



## Evaluación Hidrogeoquímica y de Calidad de Aguas, de la Parte Alta de la Cuenca del Río Sama-Tacna, para Identificar Fuentes de Consumo Humano

Karen Dueñas Olivera <sup>(1)</sup>, Jose Moreno Herrera <sup>(1)</sup>

(1) INGEMMET

### RESUMEN

El presente estudio forma parte de los proyectos de investigación del Programa de Hidrogeología del INGEMMET; y se desarrolló en el ámbito de la parte alta de la cuenca del río Sama, ubicado en el departamento de Tacna. La parte alta de la cuenca del río Sama está comprendida por las subcuencas Alto Sama y Salado; tiene una superficie aproximada de 1209.55 km<sup>2</sup>. Los trabajos de campo, se realizaron en dos campañas de campo; la primera del 28 de abril al 22 de mayo, y la segunda del 12 de julio al 05 de agosto de 2016. Estos datos de campo, junto con la información recopilada y los resultados de laboratorio, sirvieron de base para realizar una caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica, para luego hacer un análisis de calidad y poder identificar fuentes aptas para el consumo humano, para así, poder abastecer a la población con el recurso hídrico.

### INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional que alberga la parte alta de la cuenca del río Sama, se ve cada vez más preocupante, generando una situación crítica en cuanto a abastecimiento de agua de buena calidad, por lo cual es necesario elaborar estudios, así como involucrar a las autoridades gestoras del agua, para darle una buena gestión a los recursos hídricos.

### ASPECTOS GEOLÓGICOS

La estratigrafía general de la parte alta de la cuen-

ca del río Sama, se ha elaborado en base a la información de las cartas geológicas realizadas por el INGEMMET a escala 1:100000. En el área de estudio encontramos formaciones geológicas con edades desde el paleozoico, hasta el cuaternario, siendo las más importantes, según sus cualidades hidrogeológicas: el Grupo Yura, la Formación Hualhuani, el Grupo Barroso y los depósitos cuaternarios.

### ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

Se realizó una caracterización hidrogeológica, partiendo de la evaluación de la litología, los puntos de surgencia de aguas subterráneas, la precipitación pluvial, las condiciones de descarga, valores de permeabilidad de las unidades geológicas, y las propiedades físico-químicas de las aguas subterráneas que provienen de los acuíferos. Estos parámetros nos han permitido identificar las diferentes unidades hidrogeológicas. En la zona se identificaron cuatro tipos de acuíferos: acuíferos fisurados volcánicos representados por el Grupo Barroso, acuíferos fisurados volcánico-sedimentarios representados por la Formación Matalaque, acuíferos fisurados sedimentarios representados por las formaciones: Pelado, Gramadal, Labra y Hualhuani, y acuíferos porosos no consolidados, representados por los depósitos cuaternarios.

### ASPECTOS HIDROGEOQUÍMICOS

**Muestreo y análisis:** En la parte alta de la cuenca del río Sama, existe un inventario total de 110 fuentes de agua subterránea, de las cuales se ha

establecido una red de 44 estaciones de muestreo, midiéndose los parámetros físico-químicos in situ, con equipos portátiles en todas las fuentes (Inventariadas y muestreadas).

Los análisis se realizaron en el laboratorio de IN-GEMMET, donde se analizaron las 44 muestras de aguas subterráneas comprendidas en el área de estudio. Se realizó un análisis de balance iónico, para validar los resultados de las muestras, donde variación del porcentaje de electroneutralidad de todas las muestras se encuentran en el rango de +/- 10%, considerando válidos, todos los resultados.

**Hidrogeoquímica:** Sobre la base de los resultados de las fuentes muestreadas, se ha seleccionado y evaluado las concentraciones de los componentes iónicos mayoritarios en el agua subterránea, como

los cationes (Ca, Mg, Na y K) y aniones ( $\text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{Cl}^-$ ).

Considerando que las predominancias químicas están relacionadas con la evolución de flujos, se establece el gráfico comparativo entre el diagrama de Piper y el diagrama de Scatter.

De acuerdo al diagrama de Piper (Gráfico N° 5.1 A), en la parte alta de la cuenca del río Sama, existen 20 fuentes que corresponden a la facies Bicarbonatada Cálctica, una que corresponde a la facies Bicarbonatada Magnésica y una a la facies Bicarbonatada Sódica, que al hacer la comparación con el diagrama de Scatter (Gráfico N° 5.2 B), podemos corroborar que estas fuentes tienen corto recorrido de circulación en el subsuelo, corresponden a aguas de flujos locales.

