

DELIMITACIÓN DE ÁREAS CON GRADIENTE GEOTÉRMICO ANÓMALO EN  
PROFUNDIDADES SOMERAS DENTRO DE LA CUENCA DE LOS LLANOS  
ORIENTALES, COLOMBIA

JULIAN FELIPE ROJAS TORRES

RUBEN DARIO PICO LUNA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2023

DELIMITACIÓN DE ÁREAS CON GRADIENTE GEOTÉRMICO ANÓMALO EN  
PROFUNDIDADES SOMERAS DENTRO DE LA CUENCA DE LOS LLANOS  
ORIENTALES, COLOMBIA

AUTORES:

JULIAN FELIPE ROJAS TORRES

RUBEN DARIO PICO LUNA

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

DIRECTOR:

WILLIAM DAVID AVELLANEDA CACERES

CODIRECTOR:

JUAN SEBASTIAN CARVAJAL TORRES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2023

### **Dedicatoria**

A Dios, que nos brinda fuerza en los momentos más difíciles y guía nuestros caminos.

A mi madre Alba L. Torres, mi tía Luz H. Torres, mis hermanos Juan Sebastian, José Camilo, Santiago y especialmente a mi hermano menor Juan Esteban, mi abuela Dora Pérez y Silvia Nathalia Mora. Por su amor, paciencia y apoyo incondicional.

A Rubén Pico Peña por ser mi padre, mi ejemplo y mi mejor amigo, a mi madre Giovanna luna por enseñarme que el amor no tiene límites, a mis hermanas compañeras de vida por brindarme consejos y ser soporte en mi vida.

### **Agradecimientos**

A nuestro Codirector, Juan Carvajal por su tiempo, constante apoyo incondicional y su increíble manera de enseñar a lo largo de este proyecto. A nuestro director William Avellaneda por su gran apoyo y su colaboración a lo largo de este proceso. A los profesores y estudiantes de la Escuela de Ingeniería de Petróleos por su aporte durante nuestra formación como Ingenieros, y a todas las autoridades y personal que hacen la Universidad Industrial de Santander.

A nuestros padres, hermanos y familia por su apoyo incondicional, y por ser parte fundamental de nuestras vidas, educarnos con el ejemplo y enseñarnos los valores para afrontar las adversidades de la vida.

Finalmente, a nuestros amigos y personas que han hecho parte de nuestro camino, que nos han ayudado de manera desinteresada, gracias por su ayuda y su buena voluntad.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Descripción del Proyecto .....	18
2.1 Planteamiento del Problema. ....	18
2.2 Justificación. ....	19
3. Localización del Proyecto.....	20
4. Marco de Referencia .....	21
4.1 Antecedentes. ....	22
4.2 Marco Geológico. ....	24
4.2.1 Geología Estructural. ....	27
4.2.2 Estratigrafía.....	29
5. Marco Teórico.....	35
5.1 Energía Renovable.....	35
5.2 Geoterminia:.....	35
5.3 Gradiente Geotérmico:.....	36
5.4 Anomalía Geotérmica: .....	36
5.5 Profundidad Vertical Verdadera, TVD:.....	37
5.6 Falla Geológica: .....	37
5.7 Basamento:.....	38

5.8 Kriging:.....	38
5.8.1 Formula de Kriging.....	39
5.8.2 Creación de mapas de superficie utilizando el método Kriging. ....	40
5.9 Variografía:.....	41
5.9.1 Ajustar modelos al semivariograma empírico. ....	43
5.10 Modelos de Semivariograma: .....	44
5.10.1 Modelo esférico. ....	44
5.10.2 Modelo exponencial.....	45
5.10.3 Modelo circular.....	46
5.10.4 Modelo gaussiano. ....	46
5.11 Comprender un Semivariograma: Rango, Meseta y Nugget: .....	47
5.12 Rango y Meseta.....	48
5.13 Nugget.....	48
5.12 Métodos Kriging:.....	49
5.13 Gráficos de Semivariograma: .....	49
5.14 ArcGIS:.....	50
5.14.1 Capa. ....	50
5.14.2 Sistema de coordenadas. ....	50
5.14.3 Etiquetas.....	51
5.14.4 Anotación.....	51
5.14.5 Símbolos. ....	51
5.14.6 Estilos.....	51
5.14.7 Ráster. ....	51

5.14.8 Georreferenciación.....	52
5.14.9 Lenguaje SQL.....	52
5.14.10 Mapas Base.....	53
5.14.11 Entidad.....	53
5.14.12 Shapefiles.....	53
6. Metodología.....	54
6.1 Recopilación, Selección y Organización de la Información.....	55
6.2 Revisión de Calidad de los Datos.....	58
6.3 Carga de Información.....	60
6.4 Carga y Revisión de Calidad de Datos.....	63
6.5 Modelamiento de los Pozos de la Cuenca de los Llanos Orientales.....	71
7. Análisis Espacial de la Anomalía Geotérmica de los Llanos Orientales - Resultados.....	77
7.1 Análisis del Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia Presentado por la ANH. .....	77
7.2 Análisis de los Mapas Modelados con el Método de Interpolación Kriging.....	79
7.3 Análisis de la Relación de la Profundidad con el Gradiente Geotérmico, Comparativa del Mapa de la ANH y de los Mapas Modelados con Kriging.....	83
8. Discusión.....	90
Conclusiones.....	95
Referencias Bibliográficas.....	97

