

# ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DE LA SUBCUENCA CORALAUQUE EN BASE A PARÁMETROS FÍSICOS E HIDRÁULICOS.

Josemanuel Carpio<sup>1</sup>, Fluquer Peña<sup>1</sup> Maura Charca<sup>1</sup> & Jose Carlos Farfan<sup>1</sup>

(1) INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima. [jcarpio@ingemmet.gob.pe](mailto:jcarpio@ingemmet.gob.pe), [fpena@ingemmet.gob.pe](mailto:fpena@ingemmet.gob.pe), & [mcharca@ingemmet.gob.pe](mailto:mcharca@ingemmet.gob.pe) & [jfarfan@ingemmet.gob.pe](mailto:jfarfan@ingemmet.gob.pe)

## I. INTRODUCCIÓN

La subcuenca Coralauque, constituye uno de los tributarios principales de la cuenca del río Tambo, es una de las que tiene mayor aporte de agua subterránea y superficial. La característica hidrogeológica de esta subcuenca se manifiesta por presencia de gran número de manantiales de buen caudal, sin embargo, las unidades hidrogeológicas principales son aún desconocidas. El río Coralauque nace de la confluencia de los ríos Tigre y Titire, se ubica entre las coordenadas 8192000 y 8126500 norte, 310000 y 395000 este, políticamente pertenece a los distritos de Chojata, San Cristóbal y Carumas en las provincias de General Sánchez Cerro y Mariscal Nieto de la Región Moquegua (Figura 1). La subcuenca tiene dirección preferencial de sureste a noroeste, con una longitud superior a los 85 km y una superficie aproximada de 2 542 km<sup>2</sup>.

La importancia de la subcuenca radica por la presencia de gran número de manantiales y fuentes termales, con condiciones hidrogeológicas únicas, se observan fuentes termales artesianas y evidente presencia de presión hidráulica natural. En este lugar se encuentra el embalse Pasto Grande, conocido por que abastece de agua de consumo humano y riego a la Región Moquegua y parte de la Región Arequipa. La fisiografía de la subcuenca se define por la presencia de altiplanicies, con pequeñas montañas de rocas volcánicas muy relacionada a afloramiento y surgencia de aguas subterráneas, colinas y elevaciones donde se encuentra la zona de alimentación y recarga de aguas subterráneas, planicies en cuya extensión afloran gran número de manantiales y laderas escarpadas donde el cauce del río ha erosionado el terreno dando lugar a zonas de alta pendiente con elevaciones que van desde los 2 700 a 5 550 m.s.n.m.

El clima en la subcuenca es semiseco, tienen una distribución irregular de las precipitaciones, debido a una estacionalidad hídrica anual que marca la época de lluvias, el periodo de mayor precipitación se presenta entre los meses de octubre a abril, donde cae el 94% de la precipitación total, por lo tanto la precipitación media anual es de 331,37 mm, con fluctuaciones de 0 a 660 mm (SENAMHI 2009).

El presente artículo tiene como objetivo principal analizar los aspectos hidrogeológicos más básicos e importantes de la subcuenca Coralauque, para definir lineamientos que caractericen a las unidades hidrogeológicas de la subcuenca. Para dicho propósito se han realizado inventarios de fuentes de aguas subterráneas con distribución espacial de las surgencias que cubra toda la subcuenca, toma de parámetros fisicoquímicos insitu (con equipos portátiles de campo), pruebas hidráulicas (aforos) y análisis geológico por litología, además se ha correlacionado las fuentes de aguas subterráneas con la geología de la zona, obteniendo como producto final un mapa hidrogeológico (Figura 4).

