



Boletín de Geología

ISSN: 0120-0283

ISSN: 2145-8553

Universidad Industrial de Santander

Matiz-León, Jhon Camilo; Rodríguez-Rodríguez, Gilbert; Alfaro-Valero, Claudia

Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales y
sensores remotos para el área geotérmica de Paipa, Boyacá-Colombia

Boletín de Geología, vol. 41, núm. 2, 2019, Mayo-Agosto, pp. 71-88

Universidad Industrial de Santander

DOI: 10.18273/revbol.v41n2-2019004

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349664599006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales y sensores remotos para el área geotérmica de Paipa, Boyacá-Colombia

Jhon Camilo Matiz-León^{1*}, Gilbert Rodríguez-Rodríguez¹, Claudia Alfaro-Valero¹

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v41n2-2019004>

Forma de citar: Matiz-León, J.C., Rodríguez-Rodríguez, G., y Alfaro-Valero, C. (2019). Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales y sensores remotos para el área geotérmica de Paipa, Boyacá-Colombia. *Boletín de Geología*, 41(2), 71-88. DOI: 10.18273/revbol.v41n2-2019004.

RESUMEN

Se generaron modelos de temperatura a partir de Sondeos Superficiales de Temperatura (SST) y Sensores Remotos (SR), con imágenes Landsat 8 TIRS para el área geotérmica de Paipa. El rango de temperaturas a 20 cm de profundidad fluctúa entre los 17,04°C y 19,14°C. A 150 cm de profundidad, los valores de temperatura oscilan entre 16,81°C a 19,66°C. La normalización de los valores de temperatura en profundidad (20 cm y 150 cm) en función de la temperatura superficial, elimina el efecto de la radiación solar y permite comparar las temperaturas calculadas con SR tanto en superficie como en profundidad. El coeficiente de correlación de Pearson muestra que existen en su mayoría correlaciones negativas en profundidad (-0,1955) y algunas correlaciones positivas en superficie (0,3125) entre los mapas de anomalía de SST y SR. A su vez se incluyó un análisis de anomalías de uranio (³⁸U) (0 ppm y 205,7 ppm), torio (³²Th) (0,6 ppm y 94,2 ppm) y potasio (⁴⁰K) (0% y 11,8%), mediante espectrometría de rayos gamma, topografía (entre 2500 msnm y 3200 msnm) y las anomalías de temperatura estimadas, encontrando altos y bajos con coincidencia espacial entre las variables.

Palabras clave: Exploración geotérmica; sondeos superficiales de temperatura; sensores remotos; procesamiento digital de imágenes de satélite; geoestadística; Pearson.

Ground temperature model from shallow soundings and remote sensing for geothermal area of Paipa, Boyacá-Colombia

ABSTRACT

Temperature models were generated from Shallow Temperature Surveys (SST) and Remote Sensing (SR) with Landsat 8 TIRS images for Paipa geothermal area. The temperature range at 20 cm depth fluctuates between 17.04°C and 19.14°C. At 150 cm depth, the temperature values range from 16.81°C to 19.66°C. The normalization of the temperature values in depth (20 cm and 150 cm) as a function of the surface temperature eliminates the effect of the solar radiation and allows to compare the temperatures calculated with SR both in surface and depth. Pearson correlation coefficient measure shows that there are mostly negative correlations in depth (-0.1955) and some positive surface correlations (0.3125) between SST and SR anomaly maps. In turn, an analysis of uranium (³⁸U) (0 ppm and 205.7 ppm), thorium (³²Th) (0.6 ppm and 94.2 ppm) and potassium (⁴⁰K) (0% and 11.8%) anomalies by gamma ray spectrometry, topography (between 2500 mals and 3200 mals) and the estimated temperature anomalies, finding highs and lows with spatial matching between the variables.

Keywords: Geothermal exploration; shallow temperatures surveys; remote sensing; digital processing of satellite images; geostatistics; Pearson.

¹ Grupo de Investigación y Exploración de Recursos Geotérmicos, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
(*) jmatiz@sgc.gov.co; gfrorodriguez@sgc.gov.co; calfaro@sgc.gov.co

INTRODUCCIÓN

Los modelos de temperatura de la superficie terrestre cobran especial relevancia en la composición de los modelos conceptuales de áreas geotérmicas para la estimación de los componentes y el potencial de un sistema geotérmico (Coolbaugh *et al.*, 2014). Debido a los costos de perforación de pozos profundos, que permita estimar la estructura termal del subsuelo (Coolbaugh *et al.*, 2007), surgen como alternativa a partir de la evaluación costo-beneficio, los Sondeos Superficiales de Temperatura (SST) en la caracterización de las anomalías de temperatura cercanas a la superficie terrestre (Mwawongo, 2007). Las temperaturas superficiales se encuentran influenciadas por diferentes variables como la radiación solar, difusividad térmica, albedo, pendiente, relieve, profundidad en la tabla de agua, tonalidad de los materiales medidos, áreas con estaciones climáticas (verano e invierno), vegetación y el clima, lo cual dificulta la caracterización del calor de origen geotérmico (Olmsted y Ingebritsen, 1986; Kratt *et al.*, 2009; Beardsmore, 2012). Como método paralelo a la estimación de mapas de temperatura de la superficie terrestre, se integran los sensores remotos que cuentan con imágenes de satélite de observación terrestre en el infrarrojo térmico (Borgogno-Mondino y Lessio, 2015). Con base en la verdad terreno establecida mediante la metodología convencional de los SST, se estima el grado de correlación positiva o negativa con los modelos de temperatura estimados mediante Sensores Remotos (SR), alcanzando dentro de la metodología propuesta, un método de validación que permite verificar las anomalías de temperatura por medio del infrarrojo termal, obteniendo así un insumo de calidad para la interpretación de los valores de temperatura que aporte en la caracterización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa (Boyacá, Colombia) (Alfaro *et al.*, 2012).

METODOLOGÍA

La metodología de investigación, corresponde al procesamiento de un modelo de temperaturas a partir de imágenes de SR, específicamente el procesamiento de imágenes Landsat 8 TIRS (bandas 10 y 11) del área geotérmica objeto de estudio. A las mediciones, se les aplicó una normalización en función de la profundidad, debido a que la fluctuación de la temperatura se extiende generalmente entre los 9 m y 12 m en profundidad, donde se evidencia la influencia de la radiación solar (Florides y Kalogirou, 2005). Teniendo en cuenta que el efecto de la radiación solar aun es predominante,

la medición más somera (20 cm) es referente para la medición profunda (150 cm), la cual en consistencia tiende a ser estable en sus valores de temperatura. La validación del modelo alcanzado mediante el PDI – Procesamiento Digital de Imágenes, se realizó frente a la verdad terreno construida a través del levantamiento de SST por medio del análisis cualitativo de los tratamientos generados a cada imagen. Con miras a establecer una medida cuantitativa de la relación entre las variables (temperatura calculada por los SST y por SR), se ejecutaron pruebas de correlación paramétricas (Pearson) debido a la normalidad de los datos (Baddi *et al.*, 2014).

Zona de estudio

El área geotermia de Paipa (FIGURA 1) se encuentra localizada entre los 5°38' N y los 5°45' N de latitud y los 73°08' W y los 73°10' W de longitud, al sur del área urbana del municipio de Paipa, enmarcada en la zona centro del departamento de Boyacá (altiplano Cundiboyacense). Al pertenecer a la Cordillera Oriental, el área geotérmica se encuentra en una zona con variaciones topográficas, entre los 2.500 msnm – 3.150 msnm (Matiz-León, 2015).

Materiales

Sondeos superficiales de temperatura

Para el levantamiento de los datos de temperatura superficial en el área geotérmica de Paipa, se diseñó una red de muestreo con un espaciamiento entre 300 m y 400 m, enfocada en ciertas áreas de interés, tales como el valle local formado por la caldera y domos volcánicos del Alto de los Volcanes, los domos del Alto de Los Godos y el balneario El Batán, cruces entre fallas, la cantera de El Durazno y zonas de descarga de aguas termales (Rodríguez, 2013). Para el resto del área de trabajo se aplicó una densidad de sondeos de 1.000 m por 1.000 m (Rodríguez, 2013). Las perforaciones se realizaron a 20 cm y 150 cm de profundidad en un mismo punto de muestreo con un tiempo de medición aproximado de 2 minutos, garantizando así la estabilidad térmica del subsuelo en cada medición. El tiempo de medición se establece de acuerdo a las características propias del instrumento (sincronización entre la sonda y el termómetro, material de la sonda y confirmación del sensor para el inicio de las lecturas – puesta a punto de la electrónica para medir). Para el rango de variabilidad en la estabilidad de la lectura (al realizar la perforación, se altera la estructura termal del subsuelo en el punto a medir), es necesario realizar lecturas hasta que el

termómetro asocie un valor de temperatura constante que no oscile en la sonda). La toma de datos se llevó a cabo en tres intervalos de tiempo: entre el 12 de marzo y 22 de marzo de 2013, entre el 5 de junio y 10 de

junio de 2013 y entre el 26 y 27 de mayo de 2014 en su mayoría en el sector rural del municipio de Paipa (Rodriguez, 2013).