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Selección y certificación de datos</i> .....	59
Tabla 2 <i>Temperaturas esperadas a condiciones normales</i> .....	86

**Lista de Ecuaciones**

	<b>Pág.</b>
Ecuación 1 <i>Formula general del método Kriging</i> . ....	40
Ecuación 2. <i>Variografía, semivariograma</i> .....	41
Ecuación 3 <i>Ecuaciones para calcular la temperatura esperada a condiciones normales</i> .....	85

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Mapa de localización de la cuenca de los Llanos Orientales</i> .....	20
Figura 2 <i>A) Modelo de simulación de caja mostrando el impacto de la erosión y depositación sintectónica comparado con el modelo B) Caso real de los Alpes</i> .....	25
Figura 3 <i>Secciones estructurales del Piedemonte, mostrando la variación en el estilo estructural, pasando de estructuras principalmente con basamento implicado, a estructuras con apilamientos antiforme</i> .....	26
Figura 4 <i>Sección transversal esquemática de la cuenca de los Llanos Orientales</i> .....	27
Figura 5 <i>Sección estructural J-J', que muestra la relación espacial entre las fallas y estructuras</i> .....	29
Figura 6 <i>Gráfico regional del sistema petrolero de la cuenca de los Llanos Orientales</i> .....	31
Figura 7 <i>Fallas geológicas</i> .....	38
Figura 8 <i>Diferencias cuadradas entre ubicaciones asociadas</i> .....	42
Figura 9 <i>Representación gráfica de semivariograma empírico</i> .....	42
Figura 10 <i>Representación gráfica de modelo esférico</i> .....	45
Figura 11 <i>Representación gráfica de modelo exponencial</i> .....	45
Figura 12 <i>Representación gráfica de modelo circular</i> .....	46
Figura 13 <i>Representación gráfica de modelo gaussiano</i> .....	47
Figura 14 <i>Representación gráfica de componentes: Meseta, Rango y Nugget</i> .....	48
Figura 15 <i>Mapa mental del flujo de trabajo</i> .....	54

Figura 16 <i>Mapas base para el modelamiento. A) Mapa base de referencia, usado para corroborar la localización de los puntos con referencia a los pozos. B) Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia, reportado por la ANH.....</i>	57
Figura 17 <i>Hojas trabajadas en Excel.....</i>	58
Figura 18 <i>El polígono celeste, corresponde al shapefile creado con el fin de delimitar en el mapa base el área de estudio de este proyecto, cuenca Llanos Orientales.....</i>	61
Figura 19 <i>Mapa de las anomalías geotérmicas presentado por la ANH, georreferenciado espacialmente, se observa cómo se superponen tanto el croquis de Colombia y el shapefile de la cuenca de los Llanos Orientales en la misma imagen .....</i>	62
Figura 20 <i>En la columna W de la hoja de cálculo de Excel, se pueden ver algunos de los sistemas de coordenadas usados en el documento.....</i>	63
Figura 21 <i>Otros ejemplos de pozos con distintos sistemas de coordenadas.....</i>	64
Figura 22 <i>La columna B muestra el UWI de cada pozo, la columna C la formula y la columna D es la fórmula, pero tipo texto para facilitar su manejo en el software.....</i>	64
Figura 23 <i>Segmento del código SQL utilizado para filtrar información en el software ArcGIS. Corresponde a una pequeña sección de todo el código generado desde la hoja de cálculo de Excel .....</i>	65
Figura 24 <i>Tabla de propiedades, donde se ingresó el segmento del código SQL. Definition Query hace que, al ingresar el código, se pueda determinar las entidades que aparecen en la tabla de atributos de la capa .....</i>	66
Figura 25 <i>Tabla de atributos de la capa de trabajo. Donde la columna creada es la resaltada de celeste, esto con el fin de etiquetar los pozos agregados por medio de lenguaje SQL .....</i>	67

Figura 26 <i>Tabla de la columna TESIS, donde se etiquetaron los pozos filtrados mediante lenguaje SQL</i> .....	68
Figura 27 <i>Definición del QUERY para filtrar los 5049 pozos, siguiendo la etiqueta de la marca "Y" que tenían los pozos a revisar</i> .....	69
Figura 28 <i>Capas creadas en el software ArcGIS</i> .....	69
Figura 29 <i>Información pertinente para realizar el modelado en el software ArcGIS</i> .....	70
Figura 30 <i>Zoom to Layer, para examinar el área de estudio de la capa de trabajo</i> .....	71
Figura 31 <i>Barra de herramientas de ArcGIS. En este proyecto se utilizó del menú de Interpolación, la herramienta Kriging, para realizar el modelamiento</i> .....	72
Figura 32 <i>Interpolación usando el método Kriging. En esta ventana aparece como ejemplo el método esférico, el cual fue el primer modelamiento</i> .....	73
Figura 33 <i>Ventana emergente del método de Kriging donde se hicieron los ajustes correspondientes para mejorar el resultado de la interpolación</i> .....	74
Figura 34 <i>Opciones que se modificaron para ajustar de manera precisa la interpolación que se quería realizar</i> .....	75
Figura 35 <i>Resultado final del modelamiento. Corresponden a él ráster de cada uno de los semivariogramas seleccionados</i> .....	76
Figura 36 <i>Gradientes geotérmicos de la cuenca de los Llanos Orientales</i> .....	77
Figura 37 <i>Fallas geológicas de la cuenca de los Llanos Orientales</i> .....	78
Figura 38 <i>Método Kriging: modelo esférico</i> .....	80
Figura 39 <i>Método Kriging: modelo circular</i> .....	80
Figura 40 <i>Método Kriging: modelo exponencial</i> .....	81
Figura 41 <i>Método Kriging: modelo lineal</i> .....	81