## II. ASPECTOS GEOLÓGICOS

La geología de la subcuenca se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas y sedimentarias. Los afloramientos más antiguos están representados por la Formación Hualhuani perteneciente al Grupo Yura, del cretácico inferior (150 Ma) cuya litología se compone de areniscas en estratos medios a gruesos con

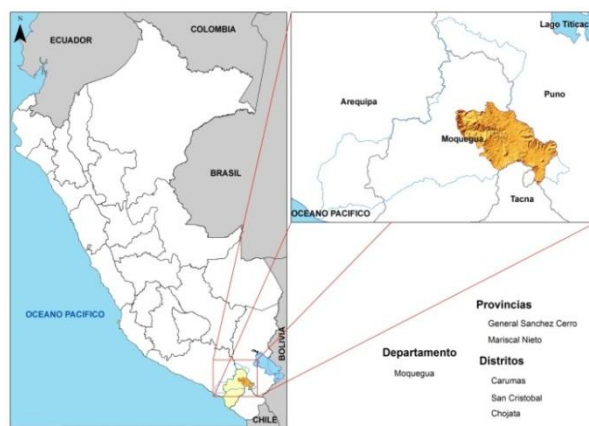


Figura 1. Mapa de ubicación de la subcuenca Coralauque.

tendencia a estar muy fracturada. En la parte superior se tiene a la Formación Pichu con depósitos vulcano sedimentarios, como parte del Grupo Tacaza del paleógeno (23 Ma) y el Grupo Maure del neógeno-mioceno (20 Ma), cuyas características litológicas lo representan los conglomerados volcánicos, andesitas y areniscas tobáceas. Por encima, tenemos a la Formación Sencca del neógeno-pleistoceno (5 Ma) con tobas de características impermeables y lapilli. Posteriormente tenemos un gran número de complejos y eventos volcánicos atribuidos al Grupo Barroso con edades que van del neógeno plioceno al cuaternario pleistoceno donde destacamos a la Formación Capillune que es volcánico sedimentario con litología de tobas riolíticas retrabajadas, depósitos piroclásticos y niveles de lavas totalmente fracturadas. Finalmente, se encuentran los depósitos del cuaternario morrénicos, fluvio-glaciares, flujos de barro, aluviales, coluviales, fluviales y eluviales, casi todos con características permeables. En cuanto a los intrusivos estos se presenta con una edad del neógeno mioceno con presencia de domos riolíticos y granodioritas que tienen características impermeables.

### III. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

Para tener un registro hidrogeológico de la zona se ha realizado un Inventario de fuentes, cuya distribución espacial cubre casi toda el área de la subcuenca, evidenciando la presencia de importantes acuíferos volcánicos y volcánicos sedimentarios. En el mapa hidrogeológico (Figura 4) y el mapa de zonas de potencial geotérmicas (Figura 3) se observa el registro de las 219 fuentes de agua subterránea de los cuales 159 son manantiales, 7 manantiales captados, 22 fuentes termales, 4 pozos o sondeos someros y 27 puntos de control (llamado así a las fuentes donde no se encontraron punto fijo de surgencia de agua).

#### 1. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

El rendimiento hidráulico de los acuíferos en la zona de estudio, se basa en el análisis de caudal, cuya clasificación de la descarga (Cuadro 1), se realizó de acuerdo al sistema propuesto por Meizer (1923). En la subcuenca se tiene una fuente de primera categoría, pero esta corresponde a un punto de control monitoreado en el río Vizcachas. Se tiene tres manantiales con caudales que corresponden a segunda categoría, 20 manantiales de tercera categoría, distribuidos a lo largo de la cuenca cuya circulación de aguas subterráneas en el subsuelo evidencia la importancia hidrogeológica de las rocas volcánicas, los manantiales Incalacaya (150 l/s) en Pasto Grande, el manantial Jatunpujo (90 l/s) en Pacchani, el manantial Tipujo (85 l/s) en el sector de Aruntaya y el manantial Pujini (60 l/s) (Foto 2), son los principales representantes de las descargas de tercera categoría. Manantiales de cuarta categoría existen 32, de quinta categoría 77, de sexta categoría 78 y de séptima categoría 8. Para el trabajo que realizamos, los manantiales de séptima categoría solamente se consideran los principales y permanentes dado a la abundancia de las descargas temporales. Estos caudales permiten encontrar las zonas de mayor interés hidrogeológico, cuyas reservas son potenciales y además nos permitieron ubicar fuentes termales con presión hidráulica natural.

