



## TEMA DEL ARTÍCULO.

- Ciencia y tecnología

### **Empleo del permeámetro de sonda portátil (PPP-250) en el área geotérmica al occidente del Volcán Nevado del Ruiz.**

**David Moreno<sup>1</sup>, Maria Isabel Vélez<sup>2</sup>,  
Jacqueline Lopez-Sanchez<sup>1</sup>, Daniela Blessent<sup>1</sup>,  
Jasmin Raymond<sup>2</sup>**

1 Universidad de Medellín, Programa de Ingeniería Ambiental, Medellín, Colombia

2 Institut National de La Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environment, Québec, Qc, Canada

## RESUMEN

Del 9 al 12 de julio del 2018 se realizó trabajo de campo en una zona ubicada al occidente del Volcán Nevado del Ruiz (VNR), con el objetivo de determinar la permeabilidad in situ de algunas litologías de interés geotérmico, mediante el empleo del permeámetro de sonda portátil (PPP-250) prestado por el Laboratorio Geotérmico Abierto (LOG), INRS, Canadá. En el presente artículo se describe la metodología para el uso del PPP-250 en un medio poroso y fracturado, y se comparan los valores medidos con otros resultados obtenidos en laboratorio reportados en trabajos anteriores.

La realización de este estudio, permitió la construcción de conocimiento común sobre las propiedades hidráulicas de las rocas mediante el empleo del PPP-250. Este conocimiento será útil no únicamente para estudios geotérmicos, sino también para cualquier investigación que implique el estudio de flujos subterráneos y de transferencia de calor relacionados con aguas subterráneas, medio ambiente, explotación de petróleo y gas y estabilidad de obras subterráneas.

## INTRODUCCIÓN

El Laboratorio Geotérmico Abierto o LOG (*Laboratoire Ouvert de Géothermie*), ha sido equipado en el INRS, Canadá, para medir propiedades térmicas e hidráulicas de muestras de rocas. Este laboratorio funciona como un software abierto, para todos los investigadores que quieran hacer análisis gratuitos, a cambio de compartir sus resultados en una base de datos común. Los grupos de investigación interesados deben proveer su propio equipo de trabajo que podrá utilizar los dispositivos de medición de alta tecnología disponibles en el LOG, donde se ofrece supervisión técnica.

Todo tipo de modelación de reservorios geotérmicos, con modelos analíticos o numéricos, requiere como parámetros de ingreso los valores de las propiedades térmicas e hidráulicas de las rocas estudiadas. La Universidad de Medellín en convenio con el INRS y el LOG, realizó el préstamo del Permeámetro de sonda portátil (PPP-250), con el objetivo de determinar la permeabilidad de algunas litologías de interés geotérmico al occidente del Volcán Nevado del Ruiz (VNR), comparar los resultados con valores de permeabilidad medidos en laboratorio, y utilizar esta información en modelos numéricos que se están desarrollando actualmente en ésta institución.

## METODOLOGÍA

Con base en las mediciones de permeabilidad obtenidas empleando el PPP-250 en algunos tipos de litologías de interés, ubicadas en el área



geotérmica al occidente del VNR, se realizó la comparación entre estos valores medidos y los obtenidos por en laboratorio empleando el método de la corrección Klinkenberg presentados en trabajos anteriores realizados en dicha área (Vélez et al., 2018; Moreno et al., 2018). Además se desarrolló y probó un método que permitiera medir la permeabilidad con el PPP-250 de un medio fracturado representado en las fallas geológicas trabajadas en Ceballos (2017), Ossa (2018) y Moreno et al. (2018)

### **I. Selección de puntos de muestreo para medición de permeabilidad con PPP-250**

Los puntos de muestreo fueron seleccionados teniendo en cuenta las rutas y afloramientos de roca reportados por Ceballos (2017) y Vélez et al. (2018), donde principalmente se evidenciaron rocas metamórficas del complejo Cajamarca (Pes), definida por Almaguer (2013) como el posible reservorio geotérmico, y rocas ígneas Andesíticas (NgQa), posiblemente la capa sello.

### **II. Permeámetro de sonda portátil (PPP-250) y procedimiento para su utilización.**

El PPP-250 determina la permeabilidad mediante el método de decaimiento de presión, el cual consiste en monitorear la presión del gas mientras fluye en la muestra de roca, el equipo deducirá la permeabilidad utilizando la ley de Darcy y realizando la corrección Klinkenberg que permitirá calcular la permeabilidad del líquido a partir de la permeabilidad de un gas. El flujo de gas saldrá desde la punta de la sonda y se inyectará

directamente en la superficie de la roca (Filomena et al., 2014).