Figura 42 <i>Método Kriging: modelo gaussiano</i> .....	83
Figura 43 <i>Gradiente geotérmico vs Profundidad de la cuenca de los Llanos Orientales</i> .....	84
Figura 44 <i>Modelo lineal, con mayor número de intervalos con respecto a las distintas profundidades TVD en el área de estudio</i> .....	87
Figura 45 <i>Delimitación de las áreas con profundidad somera</i> .....	88
Figura 46 <i>Delimitación de áreas de la Figura 45, teniendo en cuenta los gradientes geotérmicos reportados en la zona</i> .....	89
Figura 47 <i>Delimitación de áreas anómalas de la cuenca Llanos Orientales</i> .....	90
Figura 48 <i>Mapa del basamento de la cuenca de los Llanos Orientales</i> .....	92
Figura 49 <i>Áreas anómalas asociadas al basamento de la cuenca de los Llanos Orientales</i> .....	94

## Resumen

**Título:** Delimitación de áreas con gradiente geotérmico anómalo en profundidades someras dentro de la cuenca de los Llanos Orientales, Colombia \*

**Autor:** Julian Felipe Rojas Torres y Rubén Darío Pico Luna \*\*

**Palabras Clave:** Geotermia, Energía Renovable, Kriging, Anomalías Térmicas, Basamento Inestable.

**Descripción:** El gradiente geotérmico es el cambio de la temperatura respecto a la profundidad. Para una cuenca sedimentaria de tipo antepaís, como los Llanos Orientales, se espera que los gradientes geotérmicos más altos sean asociados a los pozos más profundos porque la carga litostática es mayor. En este estudio se modeló estadísticamente las profundidades máximas de los pozos de la cuenca utilizando el método de interpolación Kriging del software ArcGIS. Posteriormente se realizó una interpretación detallada con base en el mapa inicial de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2009) de gradientes geotérmicos de Colombia y los resultados del modelamiento, para luego analizar la relación de la profundidad con el gradiente geotérmico dando como resultado una relación inversa, con un comportamiento irregular del gradiente geotérmico. Estas anomalías geotérmicas (50 °C/km), están asociadas con los altos de basamento. En general esta zona parece recibir flujo de calor asociado al decaimiento del basamento en el Graben de Guejar y el Alto el Melón.

Finalmente, se compararon los resultados con el caso análogo de la cuenca sedimentaria del Oeste de Canadá, WCSB, la cual también es una cuenca de tipo antepaís donde se encontraron gradientes geotérmicos de 50 a 55 °C/km. Además, este estudio sugiere hacer un modelamiento numérico similar al realizado en la WCSB en las zonas de mayor flujo de calor. A diferencia de las áreas que se encuentran hacia Villavicencio, se proponen zonas de interés geotérmico cerca del Graben del Guejar y el Alto del Melón, donde la cercanía del basamento a superficie evidencia una zona de mayor flujo de calor. Probablemente, este flujo es producto del decaimiento de los elementos inestables que componen dicho basamento.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingeniería Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: William David Avellaneda Cáceres, MSc. Geólogo. Codirector: Juan Sebastian Carvajal Torres, MSc. Geólogo.

### Abstract

**Title:** Delimitation of areas with anomalous geothermal gradient at shallow depths within the Llanos Orientales basin, Colombia \*

**Author:** Julian Felipe Rojas Torres y Rubén Darío Pico Luna \*\*

**Keywords:** Geothermal, Renewable Energy, Kriging, Thermal Anomalies, Unstable Basement.

**Description:** The geothermal gradient is the change of temperature with respect to depth. For a foreland-type sedimentary basin, such as the Eastern Plains, higher geothermal gradients are expected to be associated with deeper wells because the lithostatic load is greater. In this study, the maximum depths of the wells in the basin were statistically modeled using the Kriging interpolation method of ArcGIS software. Subsequently, a detailed interpretation was made based on the initial ANH (2009) map of geothermal gradients in Colombia and the modeling results, and then the relationship between depth and geothermal gradient was analyzed, resulting in an inverse relationship, with an irregular behavior of the geothermal gradient. These geothermal anomalies (50 °C/km) are associated with basement highs. In general, this zone seems to receive heat flow associated with basement decay in the Graben de Guejar and Alto el Melón.

Finally, the results were compared with the analogous case of the Western Canadian Sedimentary Basin, WCSB, which is also a foreland-type basin where geothermal gradients of 50 to 55 °C/km were found. In addition, this study suggests doing numerical modeling similar to that done in the WCSB in the areas of higher heat flow. In contrast to the areas towards Villavicencio, geothermal zones of interest are proposed near the Graben del Guejar and Alto del Melón, where the proximity of the basement to the surface evidences a zone of higher heat flow. This flow is probably the result of the decay of the unstable elements that make up the basement.