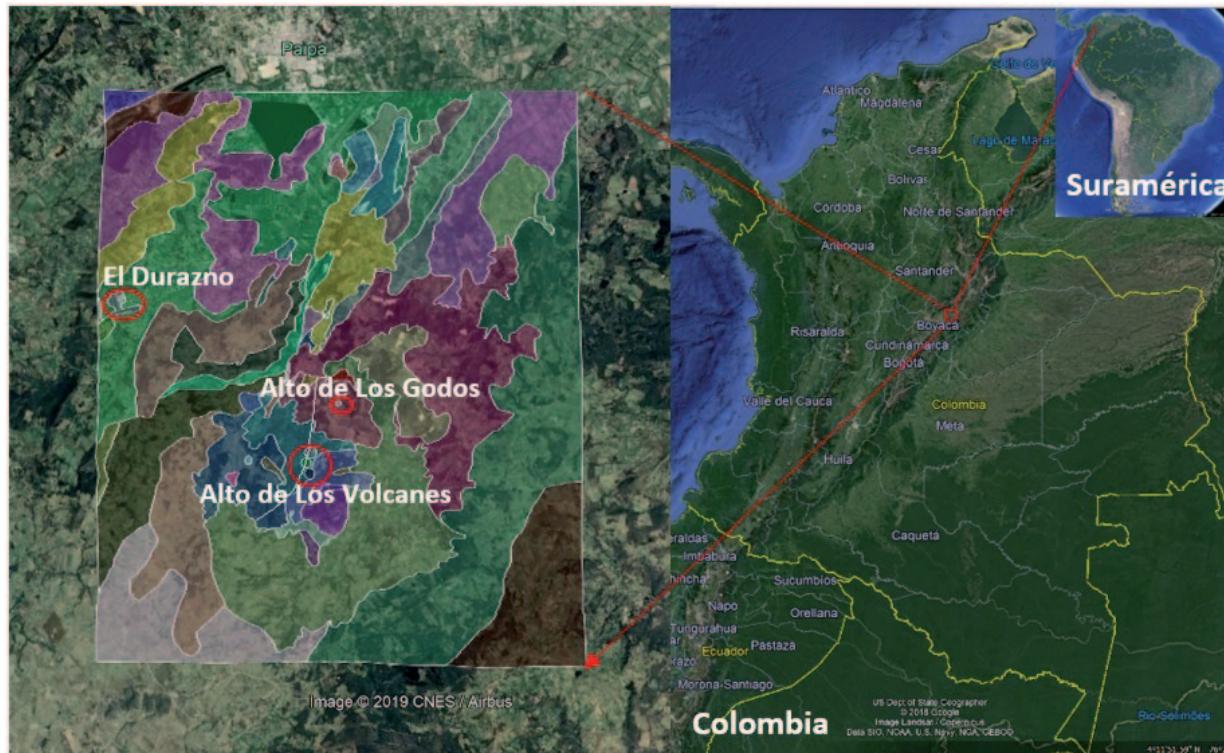


FIGURA 1. Localización y esquema geológico del área geotérmica de Paipa. Modificado de Google Earth. Esquema geológico tomado de Velandia (2003).

Imágenes Landsat 8 TIRS

La plataforma *Landsat 8* cuenta con el sensor *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS), el cual contiene dos bandas en el infrarrojo térmico (bandas 10 y 11). Las imágenes descargadas se buscaron bajo los siguientes criterios: fechas de toma cercanas a las fechas de perforación de los SST y emmascaramiento menor o igual al 15% en cada escena. Las imágenes que mejor se ajustaron a estas características corresponden a las tomadas por el sensor los días 31 de marzo de 2014 y 01 de febrero de 2016. La radiación térmica infrarroja de 10,30 μm a 12,50 μm con una resolución espacial de 100 m (USGS, 2016).

Modelo digital de elevación SRTM de 30 m

Las alturas de la zona de estudio se trabajaron con base en el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y la *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), conocido como el *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) con una precisión global de 1 segundo de arco o en sistemas de referencia proyectados a 30 m (Farr *et al.*, 2007). El SRTM utiliza la banda C de la plataforma Aeroespacial de Imágenes de Radar y la banda X del Radar de Apertura Sintética (X-SAR).

Mission (SRTM) con una precisión global de 1 segundo de arco o en sistemas de referencia proyectados a 30 m (Farr *et al.*, 2007). El SRTM utiliza la banda C de la plataforma Aeroespacial de Imágenes de Radar y la banda X del Radar de Apertura Sintética (X-SAR).

Métodos

Sondeos superficiales de temperatura

Adquisición de temperaturas en terreno. El análisis estadístico de los 141 sondeos de temperatura, contempló una exploración univariada por medio de histogramas, diagramas Cuantil – Cuantil (Q-Q), semivariogramas y la revisión de la tendencia global de los datos. El cálculo de la temperatura superficial se basó en la ecuación 1 (Eslava, 1992), donde T_s ° corresponde a la temperatura media anual del aire en °C y h a la altitud en m.

$$T_s^{\circ} = 28,1 - 0,00553 * h \quad (1)$$

Normalización de las temperaturas con referencia a la T_s° . Una vez calculada la T_s° se normalizan los datos de temperatura por profundidad medida ($T_{20\text{ cms}}^\circ$ y $T_{150\text{ cms}}^\circ$), teniendo en cuenta que los sondeos de temperatura fueron medidos en épocas distintas y que la variación diaria de los rayos solares afecta cada uno de los valores registrados (Rodriguez, 2013). Esta normalización, con el propósito de eliminar el efecto del sol en cada uno de los sondeos, se basa en la diferencia de las temperaturas halladas en profundidad y la T_s° (Ecuación 2). Donde T_{norm}° es la temperatura normalizada y T_{prof}° , la temperatura medida en profundidad. La normalización se aplica para cada uno de los valores de temperatura alcanzados por cada profundidad observada (Rodriguez, 2013).

$$T_{norm}^\circ = T_{prof}^\circ - T_s^\circ \quad (2)$$

Geoestadística. En el procesamiento geoestadístico para la estimación y representación de los mapas de anomalías de temperatura y de elementos radioactivos (uranio, torio y potasio), se tuvieron en cuenta varios modelos estadísticos de interpolación. Se aplicaron pruebas de selección para los modelos de Kriging Simple, Kriging Ordinario, Kriging Universal y Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en

inglés) variando los parámetros que contienen estos modelos, como el *lag* (h), el parámetro de vecindad (número de vecinos), el tipo de geometría para el límite de la vecindad de los datos y el semivariograma experimental (Rodriguez, 2013).

Procesamiento digital de imágenes de satélite

Bandas infrarrojas térmicas de Landsat 8 TIRS. La plataforma *Landsat 8* cuenta con el sensor TIRS, el cual contiene dos bandas en el infrarrojo térmico (bandas 10 y 11). Las imágenes descargadas se buscaron bajo los siguientes criterios: fechas de toma cercanas a las fechas de perforación de los SST y enmascaramiento menor o igual al 15% en cada escena. Las imágenes que mejor se ajustaron a estas características corresponden a las tomadas por el sensor los días 31 de marzo de 2014 y 01 de febrero de 2016 y cuentan con una radiación térmica infrarroja entre 10,30 μm y 12,50 μm (USGS, 2016).

Calculo de las temperaturas. El cálculo de las temperaturas a partir de las imágenes *Landsat 8* consiste en la transformación de los Niveles Digitales (ND) a valores de radiancia (Ecuación 3) (USGS, 2016).

$$L_\lambda = \text{radiancia}_{multibanda_x} * \text{banda}_{termica_x} + \text{radiancia}_{addbanda_x} \quad (3)$$

Donde L_λ es la radiancia espectral, $\text{radiancia}_{multibanda_x}$ es el factor multiplicativo de la radiancia para la banda térmica, $\text{banda}_{termica_x}$ es el valor del pixel en la banda térmica y $\text{radiancia}_{addbanda_x}$ es el factor de escala aditivo de la radiancia para la banda térmica.

Posteriormente la radiancia se transforma en valores de temperatura (Ecuación 4), donde K1 (774,8853) y K2 (1321,0789) corresponden a las constantes de conversión térmica para la banda del infrarrojo termal de la imagen *Landsat* (USGS, 2016). La temperatura es calculada en grados Kelvin, siendo transformada a grados Celsius para la representación de las salidas gráficas de temperatura. Este procedimiento se puede aplicar para las bandas 10 y 11 del sensor TIRS (Li *et al.*, 2005).

$$T_{Kelvin} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

Normalización de las temperaturas con referencia a la $T_{Sup_Landsat}^\circ$. Para comparar las diferencias de temperaturas en profundidad eliminando el efecto del sol, se aplicó la normalización realizada a valores de temperatura calculados a partir de las bandas térmicas de *Landsat*, tomando como base la temperatura superficial calculada con las imágenes TIRS – $T_{Sup_Landsat}^\circ$.

Correlación estadística de la temperatura

Coeficiente de Pearson. Un coeficiente de correlación mide el grado de relación existente entre dos variables aleatorias (Restrepo y González, 2007). El coeficiente de Pearson (Ecuación 5) mide el grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas con distribución normal bivariada conjunta (Baddi *et al.*, 2014). Donde, $\rho_{X,Y}$ es el coeficiente de correlación de Pearson, $\sigma_{X,Y}$ la covarianza de las variables XY, σ_X la desviación estándar de la variable X y σ_Y la desviación estándar de la variable Y (Restrepo y González, 2007).

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}, \text{ donde } -1 \leq \rho_{X,Y} \leq 1 \quad (5)$$

Para el análisis correlacional entre la misma variable de temperatura pero proveniente de dos fuentes de información distinta (verdad terreno = SST e hipótesis = SR), la correlación se realizó pixel a pixel, al transformar cada imagen (interpolada y procesada) como un arreglo matricial y tratada en el ambiente estadístico R *Project*, bajo el proyecto GNU *open source*.