**Imagen 1.** Permeámetro de sonda portátil (PPP-250)

El procedimiento para la medición de la permeabilidad de las geologías de interés se realizó teniendo en cuenta el Manual de Operaciones desarrollado por Core Laboratories, en donde se divide la metodología de medición en los siguientes pasos:

- i. Ensamblar los componentes del equipo y añadir gas al sistema:

Inicialmente se ensambla al equipo PPP-250 la pistola que se encargará de disparar el gas hacia el medio poroso. En la boca de la pistola se conectará una sonda de longitud y diámetro conocidos la cual tendrá contacto directo con la superficie del medio poroso a medir.

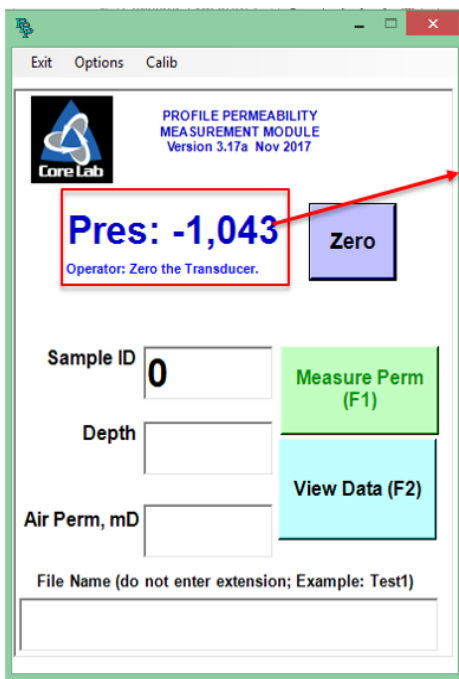
Para inyectar gas al permeámetro será necesario conectar una bomba de aire y suministrar aire sin exceder los 200 psi (un valor seguro es 120-150 psi), durante esta acción la válvula de entrada de aire del permeámetro deberá estar abierta, pero la válvula que permite el paso del permeámetro a la



pistola deberá estar cerrada. Una vez el gas se encuentre en el equipo, se cerrará la válvula del permeámetro y se abrirá la válvula que permite el ingreso de aire del permeámetro hacia la pistola hasta tener una presión de 35 psi aproximadamente.

- ii. Emplear del software y ejecución de la mediciones:

El PPP-250 viene con un software que permite conocer la presión de gas que tiene el equipo, y la presión de gas que se encuentra en la pistola.



Visualización de la presión del equipo o la pistola

**Imagen 2.** Ventana principal del software PPP-250.

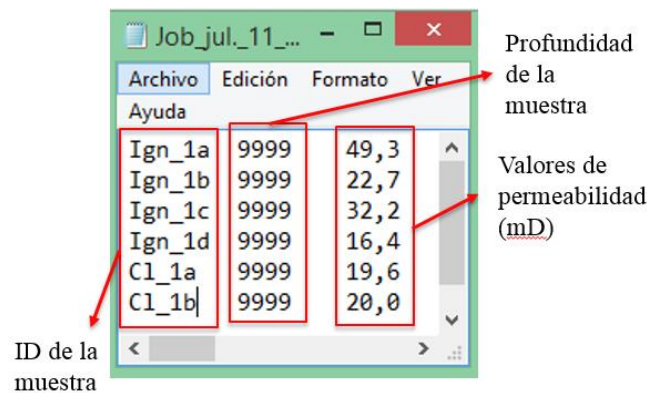
Una vez se ajusten los 35 psi dentro de la pistola, se procederá a realizar la medición, donde se ubicará la sonda en la roca que se desea medir, y al mismo tiempo se deberá disparar el aire de la pistola activando la opción de "medir

permeabilidad" del software. La presión disminuirá lentamente y la medición se detendrá si sucede alguno de los siguientes casos:

- o La presión cae por debajo de 0.5 psi
- o El tiempo de prueba supera los 100 segundos
- o El operador pulsa el botón de "Stop" en el software.

- iii. Visualizar los resultados:

Si la medición se realizó correctamente se guardará el resultado en un archivo txt. Es importante escribir la presión inicial y final después de cada medición ya que no son datos que quedarán registrados en el archivo txt final.



**Imagen 3.** Archivo texto (.txt) para la visualización de resultados del PPP-250

### III. Medición de la permeabilidad de fracturas.

Se realizaron diversos ensayos del procedimiento desarrollado por el grupo de trabajo para medir la permeabilidad de una



fractura con el PPP-250. El procedimiento consistió en tapar la salida del aire de la fractura rellenando los espacios expuestos al exterior con plastilina, así el aire inyectado se dirigiría hacia adentro de la fractura y el cuerpo rocoso, la presión disminuiría controladamente y permitiría obtener un valor de la permeabilidad de la fractura.