---

\* Bachelor Thesis.

\*\* Faculty of Physical-Chemical. School of Petroleum Engineering. Director: William David Avellaneda Cáceres, MSc. Geologist. Subdirector: Juan Sebastian Carvajal Torres, MSc. Geologist.

## Introducción

El relieve colombiano ha sido modelado por eventos tectónicos a lo largo del tiempo geológico, y estos a su vez están directamente relacionados con la evolución de los Andes Colombianos, incluyendo su margen occidente, actualmente activo (Cooper, 1995). Bonnet et al. (2007) y Malavieille et al. (2010) muestran la interacción e impacto que causa la erosión y sedimentación en el crecimiento y exposición de un orógeno en modelos análogos y reales, donde en ambientes comprensivos, la exhumación y exposición de un apilamiento antiforme causa una erosión y posterior depositación de estos sedimentos en la cuenca de tipo antepaís que se forma junto a este.

Un ejemplo de cuenca tipo antepaís es la cuenca de los Llanos Orientales Colombianos, lugar donde se desarrolla este proyecto, la cual ha sido moldeada por varios procesos geológicos, y su historia geológica es compleja. Ubicada en el área comprendida entre los municipios de Casanare, Arauca, Meta y Vichada, al este del territorio colombiano, limitada: al Norte con la frontera política con Venezuela, al Este con el Escudo Guayanés, al Sur con la serranía de La Macarena, el arco del Vaupés y las rocas metamórficas del Precámbrico, y al Oeste con el sistema de fallas de la Cordillera Oriental.

En este estudio se pretende definir áreas donde la anomalía del gradiente geotérmico sea potencialmente asociada a basamento inestable en la cuenca de los Llanos Orientales. El proyecto recopilará los datos públicos de los pozos perforados en la cuenca de Llanos Orientales para modelar estadísticamente las profundidades máximas en el software ArcGIS. Esto con el fin de delimitar áreas donde las anomalías geotérmicas reportadas por la Agencia Nacional de

Hidrocarburos (ANH) en el año 2009 estén asociadas a profundidades someras, donde la profundidad y carga litostática no sean el principal factor causante de esta anomalía.

Este análisis dividió la cuenca en dos zonas. El Oeste, donde los pozos alcanzaron puntos más profundos pero el gradiente geotérmico está entre 20°-30° C/km, y el Este, con pozos más someros y gradientes geotérmicos de hasta 50°C/km. Estas zonas parecen ser separadas por la falla normal del Meta. Los datos permitieron establecer que las zonas de mayores gradientes geotérmicos (50°C/km), están asociados con altos de basamento. Esta zona en general parece recibir flujo de calor asociada al decaimiento del basamento en el Graben de Guejar y el Alto el Melón. Por esta razón, en áreas como el campo Rubiales, la isoterma de 100°C se alcanza a  $\pm 2$  Km de profundidad. Aunque este análisis no alcanza la zona del Graben del Guejar, ya que no hay datos en esta área, se infiere que el comportamiento de altos gradientes se puede extender hasta esta zona.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General.**

Definir áreas donde la anomalía del gradiente geotérmico en profundidades someras sea potencialmente asociada a basamento inestable en la cuenca de los Llanos Orientales utilizando el software de análisis espacial ArcGIS.

### **1.2 Objetivos Específicos.**

Modelar la profundidad total de los pozos en la cuenca de los Llanos Orientales.

Analizar la relación espacial en las zonas donde es probable encontrar las anomalías.

Establecer áreas donde la anomalía sea asociada directamente a basamentos inestables

Comparar los resultados con un contexto geológico análogo.

## 2. Descripción del Proyecto

### 2.1 Planteamiento del Problema.

En el año 2008 en un trabajo conjunto realizado por INGEOMINAS y la ANH se obtuvo como resultado el mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia. El gradiente geotérmico es el cambio de la temperatura respecto a la profundidad. En la corteza, este cambio es más variable que en el manto y núcleo y registra grandes alteraciones laterales, que dependen en gran medida del contenido de isótopos radiactivos de las rocas, la tectónica y del régimen hidrológico (Clauser, 2009). En áreas tectónicamente estables como escudos y cuencas sedimentarias el gradiente promedio está entre 15 y 30°C/km (Duff & Holmes, 2004).

Para una cuenca sedimentaria de tipo antepaís como los Llanos Orientales, se espera que los gradientes geotérmicos más altos sean asociados a los pozos más profundos porque la carga litostática es mayor. Sin embargo, del mapa preliminar de gradientes la ANH (2009) concluyó que los gradientes anómalos alcanzan un valor máximo de 65 °C/km, en las cuencas sedimentarias, y que la anomalía de mayor extensión pertenece a la de la cuenca de los Llanos Orientales la cual describe una tendencia NE. Esta anomalía ya observada en la primera versión del mapa de gradientes (Alfaro, et al., 2000), es proporcional a la observada por Bachu et al. (1995) para el flujo de calor, con aumento de Oeste a Este. Según estos autores la anomalía en el flujo de calor estaría relacionada con la topografía del basamento y probables intrusiones graníticas. La anomalía de gradiente geotérmico, observada en la cuenca de los Llanos Orientales, no concuerda con el basamento constituido por el Escudo Precámbrico, del que se espera la máxima estabilidad termal.

