

DETERMINACIÓN DE FLUJOS REGIONALES Y LOCALES DE LOS ACUÍFEROS ORIENTALES DE LA CIUDAD DE AREQUIPA EN BASE A DATOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS

Percy Sulca¹, Fluquer Peña¹ y Fabrizio Delgado¹

¹INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, psulca@ingemmet.gob.pe fpena@ingemmet.gob.pe

INTRODUCCION

La zona de estudio es la parte oriental de la ciudad de Arequipa, se encuentra entre las latitudes 16°10' y 16°30'S y las longitudes 71°10' y 71°40'E, hacia el oeste se encuentra el límite occidental de la Cordillera de los Andes y hacia el este se encuentra el inicio de la gran meseta altiplánica del sur del Perú. La geomorfología es variada, van desde piso de valle pasando por laderas moderadas, elevaciones con presencia de volcanes activos y altiplanicies donde se ubica la laguna Salinas, en general conformada por rocas volcánicas. Esta configuración constituye un sistema hidrogeológico complejo de origen volcánico y con discontinuidades tectónicas.

En los sectores de Characato y Chiguata se observa grandes manifestaciones de los acuíferos, mediante manantiales que afloran en forma natural, muchos de ellos con caudales superiores a 200 l/s (Cuadro 1). Actualmente el manantial Bedoya de 220 l/s, cubre el suministro de agua potable a la zona sureste de la ciudad de Arequipa, las aguas del manantial Yumina, Ojo de Characato y 3 sondeos verticales, se usan para el desarrollo de extensas aéreas agrícolas y zonas recreativas del sector de Characato y Sabandia, otros manantiales con menor caudal pero también de igual importancia afloran en los alrededores de Chiguata, Polobaya, Pocsi y Yarabamba.

Para determinar la procedencia de los flujos subterráneos, zonas de recarga e interconexiones entre acuíferos, se ha realizado un muestreo especial de las aguas para el análisis de isótopos ambientales estables (O^{18} y Deuterio), los que fueron analizados en los laboratorios del Instituto Chileno de Energía Nuclear.

GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

La geología de la zona se encuentra marcada por la cadena volcánica cenozoica pleistocénica como el Misti (5,822 msnm) y el Pichu Pichu (5,400 msnm). En la parte oriental de Arequipa afloran principalmente el Grupo Barroso, esta yace discordantemente sobre la Formación Capillune, que se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos morrenicos, fluvio-glaciares y cenizas volcánicas. El volcán Misti, las montañas Pichu Pichu y varios focos volcánicos tiene como litología principal lavas andesíticas y traquiandesitas del Grupo Barroso cuyo espesor es del orden de 1400 m (Guevara, 1969). Estas lavas se encuentran altamente fracturadas fundamentalmente verticales, aunque alrededor de los centros volcánicos tienen disposición e inclinación radial que llega hasta los 40° constituyendo un sistema de acuíferos volcánico de tipo fisurado volcánico que da origen a los manantiales de gran caudal (Foto 1).



Foto 1 Gran producción de aguas subterráneas en el manantial Yumina con más de 300 l/s

En el sector de Mozocpuquio-Chiguata (carretera a Ubinas) se observan flujos de barro extensamente repartidos sobre las faldas orientales del Pichu Pichu, compuesto por materiales poco compactos, fragmentos de roca de diferente tamaño y naturaleza andesítica, no presentan estratificación definida y es heterogénea en la disposición en bloques. Esta característica de alta fracturación le otorga propiedades permeables que favorecen a la circulación de las aguas subterráneas.