Los ensayos para medir la permeabilidad de fracturas fueron llevados a cabo para aperturas aproximadas de 0.5 cm, 0.1cm y fracturas con aperturas no medibles (fisuras).

#### IV. Comparación de los valores de permeabilidad obtenida en mediciones en campo y laboratorio.

En el año 2016, en el marco del proyecto de investigación “Modelación del reservorio geotérmico en la zona norte y occidental del volcán Nevado del Ruiz”, el laboratorio GMASLAB SAS, realizó mediciones de la permeabilidad de algunas muestras geológicas recolectadas al occidente del VNR, la medición de la permeabilidad fue desarrollada mediante el método de la corrección Klinkenberg (Moreno et al., 2018).

Se realizó una comparación de la conductividad hidráulica del Complejo Cajamarca (Pes) y Andesita (NgQa) obtenidos de las medidas desarrolladas en laboratorio por GMASLAB, y los valores obtenidos mediante el empleo in situ del PPP-250. Para la conversión de la permeabilidad a la conductividad hidráulica, fue utilizada una viscosidad dinámica y un peso específico del agua de 0.0011 Pa·s, y 9781 N·m<sup>-3</sup> respectivamente.

#### RESULTADOS

El permeámetro portátil se empleó en 8 puntos, donde se obtuvieron 7 valores de permeabilidad del Complejo Cajamarca, 8 valores de Andesitas, 4 de Ignimbritas y 3 del Complejo Quebradagrande. Estos valores serán analizados y utilizados en trabajos que actualmente se están desarrollando en la Universidad de Medellín sobre modelación del reservorio geotérmico al occidente del VNR

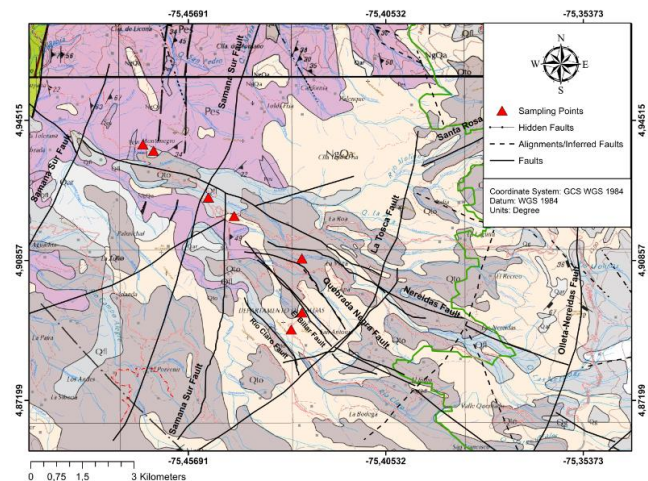


Imagen 4. Mapa del área de estudio y puntos de muestreo.

La metodología para realizar las mediciones de permeabilidad en medio poroso mediante el PPP-250 fue desarrollada con éxito permitiendo llevar a cabo de manera rápida mediciones in situ de las geologías previamente seleccionadas.



**Imagen 5.** Medición de la permeabilidad en un afloramiento de Complejo Quebradagrande empleando el PPP-250.

No se pudieron realizar mediciones correctas para fracturas con aperturas visibles ya que la presión del aire levantaba la plastilina, se perdía la presión muy rápidamente y se obtenía un valor incoherente. Sin embargo, sí fue posible obtener valores de pequeñas fisuras en la roca, en donde se podía evidenciar su influencia en la permeabilidad, en comparación del mismo medio poroso sin fisura.



**Imagen 6.** Ensayo de la medición de la permeabilidad de una fractura empleando el PPP-250.

En la Tabla 1 se exponen en comparación la conductividad hidráulica del Complejo Cajamarca y de Andesitas medidas mediante pruebas de laboratorio por GMASLAB, y el empleo del PPP-250. Los valores de conductividad hidráulica para el Complejo Cajamarca difieren casi en 1 orden de magnitud entre los dos métodos, mostrándose una conductividad hidráulica mayor para la medición realizada con el PPP-250. Con respecto a la Andesita, la conductividad hidráulica obtenida en laboratorio es inferior por 4 órdenes de magnitud a la conductividad hidráulica obtenida con el PPP-250, además, de acuerdo a las mediciones realizadas en laboratorio, la Andesita posee una conductividad hidráulica menor que el complejo Cajamarca, pero en la medición realizada con el PPP-250, la Andesita tiene una conductividad hidráulica mayor al Complejo Cajamarca. Esta diferencia puede generar cambios significativos en los resultados de una modelación.