Así que el fin de este estudio es delimitar áreas donde las anomalías geotérmicas reportadas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos este asociado a profundidades someras, donde la profundidad y carga litostática no sean el principal factor causante de esta anomalía.

## **2.2 Justificación.**

El estudio realizado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos reportó anomalías en la cuenca de los Llanos Orientales, donde en ciertas zonas se encontró un gradiente geotérmico mayor a 40°C/km. El estudio menciona que esta anomalía podría estar relacionada con la existencia de un basamento inestable, pero dada la gran extensión de esta zona, sería necesario refinar las áreas donde en efecto la carga litostática no es suficiente para producir dicha anomalía.

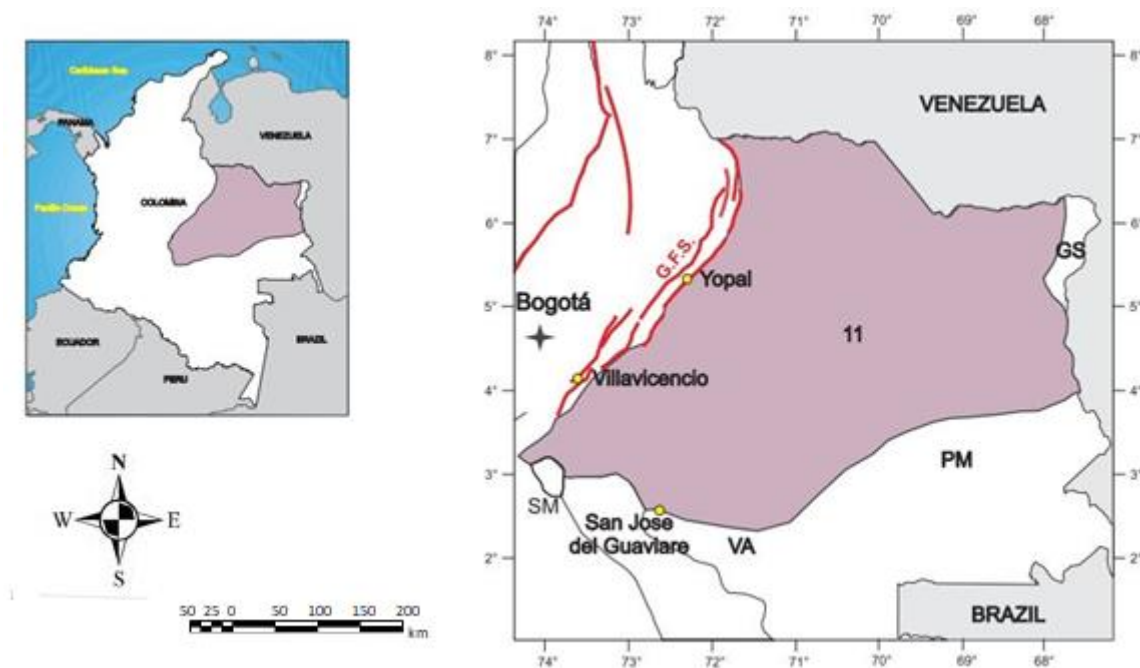
Por esta razón, en el desarrollo de este proyecto de investigación se estudiarán los conceptos referentes a geotermia, modelamiento Kriging, anomalías térmicas y basamentos inestables; con la finalidad de modelar la profundidad total de los pozos existentes en la zona para luego analizar la relación espacial de dichas profundidades y así poder determinar las áreas donde la anomalía sea asociada a basamentos inestables. Asimismo, comparar el escenario geológico con un caso análogo donde dichas anomalías sean causadas por condiciones similares.

### 3. Localización del Proyecto

La cuenca de los Llanos Orientales se ubica en el este del territorio colombiano, comprende los departamentos de Casanare, Arauca, Meta y Vichada, sus límites son: al Norte con la frontera política con Venezuela, al Este con el Escudo Guayanés, al Sur con la serranía de La Macarena, el arco Vaupés y rocas metamórficas del Precámbrico y al Oeste con el sistema de fallas de la Cordillera Oriental (Figura 1).

#### Figura 1

*Mapa de localización de la cuenca de los Llanos Orientales*



*Nota.* El panel de la izquierda muestra la ubicación de la cuenca en Colombia. El panel de la derecha los límites estructurales de la cuenca. Imagen modificada. Fuente (Barrero et al., 2007).

#### 4. Marco de Referencia

La historia eruptiva reciente y la presencia de fuentes de aguas termales, fumarolas y zonas de alteración hidrotermal superficial, pueden ser evidencia de la existencia de recursos geotérmicos con propiedades aptas para su aprovechamiento con fines de generación de energía (Marzolf, 2014).

Colombia se encuentra en una zona tectónicamente activa. La interacción de las placas tectónicas sudamericana, caribe, y pacífica en los últimos 30 millones de años resultó en el levantamiento de la Cordillera Oriental (Reyes-Harker et al., 2015). Aunque la subducción de placas y el movimiento tectónico aún están activos, no se ha registrado actividad volcánica significativa en el oriente de Colombia debido a la ausencia de volcanes en el área.