En el valle de Arequipa existe alrededor de 600 pozos, cuyo basamento está compuesto por rocas intrusivas del batolito la caldera, el cual juega un rol importante ya que su baja a casi nula permeabilidad se comporta como barrera hidráulica que condiciona el almacenamiento de aguas subterráneas dentro del acuífero poroso,

las mismas que se encuentran confinadas por las tobas del acuitardo Sencca. Las fuentes de alimentación y recarga que reciben los acuíferos volcánicos provienen de la precipitación intensa en los meses de diciembre a abril, Los promedios de precipitación anual en la zona se encuentran entre 173 mm/año (Estación Characato, 2451 msnm), 309 mm/año (Estación El Fraile, 4015 msnm), 519 mm/año (Estación Imata, 4495 msnm) y 710 mm/año (Estación El Pañe, 4524 msnm).

ISOTOPOS AMBIENTALES ESTABLES

La utilización de isótopos ambientales estables y radiactivos se ha convertido desde hace más de 40 años, en uno de los métodos eficaces e importantes para el estudio de las aguas subterráneas. Una de las mayores ventajas de su utilización es que son constituyentes naturales de la molécula de agua y sus variaciones se deben a procesos naturales, descartando la acción antropica; por lo tanto constituyen trazadores naturales del agua (Herráez, 2008). El fraccionamiento isotópico del agua se produce con los cambios de estado que experimenta, con la evaporación, condensación, etc, a lo largo del ciclo hidrológico. El fenómeno del fraccionamiento isotópico es un proceso fisicoquímico complejo, se debe a la fuerza de enlace de los isótopos implicados en la molécula de agua y a las presiones de vapor, siendo mayor el enlace de los isótopos pesados (oxígeno-18 y deuterio) por lo que, quedan más retardados y son los que se pueden medir con mayor facilidad (Herráez, 2008).

El fraccionamiento isotópico depende estrechamente de la temperatura, de la velocidad de evaporación y de la humedad atmosférica. Si la evaporación se produce lentamente se puede considerar que existe equilibrio, pero si es rápido no existirá equilibrio. En la naturaleza la evaporación se produce con mucha frecuencia en condiciones de no equilibrio; sin embargo el proceso de condensación se produce lentamente y en condiciones de equilibrio (Herráez, 2008).

Para determinar los flujos regionales, procedencia y altitud de infiltración de las aguas, se han tomado muestras de 11 fuentes de aguas subterránea, de los cuales 5 son de manantiales, 4 de pozos y 2 fuentes termales, detalladas en el cuadro N° 1.

Cuadro N° 1. Resultado de análisis isotópicos de la cuenca oriental de Arequipa

N°	Z (m)	Nombre	Codigo	Q	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
1	2564	Manantial Yumina	13205-012	240	-10.17	-66.3
2	3335	Pozo Mosocpuquio	13205-013	2	-9.05	-57.2
3	2566	Manantial Ojo de Characato	13205-014	130	-9.69	-63.1
4	3200	Fuente termal Charcani V	13205-024	2.5	-9.28	-61.5
5	2897	Manatíal La Bedoya	13205-028	320	-11.83	-84.8
6	2222	Manatíal Tingo	13205-030	340	-12.77	-95.4
7	3399	Manatíal Totorani	13205-042	110	-11.52	-80.1
8	2628	Fuente termal Agua de Jesús	13205-048	4	-10.73	-75.2
9	2328	Pozo IRHS-014-Socabaya	IRHS-014	11	-13.28	-103.1
10	2366	Pozo IRHS-385-Cerro Colorado	IRSH-385	12	-14.66	-114.3
11	2285	Pozo IRHS-5-ETF-Parque Industrial	IRSH-5-ETF	8	-11.87	-87.7

Fuente: Peña & Sulca, 2010

RELACION ISOTOPICA $\delta^{18}\text{O}$ Y $\delta^2\text{H}$

Según el diagrama isotópico (Taylor, 1974) con datos de $\delta^{18}\text{O}$ y Deuterio, y considerando que el Perú aun no se tiene una línea meteorológica local (LML), interpretamos los resultados utilizando comparaciones en base a la línea meteorológica mundial (LMM), desarrollada por la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA), que ha escala regional es valida. Los resultados isotópicos de los manantiales se ubican por encima de la LMM y los datos de pozos incluyendo el manantial Tingo, se ubican por debajo, los cuales se interpreta que tienen composición isotópica ligera, esto explica que ambas son de recarga