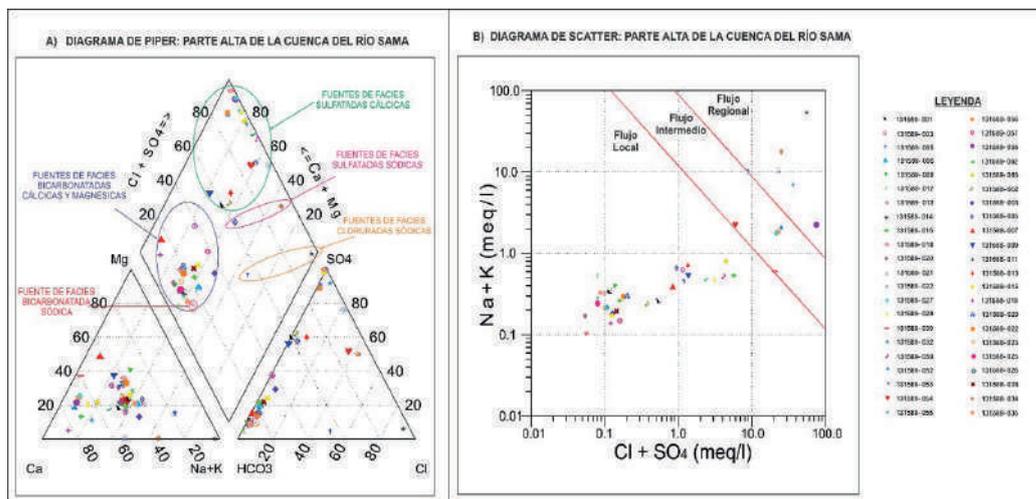


Gráfico N° 5.1: A) Diagrama de Piper B) Diagrama de Scatter

En el mismo diagrama de Piper observamos también la existencia de 18 fuentes que corresponden a la facies Sulfatada Cálctica, que haciendo la comparación con el diagrama de Scatter, corresponden tanto a flujos locales a flujos intermedios y algunas incluso a flujos regionales, esto depende de la cantidad de minerales que tienen en su composición. También encontramos 2 fuentes que corresponden a la facies Sulfatada Sódica y otras 2 a la facies Clorurada Sódica. Las fuentes que corresponden a la facies Clorurada Sódica, son fuentes que corresponden a un flujo regional, el cloro es indicador de un largo tiempo de residencia.

### Análisis por acuíferos

**Acuífero Barroso:** Dentro del acuífero Barrosos encontramos las siguientes facies hidroquímicas: 14 fuentes que pertenecen a la facies Bicarbonatada Cálctica, 7 a la Sulfatada Cálctica y 1 a Sulfatada Sódica, que en su mayoría corresponden a flujos locales a excepción de las fuentes Llaurimorco (131589-027) y Caparaja 10 (131589-030) que corresponden a flujos intermedios, y la fuente Barroso 2 (131589-058) que corresponde a flujo regional. Estas predominancias hidroquímicas nos indican que este acuífero es de tipo libre, de flujos principalmente locales, con aguas de corto recorrido a excepción de las fuentes ya mencionadas que corresponden a aguas de mayor tiempo de residencia, posiblemente porque infiltran a mayores profundidades gracias a las grandes fracturas que se presentan en esta parte del acuífero, las fuentes con flujos intermedios se encuentran en los alrededores del cerro Caparaja, y estas fuentes están relacionadas a un lineamiento cercano a este cerro. En cuanto a la fuente con flujo regional está

atada Cálctica, 7 a la Sulfatada Cálctica y 1 a Sulfatada Sódica, que en su mayoría corresponden a flujos locales a excepción de las fuentes Llaurimorco (131589-027) y Caparaja 10 (131589-030) que corresponden a flujos intermedios, y la fuente Barroso 2 (131589-058) que corresponde a flujo regional. Estas predominancias hidroquímicas nos indican que este acuífero es de tipo libre, de flujos principalmente locales, con aguas de corto recorrido a excepción de las fuentes ya mencionadas que corresponden a aguas de mayor tiempo de residencia, posiblemente porque infiltran a mayores profundidades gracias a las grandes fracturas que se presentan en esta parte del acuífero, las fuentes con flujos intermedios se encuentran en los alrededores del cerro Caparaja, y estas fuentes están relacionadas a un lineamiento cercano a este cerro. En cuanto a la fuente con flujo regional está

relacionada al mismo lineamiento que se presenta en los alrededores al cerro Charaque.

**Acuíferos porosos no consolidados:** En estos acuíferos encontramos 6 fuentes que corresponden a la facies Bicarbonatada Cálcica y 5 a la facies Sulfatada Cálcica, todas corresponden a flujos locales a excepción del manantial captado Picotane 2 (131589-054) de flujo intermedio. De acuerdo a estas predominancias hidroquímicas aseguramos que estos son acuíferos libres, someros, de poca profundidad, ya que en general se encuentran en los cauces de los ríos y quebradas, sus facies hidroquímicas nos indican aguas de corto recorrido por los acuíferos, así como flujos locales. Los flujos de la fuente Picotane 2 percolan más profundamente debido a la presencia de un sinclinal cerca al poblado de Talabaya (donde aflora esta fuente) y los flujos circulan a través de las grandes fracturas que este sinclinal produce, por lo que concentran más elementos en su composición, una evidencia de esto también es la temperatura con la que aflora, no siendo termal, pero si estando encima del promedio.