**Cuadro 1.** Clasificación de descarga

Categoría	Rango Q(l/s)	N°
Primera	mayor a 2830	1
Segunda	283 a 2830	3
Tercera	28.3 a 283	20
Cuarta	10 a 28.3	32
Quinta	3 a 10	77
Sexta	1 a 3	78
Séptima	menor <1	8

#### 2. PARÁMETROS FÍSICOS

*Temperatura.* El rango de temperaturas encontradas nos muestra aguas frías (típicas de aguas subterráneas de poca profundidad de circulación) y aguas termales, de flujo regional o circulación cercana a una fuente de calor. Por lo cual se ha clasificado las fuentes de acuerdo a su temperatura (Cuadro 2). Las variadas temperaturas de las fuentes se debe a la infiltración de aguas de precipitación que percolan en profundidad, hasta adquirir altas temperaturas (del gradiente geotérmico de la tierra) donde se calientan y mineralizan para luego surgir en forma manantiales o fuentes termales, dependiendo de la profundidad alcanzada por los flujos de agua subterránea y las rocas

**Cuadro 2.** Clasificación de aguas según su T°

Clasificación	Temperaturas	N°
Frías	menos a 20°C	196
Hipotermiales	20° a 30°C	11
Mesotermiales	30° a 40°C	2
Hipertermiales	40° a 100°C	10
Supertermiales	100°C a mas	---

atravesadas, adquieren su temperatura. De las fuentes inventariadas tenemos 196 por debajo de los 20° C, 11 son hipotermas, 2 son mesotermas, 10 son hipotermas. Algunos alcanzan desniveles en el interior del acuífero que generan presión hidráulica natural ocasionando la surgencias artesianas. Un claro ejemplo es la fuente termal Puente Bello con surgencia a presión y temperatura de 74.8°C (Foto 1). No se descarta que la fuente de calor provenga de un reservorio geotérmico.



Foto 1. Fuente termal Puente Bello

**Conductividad Eléctrica.** Es indicativo de la materia ionizable total (sales disueltas) presente en el agua, las mismas que fueron monitoreadas in situ con equipos portátiles. Para un análisis detallado de la variación de la conductividad eléctrica con respecto a la temperatura, hemos realizado un diagrama (Grafico 1) que muestra fuentes termales con mayor número de contenidos de sales. En el Gráfico 1 vemos que solo 8 fuentes se encuentran en la base ( $\leq 1\ 500\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ), con temperaturas entre 20° y 40° C; sin embargo, a esta misma temperatura el contenido de salinidad tiene valores entre 5 y 17 mS/cm, lo que indica un incremento de la salinidad producto de que en algún momento de la percolación las aguas termales tuvieron contacto con ácidos bases y sales inorgánicas, que pueden ser HCl, NaOH, NaCl y/o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , en soluciones acuosas diluidas, las mismas que generaron el incremento de sales. De la misma manera a temperaturas entre 40 y 80 °C, se tiene un incremento de sales entre 10 y 37 mS/cm. La gran mayoría de estas aguas con contenido de sales al salir a superficie cambian drásticamente su temperatura ( $T^\circ$  del ambiente  $\leq 12\ ^\circ\text{C}$ ), los cuales generan grandes precipitados en forma de domos de sinter o travertinos con compuestos de sales, carbonatos, sulfatos, silicatos, etc. (Foto 1).

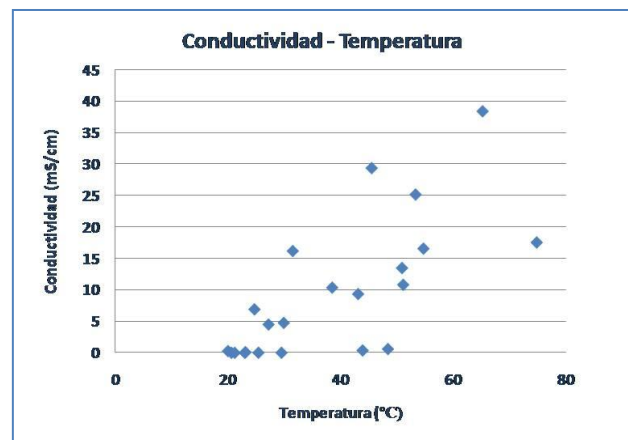


Gráfico 1. Variaciones del contenido de sales con respecto a la temperatura

### 3. PARÁMETROS QUÍMICOS

**pH.** En cuanto al pH, los manantiales tienen un 7,3% de comportamiento básico, debido al contacto con los precipitados de sales y carbonatos. Más de la mitad (68,5%) tiene un comportamiento neutro aptas para el consumo humano y riego, pero aproximadamente la cuarta parte (24,2%) tiene un pH ácido (cuadro 4), los cuales estarían ligadas a zonas mineralizadas (con presencia de pirita).