**Tabla 1. Valores de la conductividad hidráulica medidas en laboratorio y empleando el PPP-250**

| Geología                 | Conductividad Hidráulica en laboratorio por gmas (m/s) | Conductividad Hidráulica empleando el PPP-250 (m/s) |
|--------------------------|--|---|
| Complejo Cajamarca (Pes) | $6.32 \times 10^{-9}$                                  | $1.80 \times 10^{-8}$                               |
| Andesitas (NgQa)         | $8.78 \times 10^{-11}$                                 | $1.32 \times 10^{-7}$                               |

Los cambios de la conductividad hidráulica encontrados mediante los dos métodos laboratorio y campo, pueden deberse principalmente a:

- Heterogeneidad de las geologías analizadas. El complejo Cajamarca ha sido catalogado como una geología muy diversa y heterogénea, sumado además a que al occidente del VNR hay presencia de diversos sistemas de fallas geológicas que afectarían la permeabilidad de incluso un mismo medio poroso dependiendo de la ubicación donde se realice la medición.
- Se realizó el ensayo de permeabilidad Klinkenberg por parte de GMASLAB a solo una muestra de Andesita, por lo que su valor no pudo ser contrastado con otros resultados, y puede estar sujetos a errores.
- Al desarrollar las mediciones con el PPP-250 en campo se pueden presentar fugas de aire debido a la inadecuada posición de la sonda en el afloramiento, estas fugas generarán una permeabilidad errónea aparentemente mayor.

## CONCLUSIONES

El permeámetro de sonda portátil (PPP-250) permite realizar mediciones de la permeabilidad directamente desde los afloramientos de roca de manera rápida y repetitiva, además de ser un

equipo y software fácil de usar que permitirá obtener los resultados directos en forma digital.

La conductividad hidráulica del Complejo Cajamarca medida por el laboratorio de GMASLAB posee una diferencia de un orden de magnitud menor, en comparación del valor encontrado mediante el PPP-250. Si bien esta diferencia es significativa, puede considerarse una variación aceptable teniendo en cuenta la heterogeneidad del Complejo Cajamarca. Por otro lado, la variación de la conductividad hidráulica de la Andesita medida por GMASLAB es 4 órdenes de magnitud menor que lo obtenido en las mediciones en campo, lo cual afecta los resultados de los modelos donde se empleen estos valores. Esta importante diferencia entre conductividades hidráulicas puede deberse principalmente a que el ensayo de permeabilidad Klinkenberg por parte de GMASLAB solo se le realizó a una sola muestra de Andesita y puede estar sujeto a errores de medición.

El convenio entre la Universidad de Medellín, el INRS y el LOG, permitió la construcción de conocimiento común sobre las propiedades hidráulicas de las rocas mediante el permeámetro de sonda portátil (PPP-250). Este conocimiento no solo será útil para estudios geotérmicos, sino también para cualquier investigación que implique el estudio de flujos subterráneos y de transferencia de calor relacionados con aguas subterráneas, medio ambiente, explotación de petróleo y gas y estabilidad de obras subterráneas.

## REFERENCIAS

Almaguer, J.L. Estudios magnetotérmico con fines de interés geotérmico en sector Norte del Nevado del Ruíz, Colombia. MSc thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 139. (2013)



**RENAG**  
REUNION NACIONAL DE GEOTERMIA

**Bogotá**  
**2018**



ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA COLOMBIANA

Ceballos, D.: Análisis geológico y estructural detallado de una zona del proyecto geotérmico en el valle de Las Nereidas, macizo volcánico Nevado del Ruiz, para contribuir en el proceso de exploración geotérmica, CHEC. Universidad de Caldas, Manizales, pp. 70. (2017)

Filomena, C.M., Hornung, J. and Stollhofen, H.: Assessing accuracy of gas-driven permeability measurements: a comparative study of diverse Hassler-cell and probe permeameter devices. *Solid Earth*. V. 5. p. 1–11. (2014).

Moreno, D., Lopez-Sanchez, J., Blessent, D., Raymond, J.: Fault characterization and heat-transfer modeling to the Northwest of Nevado del

Ruiz Volcano. *Journal of South American Earth Sciences*. Volume 88, 2018. pp 50-63. (2018)

Ossa, J.A.: Cartografía detallada de un área del proyecto geotérmico. Informe de pasantía para optar al título de geólogo. Universidad de Caldas. Manizales. pp. 1-91. (2018).

Vélez, M.I., Blessent, D., Córdoba, S., López-Sánchez, J., Raymond, J., Parra-Palacio, E.: Geothermal potential assessment of the Nevado del Ruiz volcano based on rock thermal conductivity measurements and numerical modeling of heat transfer. *Journal of South American Earth Sciences*. 81, pp. 153-164. (2018)