

# MODELO HIDROGEOLÓGICO DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS FUENTES TERMALES DE BAÑOS DEL INCA, CAJAMARCA-PERÚ

Fluquer Peña Laureano<sup>1</sup> & Otto Severyn<sup>2</sup>

(1) INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima; fpena@ingemmet.gob.pe

(2) Universidad de Liberec – Republica Checa

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo forma parte del proyecto Peruano-Checo, denominado “Desarrollo de las aguas termales y minerales en el Perú”, referente a la cooperación en hidrogeología, termalismo y balneología con la Republica Checa. El proyecto fue realizado por los geólogos de Aquatesta.s., Servicio Geológico Checo y la universidad de Liberec (República Checa) y por los geólogos del Ingemmet (Perú). El objetivo principal es la creación de condiciones necesarias para el desarrollo de la balneología e hidroterapia, a partir de la investigación. Precisamente el modelo hidrogeológico fue desarrollado, para conocer las características hidrogeológicas y el ambiente de formación de las fuentes termales de Baños del Inca. Adicionalmente, esta propuesta forma parte del proyecto que plantea emplazar un nuevo centro terapéutico y balneológico en un ambiente natural (zona de Eucaliptos, a 1.5 km de Baños del Inca), que permita a Cajamarca mejorar su infraestructura hotelera y balneológica, y con ello mejorar la oferta turística y de baños termales.

## METODOLOGÍA

Se realizó un cartografiado geológico e hidrogeológico a escala 1:50 000 del valle de Cajamarca y alrededores, donde se recopiló información de campo como límites litológicos, cartografiado de los materiales permeables e impermeables, identificación de estructuras (fallas, pliegues y fracturas) y se tomaron medidas de las propiedades hidrogeológicas de las rocas. La información de campo procesada, nos sirvió de base para la elaboración de un modelo hidrogeológico de funcionamiento de las fuentes termales de Baños del Inca. Como elementos esenciales de la estructura del modelo se consideraron a las fuentes termales más importantes de Cajamarca Perolitos y Tragadero (figura 1), la información cartográfica de geología y estructuras, como estructuras que permitan el movimiento y circulación de aguas subterráneas. Para el funcionamiento del modelo se consideraron información de entrada al sistema como las precipitaciones totales (de 600 a 800 mm anual), como elementos de alimentación y recarga de los acuíferos, los cálculos de los conductividad hidráulica y la suma del caudal total de descarga 130 L/s (Perolitos y Tragadero suman 80 L/s y las fuentes menores, cuyas surgencias se encuentran a lo largo del río Chonta suman 50 L/s). El modelo se desarrolló con el software, Flow123D, desarrollado por el centro ARTEC, de la universidad de Liberec (República Checa); se base en el cumplimiento de la ley Darcy y de la ecuación de la continuidad en cada elemento, con la que, se pudo desarrollar la aplicación de redes, combinando elementos 3D, 2D y eventualmente 1D. Esta parte nos permitió unir los elementos volumétricos (propiedades hidrogeológicas de las rocas) y zonas planas (fisuras y fracturas). En base a la información hidrogeológica se discretizó el área modelada, los estratos acuíferos, que fue cubierto por una red porosa (elementos 3D), y a la falla N-S fue representada por los elementos triangulares 2D, donde se consideró también el eje del anticlinal de Baños del Inca. Para la preparación de la red del modelo y la representación gráfica de las salidas de aguas termales se utilizó el software GMSH.



*Figura 1. Ubicación de las fuentes termales Perolitos (A11 y A12 y Tragadero (A3 y A4), en el valle de Cajamarca.*

## GEOLOGÍA LOCAL

El valle de Cajamarca está formado por los sedimentos Triásicos y Jurásicos en su basamento. Las litologías más potentes pertenecen a secuencias plegadas del cretáceo inferior y superior, representado

por rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas. Los sedimentos cuaternarios del valle de Cajamarca alcanzan espesores entre 30-60 m y constituyen un acuífero superior de materiales poroso no consolidados, que contiene aguas frías.