RESULTADOS

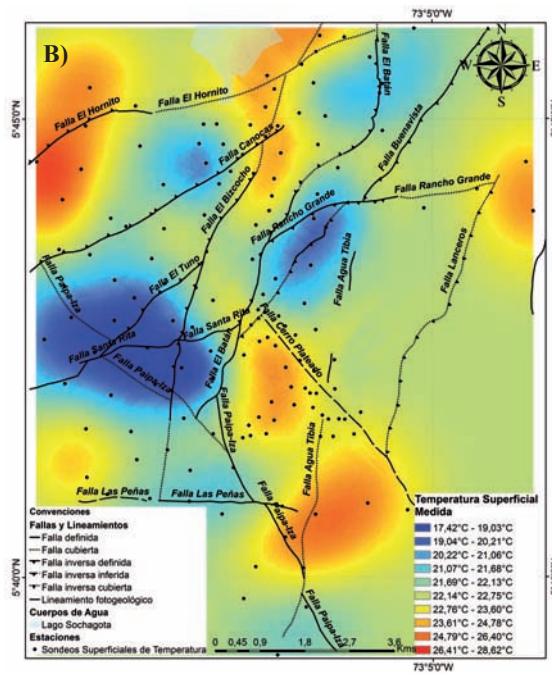
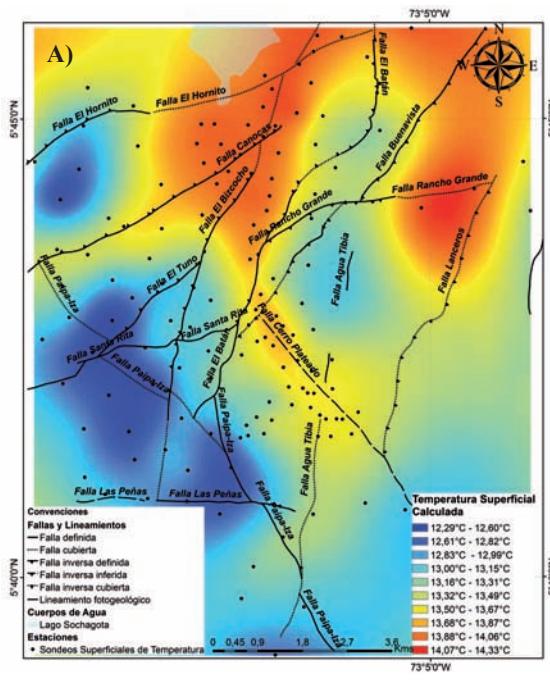
Sondeos superficiales de temperatura

A partir de las pruebas realizadas con los modelos estadísticos, se estableció que los resultados en la interpolación que presentan valores más cercanos a la temperatura real del subsuelo son los generados con Kriging Simple. La selección de este método se evidenció por medio de la generación de los modelos definitivos, teniendo en cuenta que la información estadística resultante, tales como media y error medio cuadrático, contarán con valores cercanos a 0 y 1 respectivamente.

Este análisis, permitió construir los modelos óptimos para representar la distribución de temperatura de acuerdo a los valores registrados. La FIGURA 2 presenta interpolaciones de temperatura media ambiental calculada a partir de la ecuación 1 y, temperaturas medidas en la superficie del suelo a 20 y 150 cm de profundidad. La FIGURA 2A hace referencia a la temperatura calculada en función de la altura de cada SST medido. La

FIGURA 2D, hace referencia a la temperatura medida *in situ* con la instrumentación de campo (termocupla). En las FIGURAS 2A, 2B y 2C, se observa una disminución de las anomalías de alta temperatura (sectores en rojo) localizadas en el sector noroccidental del área de trabajo, desde los 0 cm hasta los 150 cm de profundidad. Existe un corredor anómalo entre las fallas El Hornito y Canocas en dirección nororiental.

Las anomalías con bajas temperaturas (sectores en azul), se encuentran focalizadas en la parte centro occidental del área, con una tendiente disminución en dirección suroriental, por el borde de la Falla Paipa-Iza. También se observa una acumulación de bajas temperaturas en el sector del Alto de Los Volcanes (FIGURA 1), donde se encuentra localizados los domos del mismo nombre. De 0 cm a 150 cm, se observa un patrón de disminución de la temperatura por áreas de cubrimiento, pero a su vez un patrón de estabilización de la temperatura en profundidad (rangos de temperatura de los 22°C a 0 cm, pasando a 18°C a una profundidad de 150 cm – FIGURAS 2A, 2C y 2D). Aplicada la normalización (reducción del efecto del Sol en las mediciones) a las temperaturas medidas en profundidad en función de la temperatura superficial calculada, se observa en las FIGURAS 2E y 2F, que existe un aumento de la temperatura hacia el corredor formado entre las fallas El Hornito y Canocas. A su vez, se acentúa una anomalía de altas temperaturas en el cruce de las fallas El Bizcocho, Santa Rita, El Batán y Paipa-Iza, localizadas hacia el centro del área de trabajo (FIGURA 2E y 2F).



Continuación FIGURA 2.

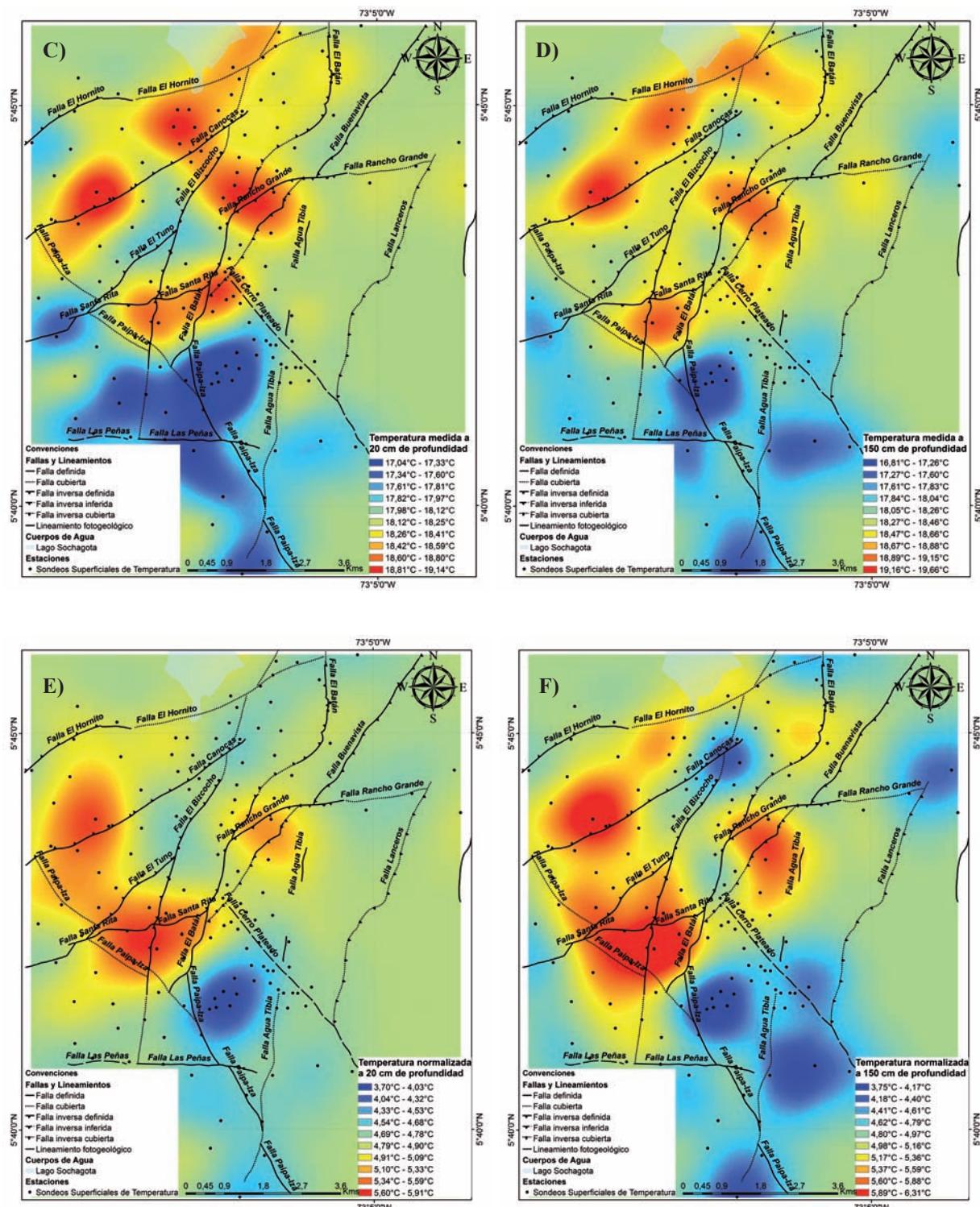


FIGURA 2. Temperaturas a partir de SST. A. Temperatura superficial calculada. B. Temperatura medida en superficie. C. Temperatura medida a 20 cm. D. Temperatura medida a a 150 cm. E. Temperatura mormalizada a 20 cm. F. Temperatura normalizada a 150 cm (Rodriguez, 2013). Geología estructural tomada de Velandia (2003).