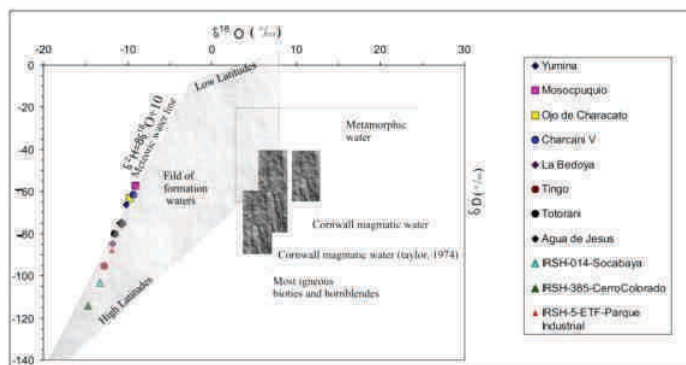


Grafico 1 Relaciones isotópicas del O^{18} y D de las fuentes de las aguas subterráneas con la LMM.

reciente proveniente de la precipitación pluvial. Las aguas subterráneas que se encuentran en los pozos se recargan a una altitud similar posiblemente de la parte alta de Arequipa donde aflora los volcanes Misti y Pichu Pichu (entre 3500 y 4500 msnm), en cambio los manantiales tienen resultados isotópicos con mezclas de aguas recargadas a distintas altitudes (grafico 2), lo cual indica que provienen de un mismo acuífero o material de recarga que pueden ser andesitas fracturadas del Grupo Barroso lo que facilita la infiltración de aguas de lluvia a diferentes altitudes, como se muestra en la figura 1.

DETERMINACIÓN ISOTOPICA DE LOS FLUJOS DE RECARGA

Según el modelo hidrogeológico conceptual de la recarga (figura 1) y los resultados de análisis isotópicos, indica que los pozos captan aguas subterráneas de flujo intermedio a regional y los manantiales tienen flujo local a intermedio, con la excepción de la fuente termal Jesus esta tiene un flujo regional profundo confirmado por su temperatura de 23° C y su componente de aguas con alto contenido de sales minerales.

Las variaciones de los valores en altitud producen empobrecimiento en los isotopos pesados, por lo tanto al aumentar la altitud desde Chiguata hasta Salinas la recarga es variable. Según la figura 1 elaborado en base al mapa hidrogeologico y ubicación de los puntos de surgencia ayudan a interpretar espacialmente la disposición litologica de los materiales, determinando que sus valores pertenecen a lavas andesiticas del Grupo Barroso cartografiado para el presente articulo como Acuífero Volcánico de tipo fisurado.

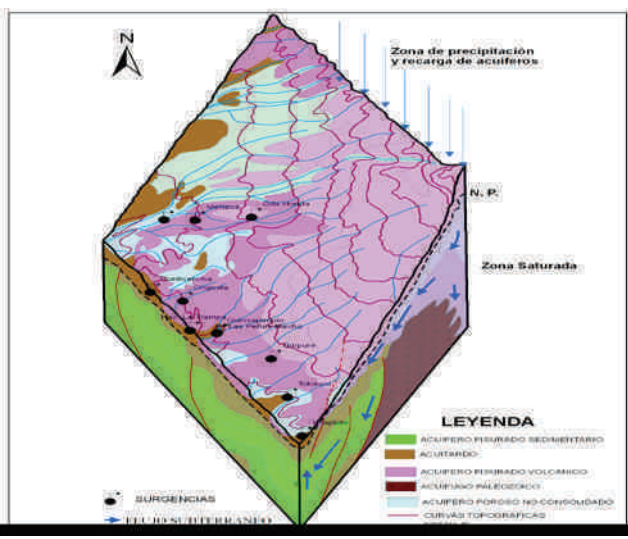


Figura 1. Modelo hidrogeológico conceptual de los flujos de recarga de acuerdo a datos isotópicos de O¹⁸ y D.