La estructura dominante del área de estudio son pliegues de edad post-cretácica que afectan los sedimentos del cretáceo. Los ejes de pliegues y numerosas fallas de cabalgamiento tienen dirección principal de rumbo ONO-ESE, denominado "andino". Otras estructuras significativas son fallas normales o cizallas del rumbo "anteandino" (N-S). El relieve de erosión sobreyace con discordancia angular sobre rocas volcánicas de edad Terciario Inferior y Superior (flujos piroclásticos, tobas, etc, del Grupo Calipuy, San Pablo y Huambo). Las rocas volcánicas no muestran indicios de deformación compresiva, sólo localmente fueron re-activadas fallas normales y cizallas de rumbo N-S.

Existe una falla de cabalgamiento que va por el valle del río Chonta, con dirección norte, se localiza en las areniscas de grano fino, lutitas y limolitas de la Formación Carhuaz que sobreyacen a las areniscas cuarzosas de la Formación Farrat (foto 1). Esta falla, en profundidad, pone en contacto las areniscas cuarzosas Chimú y las areniscas cuarzosas Farrat generando recarga y mayores dimensiones del reservorio acuífero, la misma que incluye también el flanco sur del anticlinal Baños del Inca. El buzamiento del flanco norte de anticlinal Baños del Inca tiene ángulos moderados (entre 30°-40°). El flanco sur tiene mayor pendiente (hasta 70°) demostrando el carácter asimétrico de este anticlinal (L. Reyes, 1980). Hacia el norte, en el eje del sinclinal de Otuzco se observa toda la secuencia de formaciones Inca, Chúlec, Pariatambo, Yumagual, Quilquiñan-Majarrun, Cajamarca y Celendín. Análogicamente al anticlinal de Baños del Inca, la estructura continúa hacia el norte mostrando areniscas resistentes de la Formación Farrat. El centro del anticlinal está erosionado y relleno por los depósitos fluviales con sedimentos de la Formación Carhuaz.

Hacia el norte los sedimentos cretácicos se encuentran cubiertos por secuencias de rocas volcánicas (piroclásticas y tobas) de los grupos Huambos y San Pablo (L. Reyes; 1980). Hacia el sur se encuentra el anticlinal Yumagual donde aflora la Formación Chimú y constituye la zona de alimentación y recarga principal del acuífero principal.

## **ELEMENTOS DEL MODELO**

El modelo fue elaborado, en la base a secciones y las propiedades hidrogeológicas de las rocas (figura 2). El área de interés fue demarcada por los límites en las que se aplican las condiciones de borde, discretizando para el modelo solo al área de interés, que comprende lo siguiente:

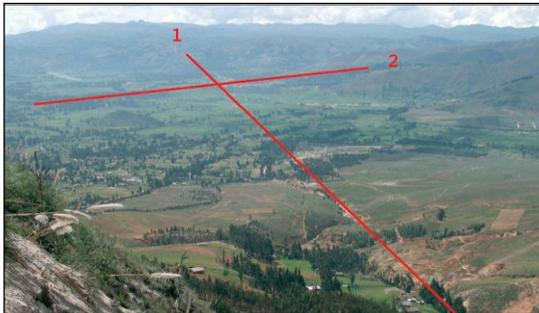
- La base impermeable (Formación Chicama) como límite inferior o piso del acuífero principal (Formación Chimú).
- El acuífero principal, es un estrato fuertemente permeable de areniscas cuarzosas pertenecientes a la Formación Chimú que se encuentra en profundidad y constituye el ambiente de formación de las aguas termales. Esta misma formación aflora al sur de Cajamarca, cerca al anticlinal del Yumagual, donde constituye el área de alimentación y recarga. En profundidad el estrato es intersectado por una falla de cabalgamiento, que pone en contacto directo con otro estrato permeable, las areniscas de la Formación Farrat por donde también interactúa el agua termal.
- El estrato impermeable, sobre el acuífero principal está compuesta de secuencias de arcillitas y lutitas de las Formaciones Santa y Carhuaz, considerados impermeables y constituyen estratos confinantes.
- Estrato permeable (areniscas de la Formación Farrat), que se interconecta mediante una falla de cabalgamiento al acuífero Chimú, en el cual contribuye con la formación de las aguas termales.