Por el contrario, es evidente el potencial geotérmico en áreas adyacentes a los volcanes Chiles, Cerro Negro, Cumbal, Azufral, Galeras, Nevado del Ruiz, Nevado del Huila, Nevado del Tolima, entre otros.

Sin embargo, el potencial geotérmico de un territorio no está limitado a actividad volcánica e intrusivos magmáticos, existen otros escenarios donde los gradientes geotérmicos están asociados a otros factores como la carga litostática y también a basamentos inestables (Ortiz y Montenegro, 2021). Este es el caso de Alberta, Canadá, donde los proyectos geotérmicos que se están desarrollando en la “*Western Interior Basin*”, están asociados al calor transmitido desde el basamento de la cuenca (Renaud, 2020).

#### 4.1 Antecedentes.

López-Ramos et al. (2022). **Evaluación del Recurso Geotérmico de Baja-Media Entalpía en Reservorios Profundos de la Cuenca Llanos-Colombia.** En este trabajo se investigó una gran cantidad de información de superficie y subsuelo, con el fin de evaluar el potencial térmico de los acuíferos profundos. Realizaron un análisis integrado de factores como la temperatura, las propiedades del yacimiento y la profundidad en la cuenca, con la información hidrogeológica-química, esto con el objetivo de orientar exploración y el avance de proyectos geotérmicos en la cuenca. En consecuencia, identificaron tres Plays regionales, donde el A es especulativo, el B es hipotético y el C es conocido (López-Ramos et al., 2022).

Ortiz y Montenegro (2021). **La Geotermia, Fuente de Energía Alternativa para el Departamento de Nariño: Potencialidad, Usos y Beneficios.** Este documento proporciona una descripción general de la clasificación, aplicaciones, usos y beneficios de la energía geotérmica en el departamento de Nariño. Los recursos geotérmicos constituyen la energía obtenida del calor que se extrae a través de los fluidos geotérmicos que surgen de procesos naturales o artificiales de acumulación y calentamiento del subsuelo (Ortiz y Montenegro, 2021).

Marzolf (2014). **Emprendimiento de la Energía Geotérmica en Colombia.** En el transcurso de este trabajo, se realizó la integración de la información obtenida en los estudios técnicos de superficie realizados previamente por ISAGEN (1997-2013) y se desarrolló un modelo geotérmico conceptual que resultó en la selección de un área de interés para la exploración y uso de energía geotérmica en la zona de influencia. Con este documento, el Banco Interamericano de Desarrollo e ISAGEN buscaron compartir con la comunidad las experiencias y aprendizajes

obtenidos para el desarrollo de las primeras fases de un proyecto geotérmico en Colombia. (Marzolf, 2014).

Alfaro et al. (2009). **Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia.** En el año 2008 el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) iniciaron el proyecto compuesto “Actualización del Mapa Geotérmico de Colombia”. El objetivo de este trabajo fue generar un mapa de gradientes geotérmicos a partir de información de temperatura registrada en pozos perforados por la industria petrolera. Este documento presenta la descripción de los gradientes geotérmicos calculados con base a la temperatura del fondo de pozo (BHT) y suponiendo que el máximo gradiente geotérmico de la corteza superior es vertical. Concluyen que está claro cómo se reconoce internacionalmente (Deming, 1989), que, aunque las temperaturas de fondo de pozo son observaciones comunes en pozos de petróleo y gas, sus registros son de calidad cuestionable y revisarse y seleccionarse con cuidado antes de ser utilizados. Además, encontraron que en un ambiente sedimentario la mayor anomalía de gradiente geotérmico se localiza en la cuenca Llanos Orientales, cuya proporción no sería consistente con un basamento estable. (Alfaro et al., 2009).

INGEOMINAS y ANH (2009). **Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia.** Este trabajo incluyó el análisis y procesamiento de las mediciones de temperatura registradas en 4.414 pozos en las diferentes cuencas sedimentarias del país. Entre los resultados más relevantes se destaca la identificación de: 1) El gradiente geotérmico varía verticalmente en las principales cuencas sedimentarias del país; en términos generales se observa que los valores de los gradientes térmicos y su dispersión disminuyen con la profundidad. 2) Cuatro anomalías

positivas del gradiente geotérmico ( $>40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ) en la extensión del territorio continental de Colombia. 3) Anomalías geotérmicas en la cuenca de los Llanos Orientales de magnitud incompatible con la presencia de un basamento estable. (INGEOMINAS y ANH, 2009).