Cuadro 4. pH de las 219 fuentes

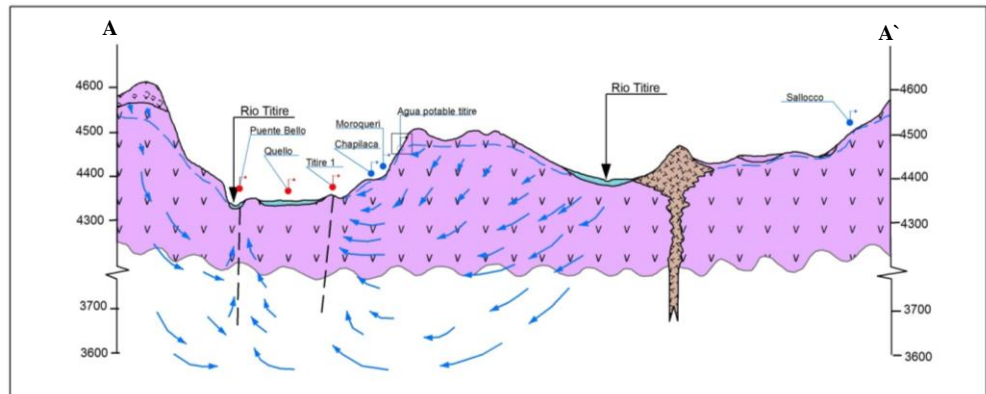
	pH	Nº de fuentes	%
Básico	8.5-14	16	7.3
Neutro	6.5-8.5	150	68.5
Acido	0-6.5	53	24.2

## IV. CONSIDERACIONES HIDROGEOLÓGICAS

### AMBIENTES HIDROESTRATIGRÁFICOS

En base a los aspectos fisicoquímicos e hidráulicos de la subcuenca, se ha elaborado un mapa hidrogeológico y un mapa de zonas de potencialidades geotérmicas, la misma interpretada con la ubicación de fuentes de aguas subterráneas, nos ha permitido definir unidades hidrogeológicas principales

(Figura 3 y 4). Los depósitos de lavas volcánicas conforman un acuífero fisurado volcánico y las rocas volcánicas intercaladas con rocas sedimentarias conforman el acuífero volcánico sedimentario, ambos de niveles poco profundos que evidencian sus caudales con las mejores surgencias de aguas subterráneas en forma de manantiales. Las fuentes termales en su mayoría están ligadas a fallas o lineamientos que transportan el agua subterránea desde niveles profundos relacionadas a flujos de calor. Para un mejor entendimiento del funcionamiento hidrogeológico de las fuentes de aguas subterráneas se elaboró una sección geológica A-A' (Figura 2) de dirección NE-SO tomando la parte norte de la subcuenca como ejemplo tipo que interpreta las surgencias someras, manantiales y fuentes termales. La sección hidrogeológica muestra un ambiente de rocas netamente volcánicas fisuradas,



**Figura 2.** Modelo hidrogeológico conceptual de la surgencias de aguas subterráneas

interpretado en este artículo como Acuífero Fisurado Volcánico (AFV) que por su afloramiento en la parte más alta de la subcuenca se considera como una de las zonas de mayor recarga. En el sector derecho de la sección (Punto A') se encuentra el divortium acuarium, a sólo 100 metros aflora el manantial Sallocco, este manantial es casi superficial de corto recorrido y baja temperatura. Más al sur en el sector izquierdo de la sección, se tiene el manantial captado, el mismo que se usa para el agua potable del poblado de Titire. Este manantial tiene características de recorrido local tiene baja temperatura, bajo caudal, su surgencia están condicionada por las fracturas y cambios de litología de la roca. En las mismas condiciones se encuentran los manantiales Moroqueri, Pujini y Chapilaca. Las fuentes termales Titire 1, Quello y Puesto Bello evidencian aguas subterráneas con un recorrido más profundo, tienen alta temperatura y flujo permanente. La fuente termal Puesto Bello (Foto 1) tiene mayor temperatura, y aflora en forma polisurgente dentro del mismo cauce,