**Acuíferos Labra y Pelado:** Las dos fuentes muestreadas en este acuífero corresponden a la facies Sulfatada Cálcica y a flujos intermedios, los flujos se relacionan al sistema de fallas Jachisirca, que se presenta a los alrededores de la quebrada Molletala, donde afloran estas fuentes.

**Acuitardo:** En esta unidad hidrogeológica existen 1 fuente con facies perteneciente a Bicarbonatada Magnésica y 2 a la facies Sulfatadas Cálcicas. En general son flujos locales. Por la naturaleza semi-impermeable de estos materiales, existen flujos subsuperficiales que recorren lentamente por ellos, de bajos caudales y mínima producción, el que correspondan a flujos locales de corto recorrido es una evidencia de la poca infiltración y el corto tiempo de residencia de estos flujos por estos materiales.

**Fuentes termales:** Las fuentes termales corresponden a flujos regionales, a excepción de una: la fuente Caparaja 4 (131589-22) que es de flujo local; 2 de estas fuentes corresponden a la facies Cloruradas Sódicas, 3 a la facies Sulfatadas cálcicas y la que es de flujo local corresponde a la facies Bicarbonatada cálcica. Los flujos de estas aguas percolan a profundidad, haciendo que se

concentren en sales y minerales gracias a la temperatura que van adquiriendo debido al gradiente geotérmico, al interactuar agua (caliente) – roca, los procesos de disolución son más fuertes. En cuanto a la fuente Caparaja 4 por la temperatura que presenta (25°) deducimos que no infiltró a gran profundidad, por lo que sus flujos también son flujos locales y de poco tiempo de residencia, lo cual se corrobora con la facies a la que pertenece.

## CALIDAD DE AGUAS

En general, las fuentes en la zona de estudio, en cuanto a valores de pH, se encuentran dentro del rango de neutras, treinta fuentes de las 110 inventariadas, presentan valores de pH menores a 6.5, estos valores ácidos se deben a la interacción de los flujos de agua subterránea con las rocas volcánicas del área de estudio. En cuanto a la conductividad eléctrica, el 83% de las fuentes (91 fuentes) se encuentran entre 40 y 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , las mismas que corresponden a aguas de circulación somera o sub superficiales, que corresponden a lluvias de mínima infiltración y a circulación de flujos de corto recorrido, también por la presencia de nevados que aportan aguas de deshielo que se infiltran en las fracturas de las rocas volcánicas y surgen en forma de manantiales; el 17% restante, excede este rango de valores (19 fuentes), registrando valores de 1656  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , hasta 7261  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; los valores elevados de conductividad eléctrica se atribuyen a dos factores, uno al factor geológico, es decir que, en algún momento de la percolación, las aguas que se encuentran en estas fuentes tuvieron contacto con rocas volcánicas y sedimentarias alteradas con contenido de mineralización, lo que contribuye con el incremento de sales; o también a la circulación profunda de aguas, esto en las fuentes termales.

Se tomó en cuenta el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, para evaluar la calidad de las aguas subterráneas. En el área de estudio, con respecto a la composición química de las fuentes, 29 de estas, presentan anomalías en por lo menos un elemento dentro de su composición. Los principales elementos en los que se presentan anomalías, son:

**Variación de Arsénico (As):** con respecto al arsénico, once manantiales superan el ECA cate-

goría 1 en la sub categoría A1 y A2. Las concentraciones altas de arsénico en aguas subterráneas, no se restringen a determinadas condiciones o ámbito, sin embargo, la mayor parte de los acuíferos con contenidos altos de arsénico tienen un origen ligado a procesos geoquímicos naturales. Los manantiales de códigos: 131588-005, 131588-015, 131588-019, 131589-009, 131589-012, 131589-013, 131589-057, 131589-058 y el manantial captado 131589-054 se encuentran asociados al acuífero fisurado volcánico Barroso; los manantiales 131588-009, 131588-013, 131589-014, 131589-015, el manantial captado 131589-052 relacionados a acuíferos volcánico sedimentarios y sedimentarios. Las fuentes termales 131588-011, 131588-034, 131589-005, 131589-021, 131589-022, 131589-032 deben su temperatura a la circulación profunda de sus flujos de agua. En nuestra área de estudio atribuimos que los valores elevados de arsénico se deben a la interacción de los flujos de agua con las rocas producto de una intensa actividad volcánica en toda el área de estudio, encontrándose también volcanes inactivos en la zona, lo que nos indica de donde proviene esta anomalía natural de arsénico. Así también en las fuentes termales, aparte de que los flujos pasan por materiales volcánicos, también debe sus valores de arsénico a la circulación profunda de sus aguas, así como a la temperatura con la que circula en el subterráneo.