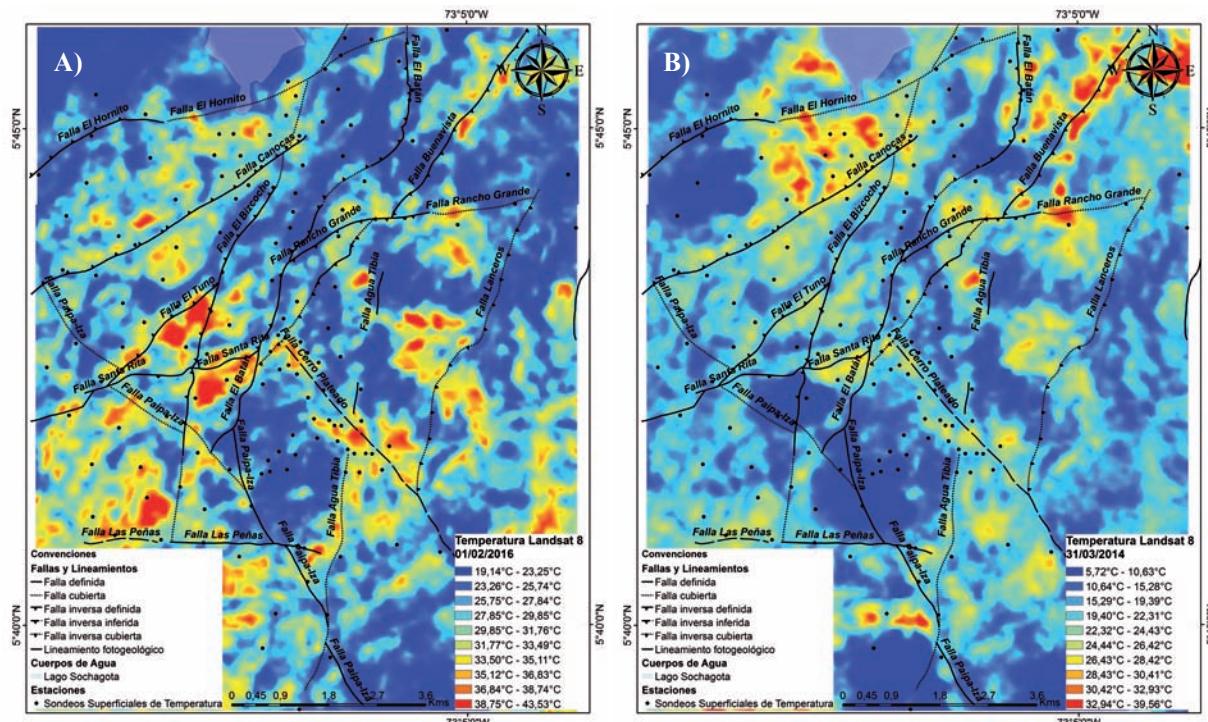
Las anomalías con bajas temperaturas, se denotan hacia el borde de la Falla Cerro Plateado, en dirección sur, conformando un corredor de anomalías bajas con la Falla Paipa-Iza.

Landsat 8 TIRS

El cálculo de la temperatura a partir de los ND, aunque si bien está influenciado por la radiancia solar emitida en cada uno de los días seleccionados, se evidencia en las temperaturas directas (FIGURAS 3A y 3D) que existe una concentración de altas temperaturas en el corredor entre las fallas El Hornito y Canocas. Otra zona de anomalía se observa en la parte nororiental del área de trabajo, remarcada por el borde de la Falla Buenavista y con una tendencia de la anomalía de altas temperaturas hacia el nororiente. El sector suroccidental registra anomalías positivas en la vecindad de la Falla Las Peñas y en la proximidad de la Falla Paipa-Iza con las fallas El Tuno y El Batán. Una vez normalizadas las temperaturas en profundidad pero en función de la temperatura superficial calculada

por SR (FIGURAS 3B y 3C), se evidencia que para el día 31/Mar/2014, el aumento de la profundidad acentúa las anomalías vistas en superficie, remarcando áreas con anomalías de bajas temperaturas. Estas anomalías se presentan en el cruce de las fallas Paipa-Iza y El Batán, situado en el área del Alto de Los Volcanes y al cruce entre las fallas Buenavista, Rancho Grande y El Batán (FIGURAS 2 y 3) pero remarcada en dirección noroccidental.

Una última zona de bajas temperaturas se realiza en el corredor de las fallas El Hornito y Canocas, en dirección norte. En la normalización aplicada a los valores en profundidad pero en función de la temperatura calculada para el día 01/Febrero/2016, se evidencia una baja de temperatura en general para toda el área comparada con los cálculos para el día 31/Mar/2014 (FIGURAS 3E y 3F). El realce de tres zonas con altas temperaturas, una en el marco de las fallas Santa Rita, Las Peñas y Paipa-Iza, en el cruce de las fallas Cerro Plateado y Agua Tibia y en el cruce de las fallas El Tuno, Santa Rita y El Bizcocho.



Continuación FIGURA 3.

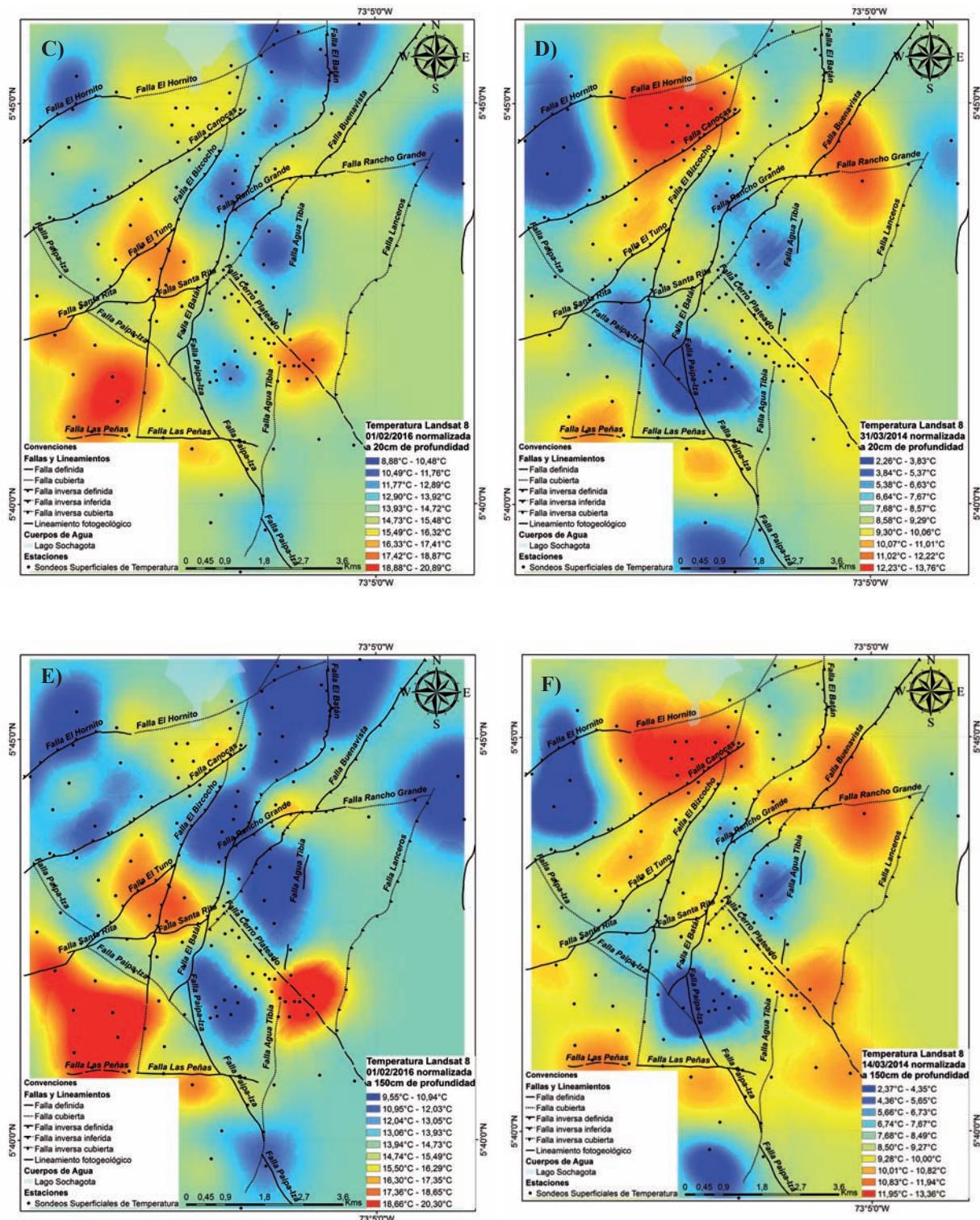


FIGURA 3. Temperaturas a partir de Landsat 8 TIRS. **A.** Temperaturas para el 01/febrero/2016. **B.** Temperaturas para el 31/ marzo/2014. **C.** Temperatura normalizada a 20 cm para el 01/febrero/2016. **D.** Temperatura normalizada a 20 cm para el 31/ marzo/2014. **E.** Temperatura normalizada a 150 cm para el 01/febrero/2016. **F.** Temperatura normalizada a 150 cm para el 31/ marzo/2014. Geología estructural tomada de Velandia (2003).

Correlación estadística

La correlación encontrada a partir del coeficiente de Pearson (TABLA 1), mostró que existe una correlación positiva entre la temperatura calculada en función de la altura (Ecuación 1) y la temperatura de SR calculada para el día 31/Mar/2014 de 0,3125, siendo la única correlación positiva entre las temperaturas de superficie sin normalizar en función de las temperaturas medidas en profundidad. Las dos correlaciones negativas se presentaron con la temperatura calculada a partir de SR para el día 01/Febrero/2016, al ser correlacionadas con la temperatura calculada en función de la altura y la temperatura medida en superficie (-0,1915 y -0,1955 respectivamente). La correlación de -0,0055 aunque es una correlación negativa, muestra su tendencia hacia el cero, marcando una no existencia de relación lineal entre la temperatura medida en superficie y la calculada por SR el día 31/Mar/2014.

En la TABLA 2 se observan los coeficientes de correlación de Pearson encontrados para las temperaturas

en profundidad normalizadas en función de la T_s° . Las normalizaciones tanto para la temperatura encontrada a 20 cm y 150 cm como para la proveniente de SR para el 31/Mar/2014 normalizadas a esas mismas profundidades correspondieron a correlaciones negativas (-0,0747 y -0,1256 respectivamente). En comparación de las normalizaciones aplicadas a las profundidades trabajadas (20 cm y 150 cm) frente a la temperatura calculada para el 01/Febrero/2016 normalizadas en profundidad, las correlaciones son positivas tendientes al cero, siendo 0,0783 para la normalización a 20 cm y 0,0284 a 150 cm. En cuanto a las correlaciones generadas al comparar las temperaturas calculadas directamente sin normalizar para las dos fuentes varió en su tipo de correlación en función de la profundidad. La temperatura medida a 20 cm contrastada con las temperaturas de SR para ambos días 2014 y 2016 correspondió a 0,2163 y 0,1913 respectivamente. Para las profundidades de 150 cm sin normalizar, se encontraron correlaciones negativas tendientes al cero de -0,0231 para el 2014 y de -0,0204 para el 2016.