sin embargo aguas arriba del río Titire, monitoreamos una temperatura de 19,4°C con un pH de 3,28 y una conductividad de 405 uS/cm, la fuente termal Puesto Bello presenta una temperatura de 74,8°C con un pH de 6,53 y una conductividad de 17 550 uS/cm, y el punto de control aguas abajo de la surgencia presenta un temperatura de 25,1°C con un pH de 7,47 y una conductividad de 10 260 uS/cm. Lo que indica que las aguas ácidas del río Titire se neutralizan con la presencia de sínter (carbonatos y sulfatos) precipitados de la fuente termal Puesto Bello. La predominancia química de las aguas son sulfatada cálcica (Steinmüller & Zavala 1997), los que nos indican que esta fuente termal proviene de rocas volcánicas y que en algún momento de



**Foto 2.** Manantial Pujini con caudal de 60 l/s

la percolación las aguas subterráneas o la fuente de calor tuvo contacto con rocas sedimentarias que puede ser el Grupo Yura que es una de las formaciones más antiguas que se encuentra niveles profundos. Adicionalmente en la cuenca se observa un pequeño afloramiento de la Formación Hualhuani como la más antigua que por su litología principal (areniscas) y su intenso fracturamiento lo calificamos como un

Acuífero Fisurado Sedimentario. Posteriormente un evento vulcano sedimentario con andesita basáltica y aglomerado correspondiente a la Formación Pichu aflora en la cuenca cartografiado como Acuífero Volcánico Sedimentario (AVS). El Grupo Maure presenta niveles tobáceos con andesitas afaníticas fracturadas por lo que, se califica como un Acuífero Fisurado Volcánico. Un nivel de aglomerados volcánicos intercalada con coladas de andesitas y areniscas tobáceas, tobas y lapilli, de la Formación Senca se presenta como un Acuitardo Volcánico. Un gran número de eventos volcánicos pertenecientes al Grupo Barroso muy puntuales los calificamos como Acuitardos Volcánicos (AV), especialmente los estratos volcán Asnuni y Quesllampo por la presencia de tobas riolíticas; en cambio a los estrato volcán Pasto Grande, Colquerane, Pichacollo, Millijahui, complejo volcánico Loriscota, Curahuara, Cacachara, Cotañane se consideran Acuíferos Fisurados Volcánicos (AFV) porque el gran componente litológico se encuentra muy fracturado. Uno de los mejores acuíferos de la subcuenca lo constituye el Acuífero Volcánico Sedimentario (AVS) de la Formación Capillune, es potente (>500) y productivo, donde se manifiestan gran parte de las surgencias de aguas subterráneas. Además se observan Acuitardos Volcánicos formados por una deposición de piroclastos, pómez y cenizas, un Acuitardo Sedimentario dado por un flujo de barro con presencia de fragmentos angulosos en matriz areno arcillosa. Finalmente, se observan los Acuíferos Poroso No Consolidados en Depósitos Fluviales, Fluvioglaciares y Morrénicos; son de pequeño espesor y baja productividad (Figura 4).

En base a la temperatura de las fuentes de aguas subterránea (termales y frías) se ha elaborado un mapa de zonas de potencial geotérmico (Figura 3), con interpolación de la temperatura de las aguas subterráneas, dicha interpolación nos ha permitido zonificar evidencias de calor en manifestaciones de aguas termales proveniente del subsuelo y que se relacionan con el interior de la tierra. En base a la corteza continental, se cree que las temperaturas varían entre 200 a 1 000 °C, este calor es transferido del interior de la tierra a

través de la litósfera generando un gradiente geotérmico de 2 a 4 °C por cada 100 m de profundidad (Orche, 2011). Sin embargo, el afloramiento de aguas termales en Coralaque se centraliza en dos zonas: Una al este del embalse Pasto Grande y otra al norte de la misma (Figura 3). En el primer sector los afloramientos de aguas termales se encuentran casi concentrados, generando temperaturas altas en el punto central de la zona que van disipándose en forma concéntrica hacia los alrededores, por lo cual interpretamos que estas fuentes pueden estar relacionadas con niveles de calor que emergen producto de una zona de buena permeabilidad, los mismos que es un punto interesante por lo cual recomendamos un exploración geotérmica. En el sector norte, las