Un elemento estructural importante, es la zona de las fracturas (clivaje) en el eje del sinclinal, así como el sistema de las fallas, en las que se encuentran las fuentes termales localizadas, permiten al ascenso de los flujos termales por presión hidráulica natural. De acuerdo al análisis litológico y estructural del valle de Cajamarca se ha identificado tres acuíferos, que interactúan con el funcionamiento del modelo (figura 2).

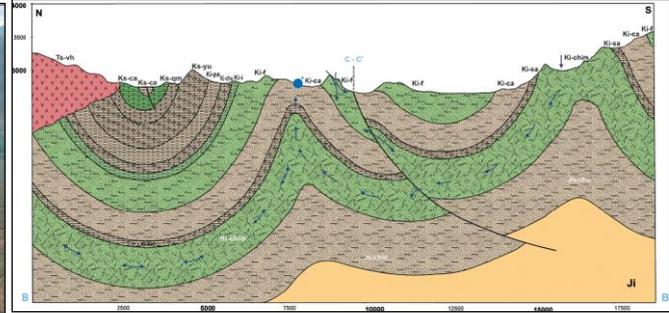
Las areniscas cuarzosas del acuífero Chimú forma el acuífero basal en rocas fracturadas, tienen un espesor de 600 m y yace sobre un acuitardo formado por lutitas laminadas negras con intercalaciones de areniscas finas y grises, perteneciente al Jurásico (Formación Chicama). La parte superior está conformada por margas y limolitas de poca permeabilidad de la Formación Santa (100-150 m) y por areniscas y lutitas de la Formación Carhuaz (500 m), haciendo un espesor de 600 – 650 m y confinando al acuífero principal.

El acuífero medio, está formado por areniscas cuarzosas de la Formación Farrat y tiene espesor de 500 m. Una secuencia gruesa (1,650–1,750 m) de lutitas y margas con intercalaciones de areniscas y calizas de escasa permeabilidad; separa el acuífero medio del acuífero superior.

Además de los acuíferos fracturados en el valle de Cajamarca, existe un acuífero poroso no consolidado en sedimentos fluviales y aluviales de cuaternario, donde ocurre la mezcla de aguas termales provenientes de profundidad con aguas subterráneas frías de poca profundidad.



**Foto 1** Intersección de estructuras que generan la surgencia de las fuentes termales: 1: Falla N-S y 2: Eje del anticlinal de Baños del Inca.



**Figura 2** Modelo hidrogeológico conceptual de las fuentes termales ubicadas en Baños del Inca. Nótese las flechas de color azul, que representa el movimiento de las aguas subterráneas en los acuíferos fisurados, de color verde y la surgencia de la fuente termal sobre el valle de Cajamarca, distrito de Baños del Inca.

### PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LAS ROCAS

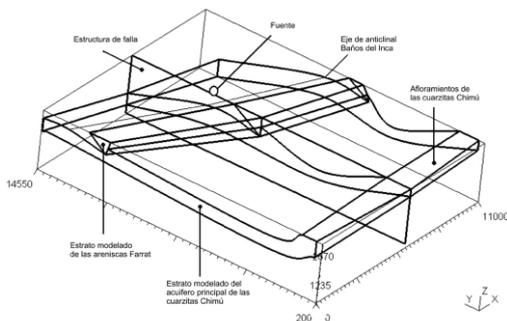
Las propiedades hidráulicas han sido estudiadas por los métodos indirectos, basados en la elaboración estadística de las mediciones de las fracturas y ensayos de infiltración. Estos ensayos se realizaron en dos afloramientos uno en la Formación Farrat, en la proximidad del flanco sur del anticlinal de Baños del Inca y segundo en la Formación Chimú, en el sector del abra el Gavilán, cerca de la carretera Cajamarca – Trujillo, encontrando valores entre 12.5 m/día y 83.5 m/día. En el cuadro 1, calculamos la cantidad del agua infiltrada en L/s para las precipitaciones anuales desde 600 hasta 800 mm con una infiltración de 10 hasta 40%. Considerando que el agua de las fuentes se origina a partir de la infiltración de la lluvia a través de los afloramientos de la Formación Chimú. En el cuadro 1, simula la cantidad del agua infiltrada correspondiente al caudal de surgencia de las fuentes (130 L/s).