TABLA 1. Coeficientes de Correlación de Pearson para temperaturas superficiales.

Variables	Coeficiente de Pearson
Temperatura calculada en función de la altura vs temperatura calculada por SR para el día 31/Mar/2014	0,3125
Temperatura calculada en función de la altura vs temperatura calculada por SR para el día 01/Febrero/2016	-0,1915
Temperatura medida en superficie vs temperatura calculada por SR para el día 31/Mar/2014	-0,0055
Temperatura medida en superficie vs temperatura calculada por SR para el día 01/Febrero/2016	-0,1955

TABLA 2. Coeficientes de Correlación de Pearson para temperaturas en profundidad.

Variables	Coeficiente de Pearson
Temperatura a 20 cm normalizada vs temperatura calculada por SR para el día 31/Mar/2014 normalizada a 20 cm	-0,0747
Temperatura a 150 cm normalizada vs temperatura calculada por SR para el día 31/Mar/2014 normalizada a 150 cm	-0,1256
Temperatura a 20 cm normalizada vs temperatura calculada por SR para el día 01/Febrero/2016 normalizada a 20 cm	0,0783
Temperatura a 150 cm normalizada vs temperatura calculada por SR para el día 01/Febrero/2016 normalizada a 150 cm	0,0284
Temperatura a 20 cm vs temperatura calculada por SR para el día 31/Mar/2014	0,2163
Temperatura a 150 cm vs temperatura calculada por SR para el día 31/Mar/2014	-0,0231
Temperatura a 20 cm vs temperatura calculada por SR para el día 01/Febrero/2016	0,1913
Temperatura a 150 cm vs temperatura calculada por SR para el día 01/Febrero/2016	-0,0204

Anomalías de uranio, torio y potasio

Los mapas de anomalías de uranio (^{38}U), torio (^{32}Th) y potasio (^{40}K), se generaron a partir de 304 sitios de medición con datos de concentración de masa para estos tres elementos radioactivos (González *et al.*, 2008). La representación de la interpolación de las anomalías se realizó por medio del método Kriging Simple. Las concentraciones de masa para los elementos ^{38}U y ^{32}Th , están dadas en partes por millón (ppm) y para ^{40}K en porcentaje (%). En la FIGURA 4, se observan los mapas con las anomalías encontradas a partir de la interpolación para el área geotérmica de Paipa para cada uno de los elementos. Debido a que la cobertura de los datos es una limitante para establecer las zonas de confiabilidad de la interpolación, los límites de los productos raster generados están asociados al efecto de borde para las anomalías representadas en cada uno de los mapas.

En la FIGURA 4A (mapa de anomalías de ^{38}U), se evidencia la presencia de una anomalía entre los 90,12 y 205,7 ppm localizado en la intersección de las fallas Paipa-Iza y Canocas, donde también se ubica la brecha hidrotermal llamada El Durazno (FIGURA1). Otra de las anomalías identificadas, se observa en la intersección de las fallas Rancho Grande y El Batán (FIGURAS 2 y 3) (entre 18,63 y 40,20 ppm). Transversalmente a la parte norte de la Falla Cerro Plateado, se denota otra anomalía positiva entre 9,32 y 40,20 ppm de concentración de masa de ^{38}U . También se aprecian ciertos corredores hacia la parte este (entre las fallas Agua Tibia y Lanceros) con valores medios de concentración (entre 5,30 y 9,32 ppm) y la parte oeste (entre las fallas El Tuno, El Bizcocho y Santa Rita) con valores medios a bajos de concentración (0 a 1,73 ppm). En la FIGURA 4B (mapa de anomalías de ^{32}Th), se observa una anomalía positiva ubicada en el sector de El Durazno, con valores entre los 15,05 y 31,23 ppm de concentración de masa para ^{32}Th . En el sector del cruce de las fallas Rancho Grande, El Batán, Buenavista y Cerro Plateado (FIGURAS 2 y 3), se localiza una anomalía negativa, entre 6,04 y 10,90 ppm. La mayoría del área con datos, evidencia una acumulación de valores medios (10,90 a 15,05 ppm) de concentración de masa para ^{32}Th .

Para la FIGURA 4C (mapa de anomalías de ^{40}K), se denotan tres anomalías positivas sin estar asociadas al efecto de borde del método de interpolación. La primera anomalía se establece sobre el sector de El Durazno, con valores entre 3,2% y 11,8% de concentración de

masa de ^{40}K . La segunda anomalía se localiza entre las fallas El Batán y Cerro Plateado, delimitando en la parte más suroeste con la Falla Paipa-Iza. Esta anomalía se contiene entre 1% y 6,09% de concentración de masa de ^{40}K . La tercera anomalía positiva se encuentra entre las fallas Agua Tibia y Lanceros con valores de 0,43% a 3,20%. Del mapa también hacen parte tres anomalías negativas. La primera ubicada entre las fallas de El Tuno, El Bizcocho y Canocas (FIGURAS 2 y 3), con valores de 0% a 0,28%. La segunda en inmediaciones del sector sureste del área de estudio, con valores entre 0% y 0,33% y la tercera entre las fallas Santa Rita, Paipa-Iza y Las Peñas, con valores de 0% y 0,28% de concentración de masa de ^{40}K .

Secciones cruzadas de temperatura, ^{38}U - ^{32}Th - ^{40}K y topografía

Con el objetivo de comparar espacialmente la distribución de las temperaturas en función de la profundidad en el área de estudio y de las imágenes Landsat 8 TIRS, incluyendo las anomalías de uranio, torio y potasio y la topografía, se trazaron dos secciones cruzadas (FIGURA 5), una en sentido noroeste – sureste (A–A') y la segunda en sentido suroeste – noreste (B–B').

Para cada una de las secciones cruzadas, se aplicaron técnicas de análisis espacial con el fin de establecer criterios de espacialidad para las anomalías positivas y negativas de cada variable (temperaturas de SST, de Landsat 8 TIRS, anomalías de elementos radioactivos y la topografía) (Norini *et al.*, 2015).

Sección cruzada A–A'

Las temperaturas encontradas a partir de los SST, muestran valores entre los 18°C hasta los 20°C, en las mediciones realizadas a 20 cm y 150 cm de profundidad para toda la sección cruzada, alcanzando las temperaturas más bajas entre la Falla El Batán y los domos del Alto de Los Volcanes (FIGURA 6A). Las temperaturas calculadas oscilan entre los 12°C y los 14°C para toda la sección cruzada, mientras que las temperaturas medidas en superficie son mayores y varían en el rango de los 18°C a los 28°C en toda la sección, obteniendo el valor máximo en el sector comprendido entre las fallas Canocas y El Batán. Para las temperaturas calculadas a partir de Landsat 8 TIRS (FIGURA 6B), se aprecian valores más altos para el día 16/02/2016 en comparación con las temperaturas calculadas para el día 31/03/2014.

