamaní, M. et al. 2000. Termas de Santa Teresita, La Rioja. Resultados Geofísicos Magnetotelúricos. Un cuerpo Anómalo. UNLaR Ciencia. *Revista Científica de la Universidad Nacional de La Rioja*, 1(1): 2-11.

- Moreno, G. 2014. [Estudios hidrogeotermales en el área de Santa Teresita, Provincia de La Rioja. *Tesis de Grado de la carrera de Geología. Departamento Académico de Ciencias y Tecnologías Aplicadas a la Producción, al Ambiente y al Urbanismo.* Universidad Nacional de La Rioja, 164 pp. Inédita.]
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W. and Fanning, C.N. 2000. Age and origin of coeval TTG, I- and S-type granites in the Famatinian belt of NW Argentina. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 91: 151-168.
- Pesce, A. y Miranda, F. 2003. *Catálogo de manifestaciones termales de la República Argentina.* Eds. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. 36: 141-150.
- Sosic, M. 1973. Descripción geológica de la hoja 14e Salar de Pipanaco. *Servicio Nacional Geológico Minero.* Boletín, 137: 47 pp.
- Tecnosuelos. 2014. [Análisis químicos de perforaciones termales en el área de Santa Teresita, Provincia de La Rioja, Argentina. *Informe del Laboratorio de análisis de Suelos, Aguas y Plantas.* San Miguel de Tucumán, 20 pp. Inédito.]
- Tineo, A. 1981. Lineamientos Geológicos de la Cuenca Oriental de La Rioja, entre las Sierras de Velasco y las Sierras Bravas. *1º Simposio de Geología de La Rioja.* Acta Geológica Lilloana, 11(3): 18-24.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1982. Maximum contaminant levels (subpart B of part 141, *National interim primary drinking-water regulations*) U.S. Code of Federal Regulations. Title 40. Part 100 to 149: 315-316 pp.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1993(a) Subsurface Characterization and Monitoring Techniques. A desk reference guide Vol. I: Solids and Ground Water, App. A and B. EPA/625/R-93/003a.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1993(b) Subsurface Characterization and Monitoring Techniques. A desk reference guide Vol. II: The Vadose Zone, Field Screening and Analytical Methods, App. C and D. EPA/625/R-93/003b.
- U.S. Geological Survey. 1979. Methods for determination of inorganic substances in water and fluvial sediments. In M.W. Skougstad, M.J. Fishman, L.C. Friedrnan, D.E. Erdmann, y S.S. Duncan (Eds.) *U.S. Geol. Survey Techniques of Water-Resources Investigations.* Book 5, chapter A1, 626 pp.
- U.S. Geological Survey. 1999. Nutrients in the Nation's Water- too much of a good thing. National water-quality program. *U.S. Geol. Survey Techniques of Water-Resources Investigations.* C 1136, 14 p.
- Verdecchia, S. 2009. [Las metamorfitas de baja presión vinculadas al arco magmático Famatiniano: Las unidades metamórficas de la Quebrada de la Cébila y el borde oriental de la Sierra de Velasco. Provincia de La Rioja, Argentina. Tesis doctoral inédita. Universidad Nacional de Córdoba.]
- Zambrano, J. y Torres, E. 1996. [Hidrogeología de la Provincia de La Rioja. Catálogo de Recursos Humanos e Información Relaciona con la Temática Ambiental en la Región Andina Argentina. *Junta de Andalucía, Gobiernos y Universidades de la Región Andina Argentina.* <http://www.cricyt.edu.ar/ladyot/catalogo/cdandes/g0302.htm>.]

Recibido: 06 de Marzo del 2015

Aceptado: 11 de Mayo del 2015