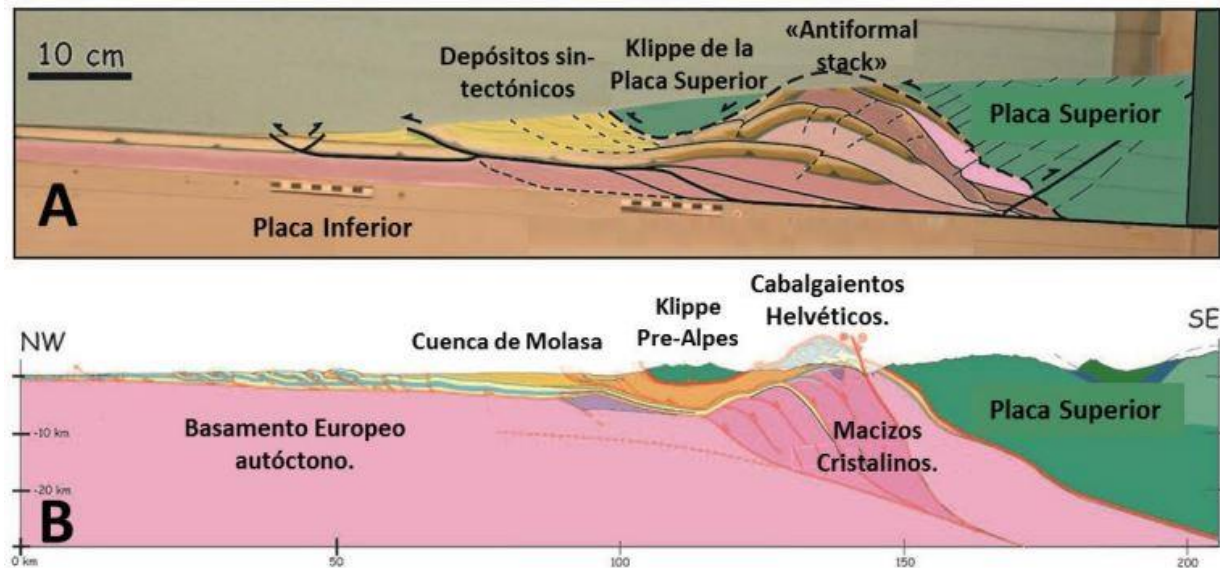
#### **4.2 Marco Geológico.**

El relieve colombiano ha sido modelado por eventos tectónicos a lo largo del tiempo geológico, y estos a su vez están directamente relacionados con la evolución de los Andes Colombianos, incluyendo su margen occidental, actualmente activo (Cooper, 1995). Los cuales se distribuyen en las tres cordilleras que se conocen como Occidental, Central y Oriental. El levantamiento de estas no sólo generó los relieves de hoy día, también han sido afectados por diferentes condiciones meteóricas que causaron la erosión de parte de estos, depositando grandes cantidades de sedimentos en las diferentes cuencas que existen hoy en día, como la cuenca del Valle del Magdalena (inferior, medio y superior), la cuenca Yarí Caguan y la cuenca de los Llanos Orientales (Mora, 2006; Hermeston & Nemcok, 2013).

Bonnet et al. (2007) y Malavieille et al. (2010), muestran la interacción e impacto que causa la erosión y sedimentación en el crecimiento y exposición de un orógeno en modelos análogos y reales, donde en ambientes comprensivos, la exhumación y exposición de un apilamiento antiformal causa una erosión y posterior depositación de estos sedimentos en la cuenca tipo antepaís que se forma junto a este, tal como muestra la Figura 2.

**Figura 2**

A) Modelo de simulación de caja mostrando el impacto de la erosión y depositación sintectónica comparado con el modelo B) Caso real de los Alpes



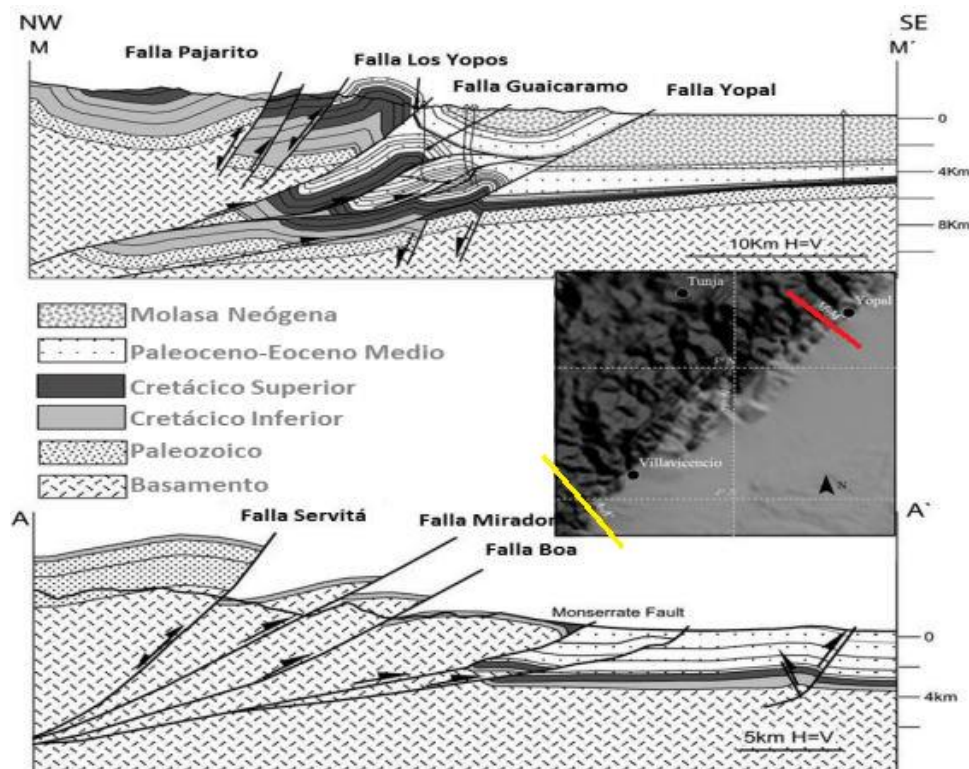
Nota. Imagen modificada de Malavieille et al. (2010). Fuente (Carvajal, 2014).