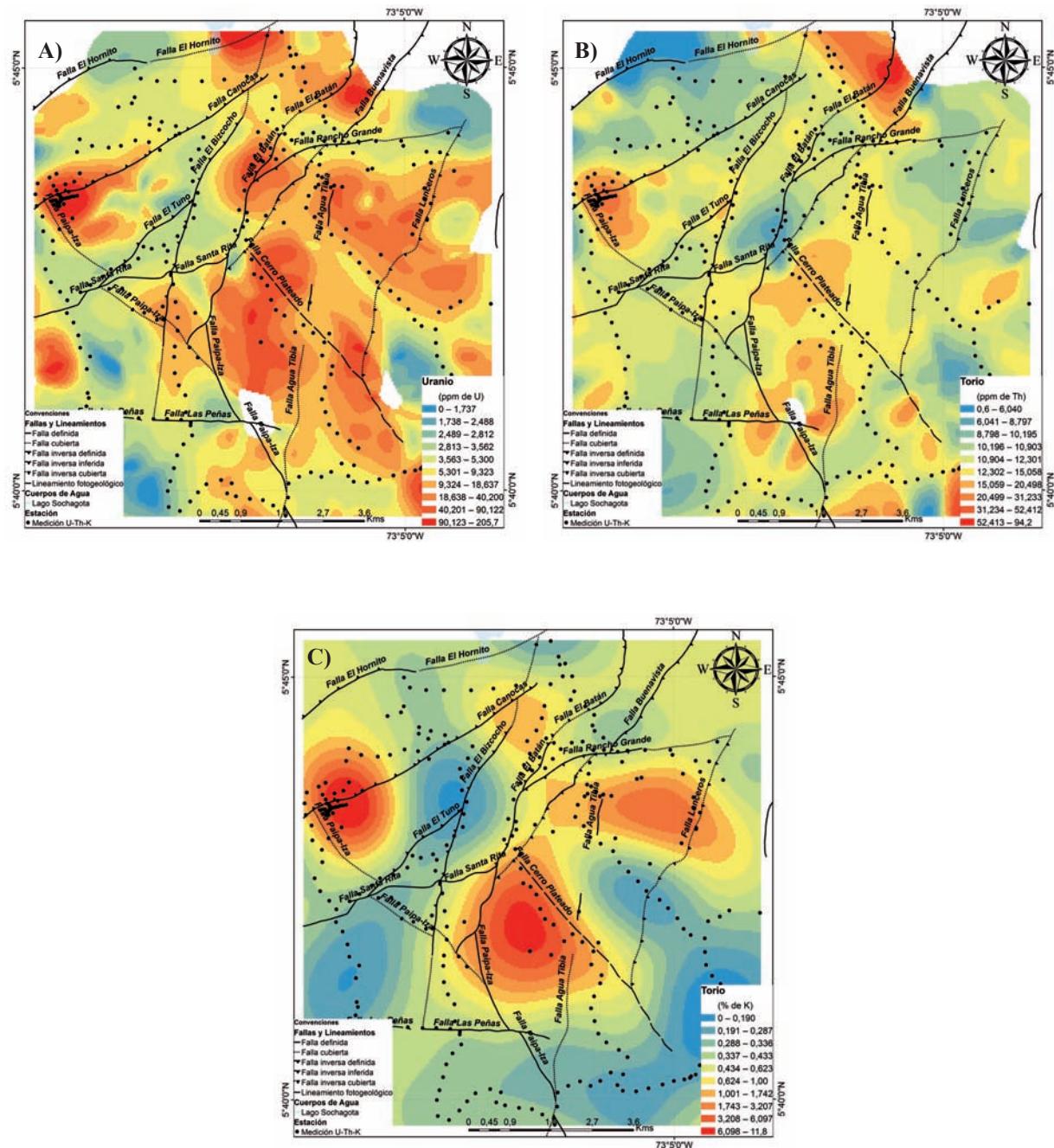


FIGURA 4. A. Mapa anomalía de uranio (^{38}U). B. Mapa de anomalía de torio (^{32}Th). C. Mapa de anomalía de potasio (^{40}K). Datos de ^{38}U , ^{32}Th y ^{40}K tomados de González *et al.* (2018). Geología estructural tomada de Velandia (2003).

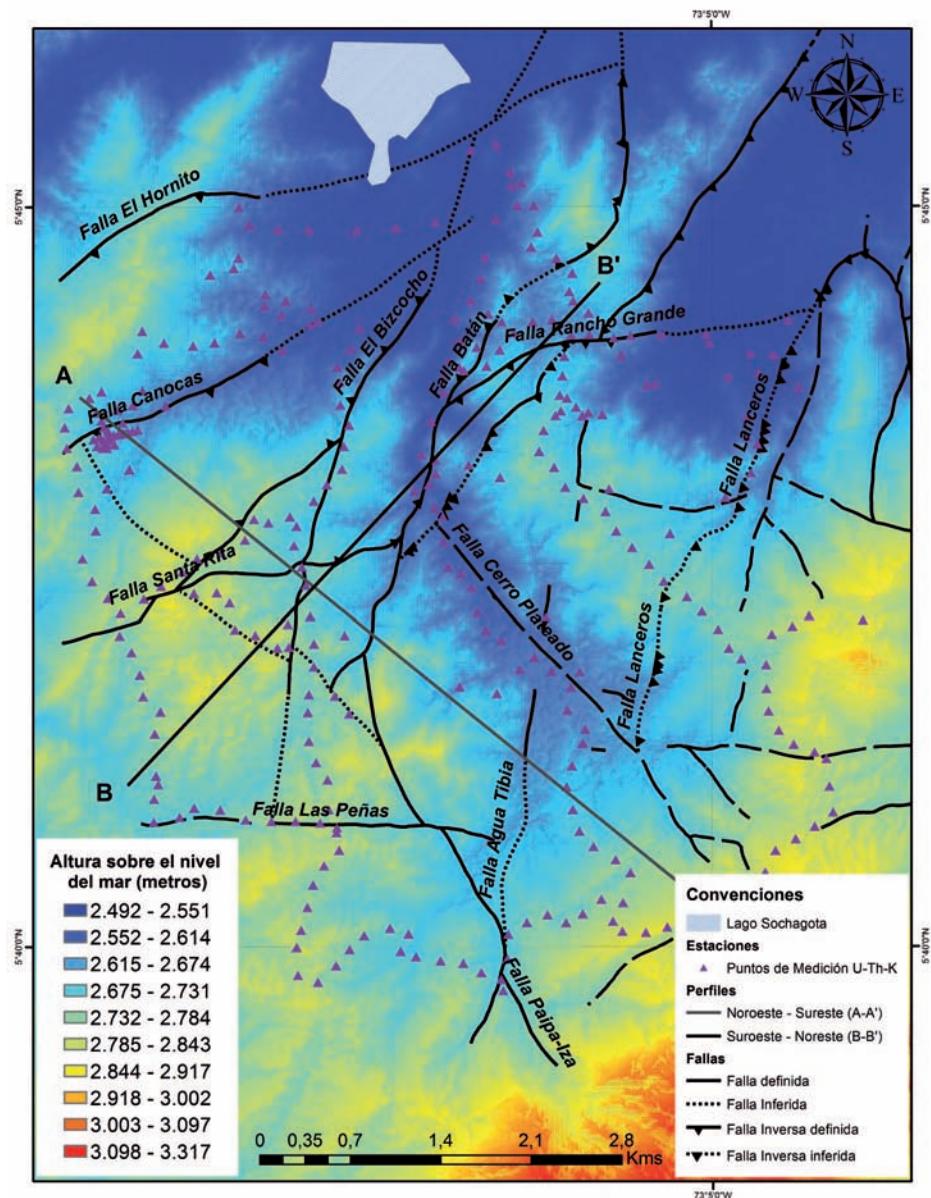


FIGURA 5. Localización de las secciones cruzadas A-A' y B-B' en el área de trabajo sobre el Modelo Digital de Elevación (MDE) y el esquema estructural. Modificado de Velandia y Cepeda (2004).

La tendencia de las temperaturas es similar durante toda la sección, exceptuando un contraste de anomalías entre las fallas Santa Rita y El Batán, con una anomalía positiva (hasta 45°C) para el día 16/02/2016 y una anomalía negativa para el día 31/03/2014 (por debajo de los 15°C). En cuanto a las mediciones de ^{38}U , ^{32}Th y ^{40}K (FIGURA 6C), se encontró una tendencia hacia arriba en las anomalías de los tres elementos localizada para el sector de El Durazno (FIGURA 1) (82 ppm de concentración de masa de ^{38}U , 95 ppm de concentración de masa de ^{32}Th y 41% de concentración de masa de ^{40}K). En la parte más

sureste de la sección, se denota un aumento para ^{38}U y ^{32}Th (100 ppm y 71 ppm respectivamente), mientras la concentración de masa para ^{40}K disminuye (7%).

La topografía presente a lo largo de la longitud de la sección cruzada (FIGURA 6D), muestra un alto topográfico para el sector de la Falla El Tuno (2.810 msnm) y otro para el sector del Cerro Plateado, extremo sureste de la sección (mayor a 2.900 msnm). Los domos del Alto de Los Volcanes se localizan en la parte central de la sección, con alturas entre 2.600 msnm y 2.790 msnm.

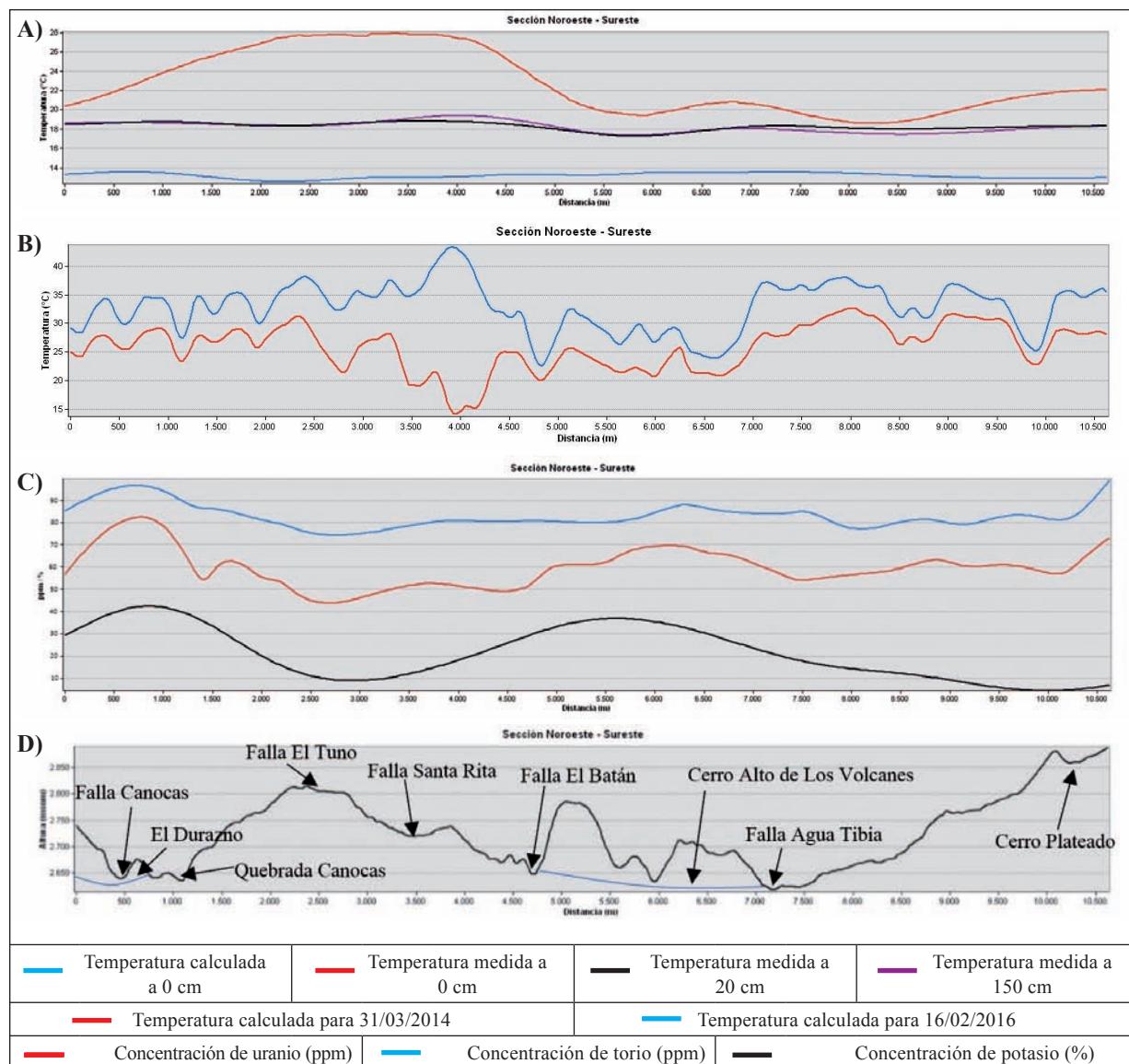


FIGURA 6. Sección cruzada A–A'. **A.** Correlación de SST. **B.** Temperaturas de Landsat 8 TIRS. **C.** Anomalías de ^{38}U - ^{32}Th - ^{40}K . **D.** Topografía.