HIDROQUIMICA

La campaña de toma de muestras para análisis químico fue desarrollado en el mes de octubre del 2009, considerando 31 fuentes y además se midieron insitu parámetros físicos como pH, T°, CE y TDS.

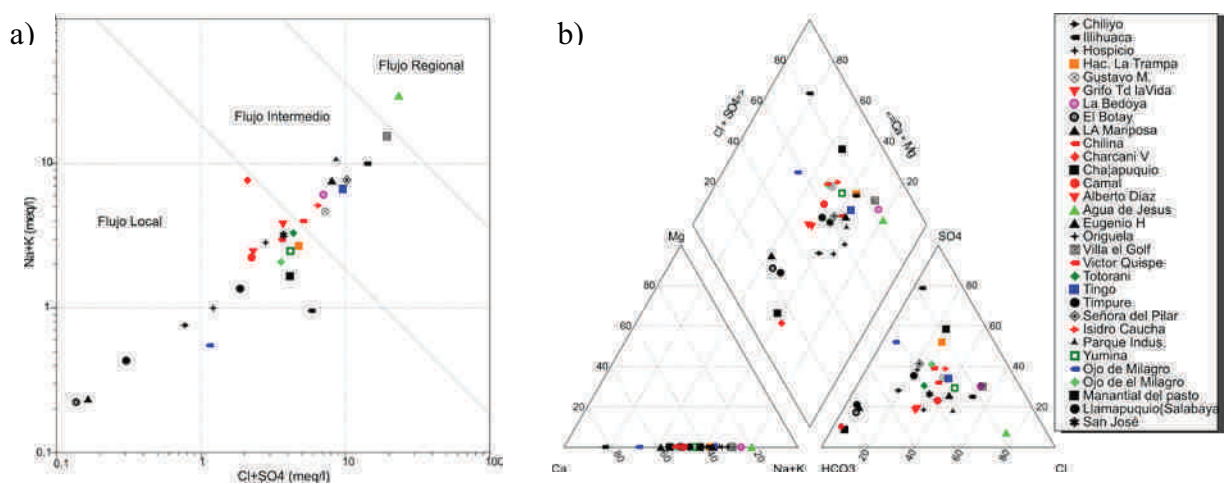


Grafico 2. a) Cl+SO₄ vs Na+K, criterio de evolución de flujos regionales, intermedios y locales, Según Miffin, 1988. b) diagrama de Piper, determinación del tipo de agua.

Para corroborar la evolución de los flujos, se utilizó la hidroquímica, estableciendo la relación Cl+SO₄ vs Na+K (mep/l) (Mifflin, 1988 en Ángeles et al 2004), los cuales muestran una tendencia de la evolución hidroquímica predominante de flujo local a intermedio (Gráfico 2).

Las fuentes de la ciudad de Arequipa (manantial Tingo, pozos del parque industrial, etc.), son del tipo clorurada sódica los cuales indican que se debe a que el acuífero reservorio está compuesto de depósitos aluviales (gravas y arenas) que se encuentran con cierto contenido salino, estos pozos también puede tener influencia de la infiltración de aguas servidas y de las aguas del río Chili. Según el gráfico 2 a) se les considera de largo y mediano recorrido.

Los manantiales cuyo tipo de agua es sulfatada cálcica, provienen del contacto con las rocas volcánicas, donde adquieren su predominancia de sulfatos, los cuales se encuentran dentro del rango de mediano recorrido o flujo intermedio. Las aguas de tipo bicarbonatada sódica y bicarbonatada cálcica son de recorrido y permanencia corta, su predominancia se debe a las variaciones del equilibrio carbonato-bicarbonato sujeto a procesos de disolución-precipitación.