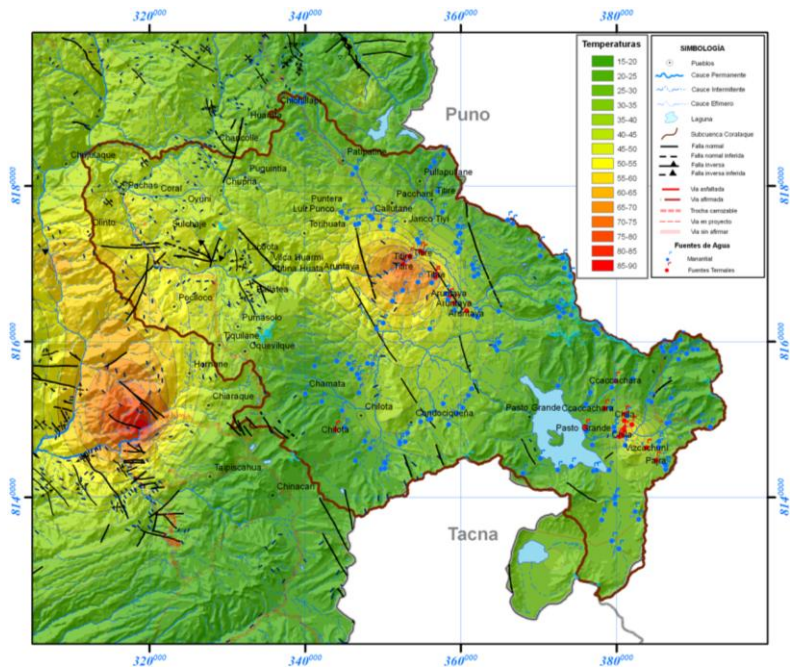


Figura 3. Mapa de zonas de Potencial Geotérmico de Coralaque

fuentes termales tiene una especie de alineamiento noroeste sureste, por lo cual la interpolación en el mapa de potencialidades geotérmicas (concéntrico) no representa la verdadera evidencia de calor en las fuentes, pero si la presencia de una falla que tiene la misma dirección de la surgencia (Figura 3), por lo cual interpretamos que el calor que proviene del interior está condicionado por la falla de dirección noroeste sureste que transmite calor a través de las fuentes termales cuya permeabilidad está relacionada íntegramente a la falla más que al componente litológico de las rocas. Por lo cual una exploración geotérmica más detallada requiere de un análisis litológico y estructural que contribuya con la

determinación de la geometría de los campos acuíferos y la relación de los materiales permeables con la hidrogeología y las manifestaciones de aguas termales y minerales.