Sección cruzada B–B'

Las temperaturas medidas con los SST para las profundidades de 20 cm y 150 cm (FIGURA 7A) conservan la misma tendencia sin la presencia de anomalías positivas o negativas durante toda la sección, con valores entre 18°C y 20°C. Las temperaturas calculadas para la superficie mantienen la tendencia de las temperaturas a profundidad en un rango menor (entre 12°C y 14°C) y las temperaturas medidas en superficie tienen una variación notoria a lo largo del

perfil, con una anomalía positiva de temperatura (hasta 29°C) en el área ubicada entre las fallas Paipa-Iza y Santa Rita, una anomalía negativa entre las fallas Santa Rita y El Batán (hasta 21°C). Con Landsat 8 TIRS, se evidencia una tendencia similar en gran parte de la sección cruzada con una fuerte variación entre los dos días medidos (por debajo de 10°C para el día 31/03/2014 y hasta 42°C para el día 16/02/2016), en el sector comprendido entre las fallas San Rita y Paipa-Iza (FIGURA 7B).

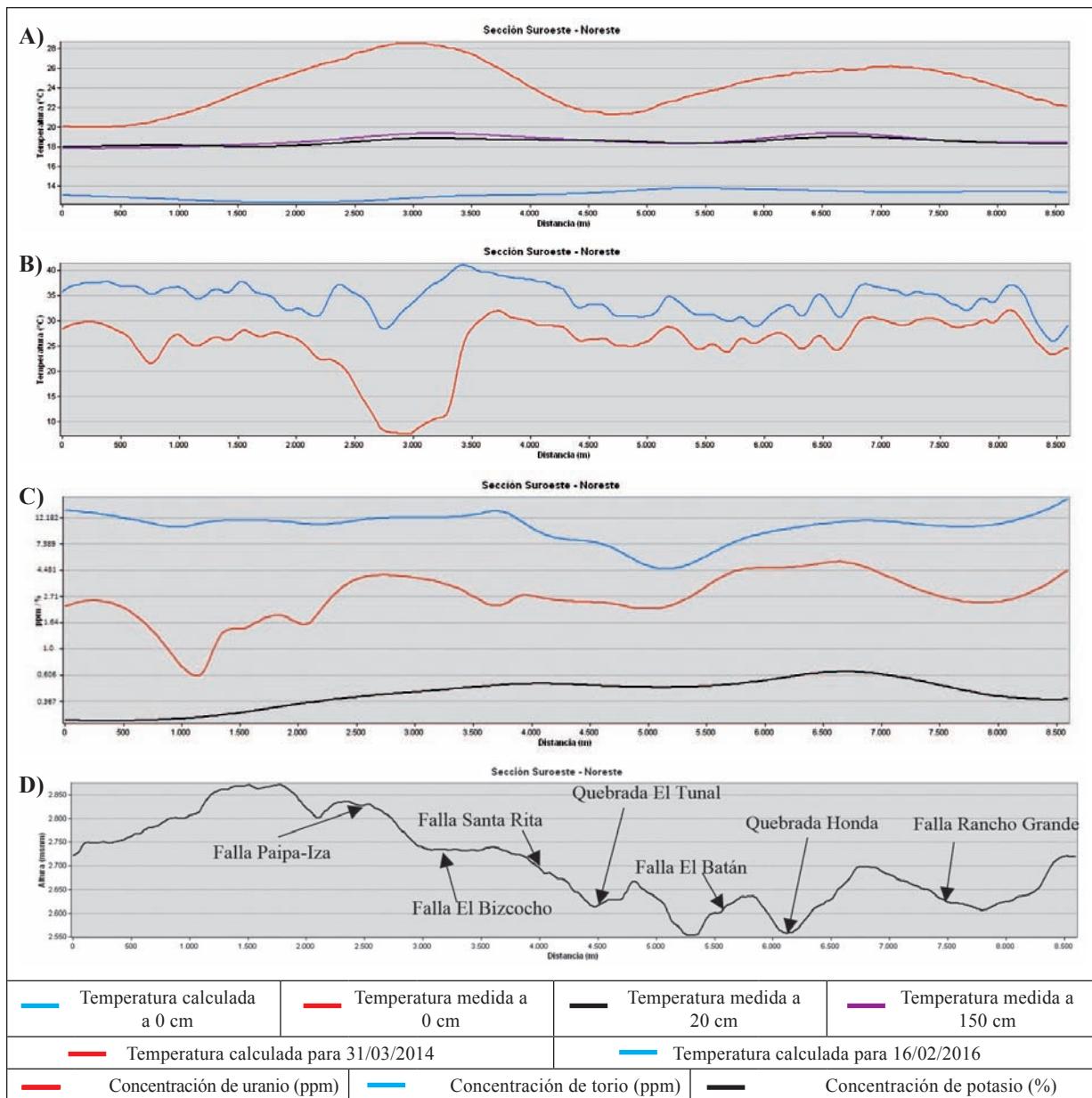


FIGURA 7. Sección cruzada B-B'. A. Correlación de SST. B. Temperaturas de Landsat 8 TIRS. C. Anomalías de ^{38}U - ^{32}Th - ^{40}K . D. Topografía.

Las anomalías de los elementos radioactivos (FIGURA 7C) registradas para el sector de la Falla Santa Rita, se observa una anomalía de ^{38}U , cercana a 2,71 ppm. La concentración de masa de ^{32}Th se mantiene estable sobre los 12,18 ppm y para el ^{40}K , es cercano al 0%. El valor más bajo de ^{38}U se denota en las inmediaciones del sector de la Falla Paipa-Iza (0,606 ppm) y el valor más bajo de ^{32}Th , se localiza en la Falla El Batán (4,48 ppm). Hacia la parte sureste de la sección cruzada,

se denota una caída en la concentración de masa de ^{40}K , cercana al 0,367% y un alza de 4,48 ppm de concentración de masa para U y de 12,20 ppm para ^{32}Th . El flanco suroeste de la Falla Paipa-Iza alcanza un alto topográfico de 2.870 msnm y desde la Falla Santa Rita hasta la Quebrada Honda con alturas de 2.550 msnm, siendo un bajo topográfico (FIGURA 7D) para el área de trabajo.

DISCUSIÓN

La temperatura superficial terrestre bajo las dos técnicas tratadas en el alcance de esta investigación, ha sido medida directa (Beardmore, 2012) e indirectamente (Becerra-Gonzalez *et al.*, 2016). La asunción de los SST como verdad terreno, se deriva de la posibilidad directa del método de medir la temperatura con instrumentación en terreno, lo cual permite alcanzar valores con una mejor precisión (Abouriche, 1989). La hipótesis con la temperatura superficial calculada a partir de SR, bajo el supuesto de correlacionar las temperaturas del infrarrojo térmico del sensor TIR de Landsat 8 con las mediciones en profundidad (150 cm), permite inferir una correlación negativa, que tiende a cero (sin correlación lineal) entre los valores alcanzados. En comparaciones con temperaturas más someras (20 cm), la correlación es positiva en las dos imágenes tenidas en cuenta al procesar. Al examinar los valores normalizados, tanto de los SST como de los SR, se evidencia una variación en el tipo de correlación, según la imagen Landsat utilizada. Sin embargo, la tendencia de estos valores de correlación es su proximidad al cero, donde se relaciona que el tratamiento de los valores de temperatura calculados con SR al ser incluso normalizados en función de la T_s^o , no representan la verdad terreno.

La asociación de las anomalías encontradas por SST a mecanismos conductivos de transferencia de calor en los cruces de fallas sin la influencia de manantiales termales cercanos, se enmarcan en las imágenes de SR como áreas de anomalías altas pero con intensidades de temperatura medias.

Las anomalías de temperatura que se evidencian a partir de los SST, indican la transferencia de calor por conducción desde rocas intrusivas en enfriamiento subyacentes a los domos (Alto de los Godos y Alto de los Volcanes) (Alfaro *et al.*, 2012) y un eventual flujo de aguas subterráneas con recarga a nivel regional ligado a un efecto de convección de fluidos (Alfaro *et al.*, 2012).

A su vez, es probable que las anomalías positivas de temperatura en particular las localizadas al occidente y norte del área estén parcialmente asociadas a la mayor conductividad térmica de las sales (sulfato de sodio) que podrían estar depositadas cerca de la superficie por evaporación, como es evidente en la depresión del río Chicamocha.

Si bien las anomalías positivas de los elementos radioactivos (^{38}U , ^{32}Th , ^{40}K) se asocian a la producción

de calor radiactivo (González *et al.*, 2008), en el área geotérmica de Paipa, no se observa una correlación positiva con las temperaturas calculadas a partir de SST. Sin embargo, en los mapas generados, se presentan anomalías positivas tanto para los SST medidos en profundidad (FIGURA 2) y las anomalías de ^{38}U , ^{32}Th y ^{40}K . (FIGURA 4). Superficialmente las temperaturas computadas con Landsat 8 TIRS, tampoco denotan una correlación positiva con las anomalías de ^{38}U , ^{32}Th y ^{40}K .