El alto contenido de boro en algunas fuentes (7.78 mg/l en Aguas de Jesús, 6.31 mg/l de villa el Golf, 2.2 mg/l en Tingo y 2.7 mg/l en los pozos del parque industrial) proceden de la interacción con rocas volcánicas (flujos de lava) y es muy posible que también guarden relación indirecta con los depósitos de borax ubicados en la laguna Salinas, de los que adquieren su componente de boro e infiltran por estructuras no descubiertas. Precisamente estos manantiales presentan flujos intermedios y regionales.

CONCLUSIONES

Según el análisis hidrogeológico, hidroquímico e isotópico se han determinado la existencia de dos sistemas predominantes de flujos (locales e intermedios) cuya dinámica interna obedece al estado de fracturamiento que presenta los acuíferos volcánicos, las mismas que descargan a través de numerosas surgencias naturales. La recarga provienen de la precipitación pluvial, que se infiltra en rocas permeables de la parte alta (flujo mas regional) para los pozos y a diferentes niveles para los manantiales (flujos locales).

Las características geoquímicas e isotópicas de los manantiales de mayor caudal (La Bedoya, Yumina, Ojo del Milagro, Agua de Jesús y Tingo) demuestran estar definido por sistemas de flujos intermedios a regionales (aguas cloruradas Sódicas), cuyo acuífero de procedencia son los Volcánicos del Grupo Barroso. Los manantiales de menor caudal están determinados por flujos de corta residencia (aguas sulfatadas cálcicas y bicarbonatos sodicas-calcicas), estos se recargan en laderas y cumbres del volcán Pichu Pichu, aflorando en el contacto con materiales finos (cenizas y tobas), algunos condicionados por zonas de anomalías, como fallas y fracturas.

La única fuente de flujo regional es la fuente termal Aguas de Jesús, estas aguas son de moderada temperatura (23° C) y su componente mineral lo califican como aguas minero medicinal.

REFERENCIAS

- Ángeles, S., Rosales, L. & Ramos J. (2004) – *Características de flujos regionales, y su manifestación, tres casos en México*, Instituto de Geografía de México.
- Cartwright I. et al. (2008) – *Integrating physical hydrogeology, hydrochemistry, and environmental isotopes to constrain regional groundwater flow: Southern Riverine Province, Murray Basin, Australia*. Groundwater Flow Understanding p.105-134
- Delleur J.W. (1999) – *The Handbook of groundwater engineering*. CRC Press. 945 p.
- Hoefs Jochen, (2009) - *Stable Isotope Geochemistry*. Sixth edition Springer, 281 p.
- Lamban, J & Custodio, E (1999)-*Estudio isotópico ambiental(O-D) en la unidad Anioia: Principales Zonas de recarga e implicaciones en el funcionamiento Hidrogeológico del sistema*. Publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol. 6 Num. 2(junio 1999) p. 139-150.
- Pradeep K.; Joel R. Gat; & KLAUS F.O. (2005) – *Isotopes in the water cycle*. Springer, 373 p.
- Herráez Isabel (2008) – *Relaciones isotópicas, oxígeno-18 y deuterio, entre las aguas superficiales y subterráneas. Técnicas y aplicaciones multidisciplinarias de los isótopos ambientales*, p 25-43.
- Rollinson H.R. (1993) - *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical. 352 p.
- Vilanova E.; Mas-Pla J. & Menció A. (2008)-*Determinación de sistemas de flujo regionales y locales en las depresiones tectónicas del Baix Emporada y la Selva (NE de España) en base a datos hidroquímicos y isotópicos*. Boletín Geológico y Minero, 119 (1), p. 51-62
- William J. Deutsch (1997) – *Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination*, New York, Lewis Publishers 221 p.
- Guevara, C. (1969) - *Geología del Cuadrángulo de Characato*, INGEMMET. Carta Geológica Nacional.