**Variación de Sulfato (SO<sub>4</sub>):** con respecto al sulfato, nueve fuentes de agua subterránea superan el ECA categoría 1 en la sub categoría A1, las fuentes termales 131588-034, 131589-021 y 131589-032 tienen flujos regionales, por lo que el sulfato es un compuesto común en este tipo de aguas por el lavado a través de un largo tiempo de residencia de los materiales por los que pasan estos flujos. El manantial 131589-062 es de flujo local a intermedio; los manantiales 131589-027 y 131589-030 son de flujos intermedios; y el manantial 131589-058 que es de flujo regional, están relacionados al acuífero fisurado volcánico Barroso; el manantial captado 131589-052 y el manantial 131589-056, corresponden a flujos intermedios que están relacionados al acuífero fisurado sedimentario Labra-Pelado, en el caso de estas fuentes tienen flujos intermedios, en donde el sulfato es el compuesto representativo de este tipo de flujos de agua subterránea. Los sulfatos después de los bicarbonatos, son los principales aniones presentes

en el agua, los cuales es este caso se presentan de manera natural.

**Variación de Aluminio (Al):** con respecto al aluminio cinco manantiales superan el ECA categoría 1 en la sub categoría A1, A2 y A3. Los manantiales 131589-050 y 131589-062 con flujos locales a intermedios; los manantiales 131589-027 y 131589-030 con flujos intermedios; y el manantial 131589-058 con flujo regional, todas estas fuentes están relacionadas al acuífero fisurado sedimentario Barroso, además que también pertenecen a la facies hidroquímica Sulfatada Cálcica, también todas son aguas ácidas con pH menores a 5. Los flujos de agua subterránea ácida al pasar por las andesitas ricas en minerales con contenido de Al (como las plagioclasas, los piroxenos y las micas) agregan a su composición este elemento, haciéndose presente en estas fuentes en concentraciones anómalas.

**Variación de Hierro (Fe):** con respecto al hierro, seis manantiales superan el ECA categoría 1 en la sub categoría A1, A2 y A3, los manantiales 131589-030, 131589-050, 131589-053, 131589-055, 131589-058, 131589-065 están relacionadas al acuífero fisurado volcánico Barroso, sus aguas son sulfatadas cálcicas con flujos intermedios a regionales; condiciones que favorecen al intercambio iónico agua roca, las andesitas que conforman esta formación contienen en sus minerales (piroxeno, anfíboles y micas) hierro y los flujos al tener un mediano a largo tiempo de residencia se concentran en este elemento.

## PROPUESTAS DE INTERVENCIÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS

Luego de un diagnóstico hidrogeológico e hidrogeoquímico de la parte alta de la cuenca del río Sama, desarrollamos propuestas de intervención en recursos hídricos subterráneos con el fin de abastecer a la población del recurso hídrico de calidad para consumo humano.

**Captación de aguas subterráneas:** En el área de estudio se han seleccionado 11 manantiales con condiciones aptas para su captación directa, en beneficio de la población, basándonos en el análisis de caudales, la calidad de las aguas, y su distribución espacial; calificando a 5 de ellas con prioridad 1, para poder ser consideradas en primera instancia y 6 de prioridad 2, como otras alternativas de captación.

N°	Código	Nombre	pH	CE( $\mu$ S/cm)	Q(l/s)	Poblado beneficiado
1	131588-023	Umajalsu 2	7.57	81.11	20	Chuquitira
2	131588-026	Yaretapampa 2	7.5	86.33	8	Huanune, Huacollo
3	131588-028	Chulluncayani 2	7.14	71.68	8	Huanune, Huacollo
4	131588-025	Yaretapampa 1	7.28	82.93	5	Huanune, Huacollo
5	131589-020	Caparaja 3	7.44	66.64	5	Caparaja

Cuadro N° 7.1: Manantiales de prioridad 1 que se pueden aprovechar para el beneficio de las diferentes poblaciones.

**Recarga artificial:** En la zona de estudio se plantea que se realicen zanjas de infiltración y amunas para recargar el acuífero potencial Barroso, y así aumentar la disponibilidad hídrica de esta unidad hidrogeológica.

### CONCLUSIONES

El estudio nos permitió conocer las unidades hidrogeológicas de la zona de estudio, las características hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas, así como su calidad, y en base a esto nos permitió identificar las fuentes idóneas para consumo humano.