El modelamiento de temperaturas superficiales, se realiza con base de la ecuación de conducción de calor transitorio, en función de la difusividad termal (Carslaw y Jaeger, 1986 en Mihalakakou *et al.*, 1997). Esta ecuación posee una solución analítica para un sólido semi-infinito homogéneo con propiedades físicas constantes (Carslaw y Jaeger, 1986 en Mihalakakou *et al.*, 1997). Algunas de estas propiedades físicas, tales como temperaturas estacionales y velocidad del viento, son medidas por las estaciones climatológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) bajo una metodología rigurosa. La densidad de estaciones meteorológicas en el país es baja para establecer una evaluación detallada en este tipo de estudios en áreas geotérmicas, tales como la zonas de Paipa-Boyacá (estación meteorológica IDEAM: Tunguavita). El modelo climatológico del IDEAM que incluye temperaturas medias ambientales, se basa en la metodología propuesta por Eslava (1992), la cual para la presente investigación se muestra como la verdad terreno.

CONCLUSIONES

En los mapas de anomalías a partir de SST, se evidencia que tienen una dirección general suroccidente-noriente, con una alta concentración en el cruce de las fallas Canocas – El Bizcocho y el cruce El Batán – Rancho Grande. Al normalizar las temperaturas en ambas profundidades, la anomalía de más evidencia se acentúa es en el cruce de las fallas Santa Rita – El Bizcocho. En los mapas de anomalías generados con base en los SR, las anomalías de altas (entre 30,42°C y 39,56°C) y bajas temperaturas (entre 5,72°C y 15,28°C) son más pronunciadas en los cambios de topografía. Las altas temperaturas (entre 18,67°C y 19,66°C) se presentan en los corredores de las fallas El Hornito – Canocas y en todo el trazo de la Falla Cerro Plateado. Las bajas temperaturas (3,75°C y 4,40°C), se encuentran en el Alto de los Volcanes y el Alto de los Godos (FIGURAS 2 y 3).

La implementación de los SR junto con los SST, permiten construir una vista preliminar de la distribución del calor en el área geotérmica de Paipa, integrando los valores alcanzados a diferentes profundidades y la influencia que factores geológicos y geoquímicos aunados a la topografía.

En la investigación y exploración de recursos geotérmicos en áreas potencialmente geotérmicas como Paipa, los mapas de anomalías de temperatura de SST, son un primer indicio de la estructura geotérmica del área y permiten mejorar la toma de decisiones en estudios futuros.

Para estudios futuros tanto de SST como de SR, el aumento en el grillado y las imágenes utilizadas como insumo, permitiría disminuir la incertidumbre en los mapas de anomalías de temperatura, consiguiendo que los modelos experimentales ajusten de manera adecuada con los modelos teóricos.

A los 150 cm de profundidad, se estableció una mayor estabilidad térmica representada en los mapas de SST con menor influencia de la radiación solar sobre la superficie. Para los mapas generados a partir de SR, entre más somera sea la normalización, se tiene una correlación positiva frente a la verdad terreno.

La variabilidad de los valores de temperatura dados por los SR (el día 31/03/2014 el rango se encuentra entre 5,72°C y 39,56°C; para el día 01/02/2016 oscila entre 19,14°C y 43,53°C), está influenciada por la resolución temporal de las imágenes. En función del tiempo y para disminuir la incertidumbre que esta variable introduce a las imágenes, se hace necesaria la aplicación de una regresión espacio-temporal que estime valores de temperatura sin fluctuaciones en un solo momento del tiempo. Con esta premisa, se mejorarían ostensiblemente las correlaciones de los valores de temperatura calculados a partir de los SR y correlacionados con la verdad terreno (SST).

Bajo una interrelación cualitativa entre los mapas de SST y de anomalías de ^{38}U , ^{32}Th y ^{40}K , se encontró una correlación positiva entre las temperaturas en profundidad y las anomalías radioactivas provenientes de rocas radioactivas en superficie. Sin embargo, mediante el análisis cuantitativo, por medio de técnicas de análisis espacial, no se encontró una correlación positiva entre las temperaturas calculadas en profundidad y las anomalías radioactivas (^{38}U , ^{32}Th y ^{40}K) provenientes de las rocas intrusivas. En el análisis estadístico-espacial, esto se debe a que los

SST son someros en relación al espesor de la brecha hidrotermal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Geológico Colombiano (SGC), específicamente a la Dirección en Geociencias Básicas (DGB), por el apoyo brindado en la programación y ejecución del proyecto que permitió la adquisición de los datos de campo de los Sondeos Superficiales de Temperatura en el Área Geotérmica de Paipa.

REFERENCIAS

Abouriche, M. (1989). Temperature measurements at the surface and in shallow drillholes. ONU Geothermal Training Programme. Reykjavík, Islandia. Reporte 8.

Alfaro, C., Monsalve, M., Franco, J., y Ortiz, I. (2012). Modelo conceptual del sistema geotérmico de Paipa. Grupo de Exploración de Recurso Geotérmicos, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.

Baddi, M., Guillen, O., Lugo-Serrato, O., y Aguilar-Garnica, J. (2014). Correlación no-paramétrica y su aplicación en las investigaciones científicas. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 9(2), 31-40.

Beardmore, G. (2012). Towards a shallow heat flow probe for mapping thermal anomalies. *37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, EEUU.

Becerra-Gonzalez, L., Matiz-Leon, J.C., Ariza-Ariza, O., Borda-Beltran, D., y Medina, J. (2016). Aplicación de imágenes de satélite y de sistemas UAV para la producción de guayaba en la provincia de Vélez, Santander. *UD y la Geomática*, 11, 46-53.

Borgogno-Mondino, E., and Lessio, A. (2015). Estimation and mapping of NDVI uncertainty from Landsat 8 OLI datasets: An operational approach. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Milan, Italia.

Carslaw, H.S., and Jaeger, J.C. (1986). *Conduction of heat in solids*. 2nd edition. England: Oxford Science Publishers.

Coolbaugh, M., Sladek, C., Faulds, J., Zehner, R., and Oppliger, G. (2007). Use of rapid temperature measurements at a 2-meter depth to augment deeper temperature gradient drilling. *32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, EEUU.

Coolbaugh, M., Sladek, C., Zehner, R., and Kratt, C. (2014). Shallow temperature surveys for geothermal exploration in the Great Basin, USA, and estimation of shallow aquifer heat loss. *Geothermal Resources Council Transactions*, 38, 115-122.

Eslava, J. (1992). Perfil altitudinal de la temperatura media del aire en Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 1, 37-52.

Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., and Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 1-33. doi: 10.1029/2005RG000183.

Florides, G.A., and Kalogirou, S.A. (2005). Annual ground temperature measurements at various depths. *Proceedings of CLIMA*. Lausanne, Switzerland.

González, L., Vásquez, L., Muñoz, R., Gomes, H., Parrado, G., y Vargas, S. (2008). Exploración de recursos energéticos. Exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca, Chivata (Boyacá). INGEOMINAS, Bogotá.

Kratt, C., Coolbaugh, M., Peppin, B., and Sladek, C. (2009). Identification of a new blind geothermal system with hyperspectral remote sensing and shallow temperature measurements at Columbus Salt Marsh, Esmeralda County, Nevada. *Geothermal Resources Council Transactions*, 33, 481-486.

Li, M., Liu, S., Zhou, H., Li, X., and Wang, P. (2005). The temperature research of urban residential area with remote sensing. *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing*, 1514-1517.

Matiz-León, J.C. (2015). Modelo conceptual geológico – geofísico del área geotérmica de Paipa, Boyacá. Grupo de Exploración de Recursos Geotérmicos, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.

Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J.O., and Asimakopoulos, D.N. (1997). On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 60(3-4), 181-190. doi: 10.1016/S0038-092X(97)00012-1.

Mwawongo, G. (2007). Geothermal mapping temperature measurements. Short Course II on Surface Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP and KenGen. Lake Naivasha, Kenya.

Norini, G., Gropelli, G., Sulpizio, R., Carrasco-Núñez, G., Dávila-Harris, P., Pellicoli, C., Zucca, F., and De Franco, R. (2015). Structural analysis and thermal remote sensing of the Los Humeros Volcanic Complex: Implications for volcano structure and geothermal exploration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 221-237. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.05.014.

Olmsted, F., and Ingebritsen, S. (1986). Shallow subsurface temperature surveys in the basin and range province - II. Ground temperatures in the upsal hogback geothermal area, West-Central Nevada, U.S.A. *Geothermics*, 15(3), 267-275. doi: 10.1016/0375-6505(86)90104-5.

Restrepo, L., y González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.

Rodríguez, G. (2013). Sondeos térmicos superficiales en el área geotérmica de Paipa, Boyacá. Grupo de Exploración de Recursos Geotérmicos, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.

USGS. (2016). Landsat (L8), Data Users Handbook. Sioux Falls, South Dakota: U.S. Geological Survey.

Velandia, F. (2003). Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa. Informe Técnico. INGEOMINAS, Bogotá.

Velandia, F., y Cepeda, H. (2004). Geología sector Sur del Municipio de Paipa - Boyacá. Grupo de Exploración de Recursos Geotérmicos, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.

Jhon Camilo Matiz-León
ORCID: 0000-0002-1885-9804

Gilbert Rodríguez-Rodríguez
ORCID: 0000-0003-3580-0481

Claudia Alfaro-Valero
ORCID: 0000-0001-8262-1377

Trabajo recibido: abril 09 de 2018

Trabajo aceptado: abril 03 de 2019