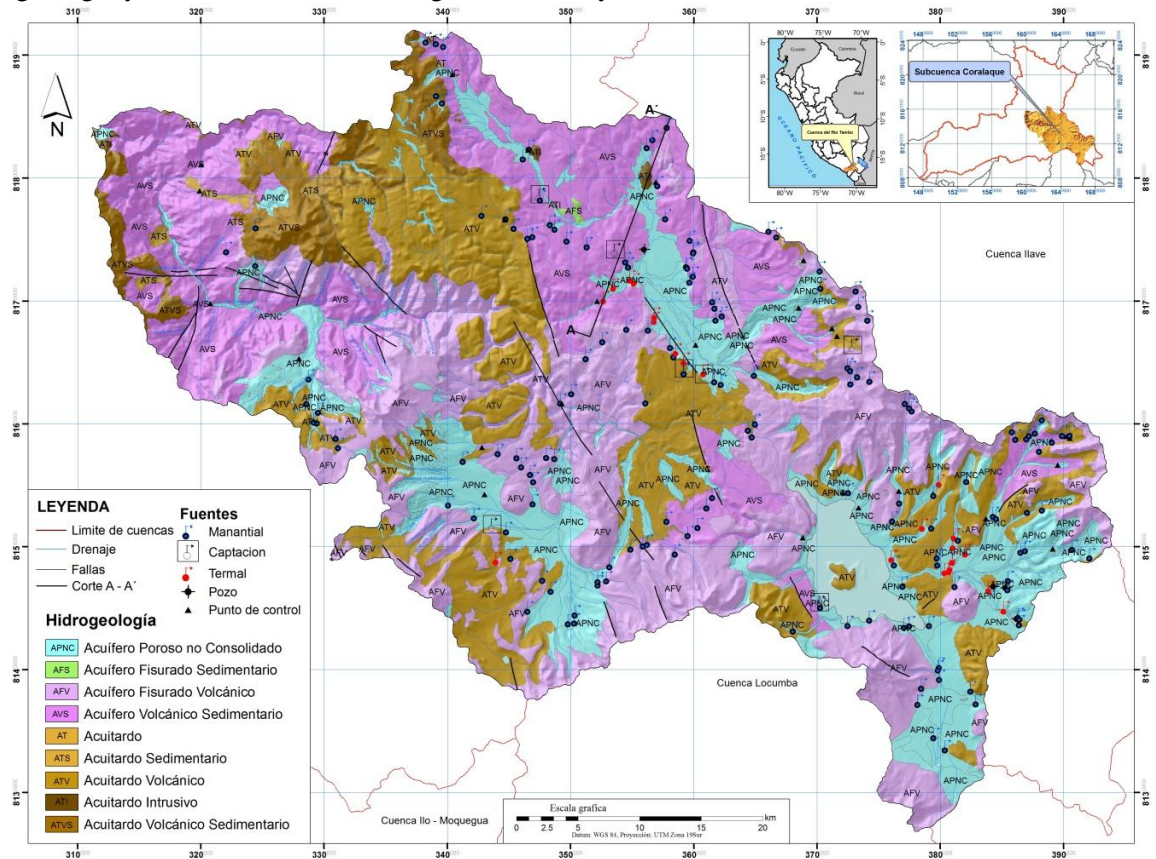


Figura 4. Mapa Hidrogeológico de la Subcuenca Coralaque

## CONCLUSIONES

- Los aspectos hidráulicos y fisicoquímicos de las surgencias de aguas subterráneas en la subcuenca del río Coralaque nos han permitido elaborar un mapa hidrogeológico con acuíferos fisurados volcánicos y acuíferos volcánicos sedimentarios como los más importantes.
- El trabajo de inventario de fuentes con mediciones insitu de temperatura y otros parámetros fisicoquímicos nos ha permitido elaborar un Mapa de Zonas de Potencial Geotérmico en la subcuenca.
- Las condiciones litológicas y estado actual (fracturadas) de las rocas, son las condicionantes para la surgencia de aguas subterráneas en forma de manantiales, sin embargo, asociados a dos fallas inferidas en profundidad se tiene la surgencia de fuentes termales.
- Según el Mapa de Zonas de Potencial Geotérmico de la subcuenca, interpolado con la surgencia de aguas subterráneas (frías y termales), se observan dos zonas de concentración de calor geotérmico que pueden ser indicios importantes para investigar geometrías, espesor y profundidad de un posible reservorio geotérmico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Peña F. (2001) - Estudio hidrogeológico del acuífero poroso no consolidado entre Saylla y Choquepata, Cusco-Perú.
- Steimmüller, K., Zavala, B. (1997). INGEMMET Boletín N° 24 Serie D: Vigilancia de la actividad volcánica e hidrotermalismo en el sur del Perú.
- Silva, A., Amato, S. (2012). Aspectos hidrogeológicos de la región periserrana de Tandilia (Buenos aires, Argentina). Boletín Geológico y Minero de España.
- SENAMHI (2009) - Balance hídrico superficial de la cuenca del río Tambo.
- Orche, E. (2011) - Energía Geotérmica.