**Cuadro 1.** Cálculo de la cantidad de agua que infiltra al acuífero.

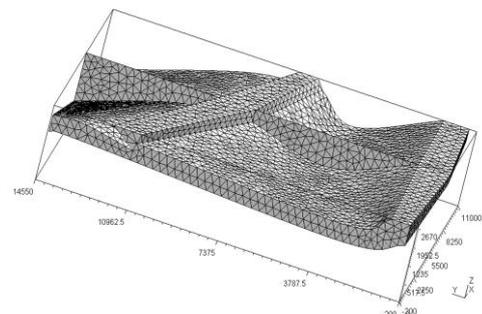
	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
600mm	22.9	34.4	45.8	57.3	68.7	81.7	91.6
650mm	24.8	37.2	49.6	62	74.4	86.8	99.2
700mm	26.7	40	53.4	66.7	80.1	93.4	106.8
750mm	28.6	42.9	57.2	71.5	85.2	100.1	114.4
800mm	30.5	45.7	60.1	76.2	91.5	106.8	122

### MODELO MATEMÁTICO

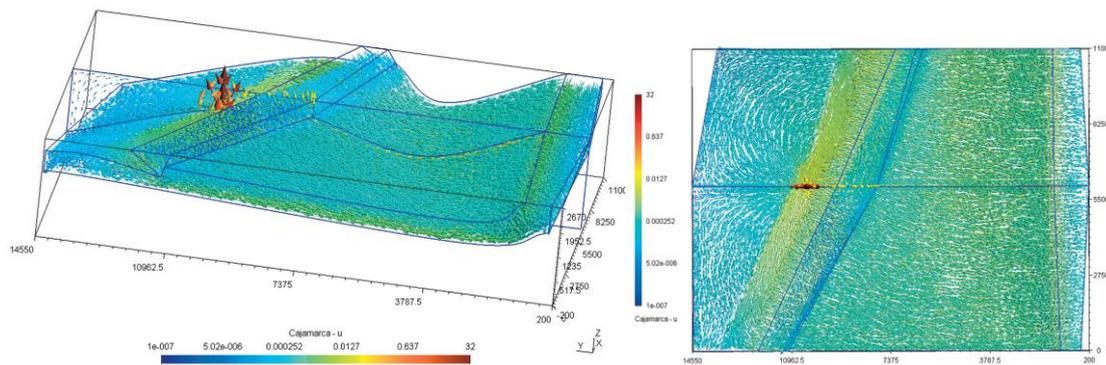
Se ha diseñado una red, que incluye el área modelada, considerando el plano horizontal con un rectángulo de aproximadamente 11×14.6 km, mientras que el espesor considerado es de 2.7 km. La geometría incluye tres elementos principales: el acuífero en las cuarcitas Chimú, la zona fracturada en el eje del anticlinal Baños del Inca y la falla N-S, que fueron tratadas como una superficie subvertical (figura 3). Para los elementos creados, se generó una red que tiene en total 7 972 nudos y 32 512 elementos. Del total, 656 elementos son triangulares mientras que los otros son tetraedros (figura 4).



**Figura 3)** Geometría del área de estudio.



**Figura 4)** Red generada para el cálculo de flujo.



**Figura 5)** Distribución de los vectores de velocidad del flujo del agua subterránea, vista del este (valores numéricos de la escala en  $10^{-5}$  m/s). **Figura 6)** Vista en planta.

En base a los elementos del modelo, las condiciones de borde fueron gradualmente modificadas de manera que el carácter del flujo haga posible la comunicación hidráulica del acuífero con las estructuras por donde circula el agua. La distribución de los niveles piezométricos y de los vectores de la velocidad del flujo en el área modelada, para la variante resultante, debe expresar el estado actual del flujo en el acuífero y en la estructura (figuras 5 y 6).

## ANÁLISIS DE RESULTADOS - MODELO HIDROGEOLÓGICO

La sección hidrogeológica (figura 2), muestra que las areniscas cuarzosas de la Formación Chimú afloran en el borde sur de la cuenca Cajamarca con altitudes entre 3000 – 3500 m.s.n.m. (anticlinal del Yumagual) tiene una extensión de 30 km<sup>2</sup>, constituyendo la zona de alimentación o recarga del acuífero confinado Chimú. En este sector la precipitación pluvial se encuentra entre 630 mm/año (estación Weberbeuer) y 637 mm/año (estación Namora), que viene a ser la fuente de alimentación y recarga de los acuíferos. Una vez infiltrada las aguas de percolación desciende por el acuífero Chimú hasta el límite inferior, donde progresivamente van adquiriendo alta temperatura (a razón de 3 °C por cada 100 m de descenso). Luego el agua subterránea continúa su movimiento con dirección de la inclinación de los estratos hacia el norte impulsado por una presión hidráulica natural (producto del desnivel de 1000 m aprox.). Los Materiales impermeables que yacen continuamente sobre el acuífero Chimú; limonitas y areniscas desintegradas de las Formaciones Santay Carhuaz confinan el acuífero, generando mayor presión en el acuífero. Encima de ellas yacen las areniscas de la Formación Farrat, que forman parte principal del fondo de la cuenca Cajamarca, ya que tienen posición sub-horizontal. Las areniscas de la Formación Farrat (500 metros de espesor) forman un acuífero independiente en la parte superior, sin embargo la intersección de la Falla N-S con el eje del anticlinal de baños del Inca pone en contacto a los acuíferos Chimú y Farrat, facilitando la circulación de aguas subterráneas por estas estructuras (figura 3 y 4). Las areniscas cuarzosas del acuífero Chimú tiene alto contenido de cuarzo y un mínimo contenido de otros minerales, por lo que las fracturas de estas rocas no tienen rellenos de material meteorizado, haciendo que el acuífero Chimú sea muy permeable ( $K =$  de 12 m/día y 83 m/día, Test de campo, F. Peña, 2008). Las surgencias de aguas subterráneas termales y minerales en zona de los Baños del Inca, se producen principalmente por dos grupos de manantiales, Perolitos y Tragadero, sin embargo antes de la surgencia, las aguas termales tienen interacción con las aguas frías del acuífero poroso no consolidado del valle de Cajamarca (espesor aproximado de 30 a 60 m), donde incrementan su caudal y reducen su temperatura a 69 °C y 71 °C.

## CONCLUSIONES:

- Se han identificado tres acuíferos principales, dos de tipo confinado (Chimú y Farrat) y uno de tipo libre, en acuíferos porosos no consolidados de piso de valle.
- Las fuentes termales y minerales en Baños del Inca - Cajamarca incluyen la descarga de dos grupos de fuentes muy importantes, Perolitos y Tragadero (con 80 L/s), el ambiente donde se forman estas aguas corresponden a las areniscas cuarzosas del acuífero Chimú, sin embargo antes de la surgencia tiene interacción con aguas frías del piso de valle, de donde adquieren su temperatura final 70°C.

- Los elementos geológicos estructurales (la falla paralela al valle de dirección N-Sy la intersección con el eje del anticlinal de Baños del Inca condicionan las surgencia de las fuentes termales y minerales en Baños del Inca.
- Las aguas termales de la localidad Baños del Inca en Cajamarca son aptas para el uso en hidroterapias, balneología, para el tratamiento de enfermedades tales como artritis reumática, enfermedades neurológicas, las del sistema locomotor, enfermedades de la piel, incluso cardiovasculares.

#### **REFERENCIAS**

1. Strukmeier, W., Margat, J. (1995), "Hydrogeological Maps A Guide and a standard legend". Inter. Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeologists. Heise, vol 17.
2. Reyes, L. (1980), Boletín N° 31 Serie A de Carta Geológica Nacional, Geología de Los Cuadrángulos de Cajamarca (15-f), San Marcos (15-g) y Cajabamba (16-f), INGEMMET.
3. Peña, Fluquer, Jiri Sima & Lenka Baratoux. (2008): Hidrogeología de las fuentes termales de Cajamarca y Churín para el desarrollo de las aguas termales y minerales, en el XIV Congreso Peruano de Geología, Lima Perú