Un ejemplo de cuenca antepaís es la cuenca de los Llanos Orientales Colombianos, la cual ha sido moldeada por varios procesos geológicos, además de una historia geológica compleja. Martínez (2006), Tesón et al. (2013), y Jiménez et al. (2013), muestran que desde el Eoceno tardío lo que hoy conforma la Cordillera Oriental y el Piedemonte Llanero Colombiano ha sufrido esfuerzos compresivos. Esto ha convertido lo que era la parte marginal de una extensa cuenca de antepaís, en una cuenca de antepaís independiente (Carvajal-Torres, 2021). La exhumación de la Cordillera Oriental como orógeno de esta cuenca de tipo antepaís resultó en la erosión de una parte de las unidades depositadas durante el Cretácico Superior, y la depositación de rocas de edades Cenozoicas (Bayona et al., 2013).

Mora et al. (2009) y Jiménez et al. (2013) demuestran que este cambio en el régimen de esfuerzos, donde las fallas del Cretácico Inferior formadas inicialmente como fallas normales durante la etapa de extensión en el Cretácico y, posteriormente invertidas a fallas inversas causa un cambio en el estilo estructural a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano, debido a la herencia estructural, ya que hacia el suroeste las fallas se clasifican primordialmente con una tectónica de tipo “*thick-skinned*” (piel gruesa, deformación que involucra al basamento o un sustrato rígido), por la implicación del basamento, y hacia el noreste las estructuras encontradas son estructuras dúplex y apilamientos antiformes, tal como muestra la Figura 3.

### Figura 3

*Secciones estructurales del Piedemonte, mostrando la variación en el estilo estructural, pasando de estructuras principalmente con basamento implicado, a estructuras con apilamientos antiforme*



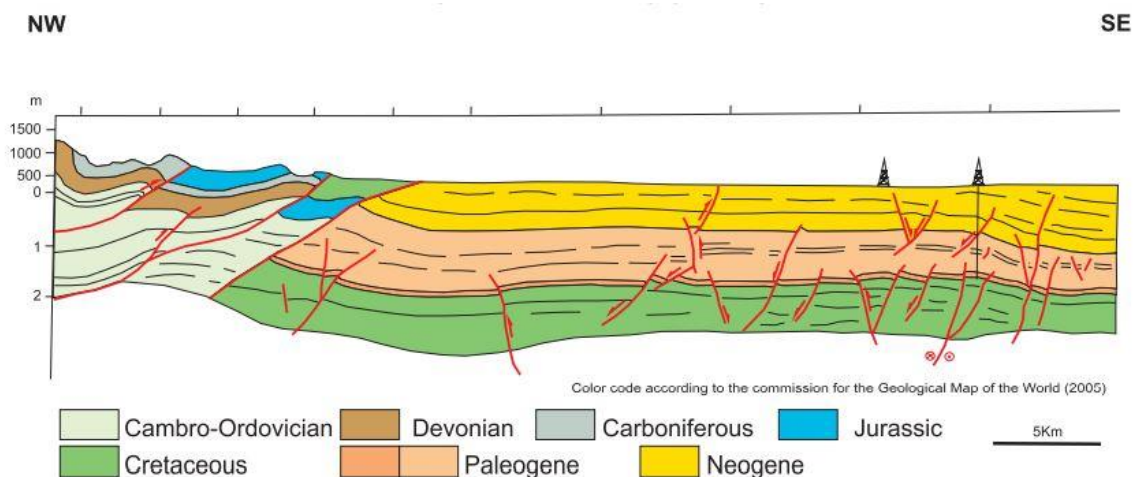
*Nota.* Las líneas de color en el recuadro de la derecha indican: color amarillo es la sección A-A` al Sur y color rojo la sección M-M` al Norte. Imagen modificada de Mora et al. (2011). Fuente (Carvajal, 2014).

#### 4.2.1 Geología Estructural.

La cuenca de los Llanos Orientales está limitada al norte por la frontera política con Venezuela; al sur la cuenca se extiende hasta el alto de la Macarena, el Arco de Vaupés y las rocas metamórficas Precámbricas que afloran al sur del río Guaviare; el límite oriental está marcado por los afloramientos de rocas plutónicas Precámbricas del Escudo Guayanés, y al oeste la cuenca está limitada por el sistema de cabalgamientos frontales de la Cordillera Oriental (Barrero et al., 2007), tal como lo muestra la Figura 4.

#### Figura 4

*Sección transversal esquemática de la cuenca de los Llanos Orientales*



*Nota.* Fuente (Barrero et al., 2007).

La geometría y tipos de estructuras cambian de Norte a Sur. Es un promedio de 12 secciones estructurales, Jiménez et al. (2013) denota un cambio en las geometrías y la expresión de la deformación. Hacia la zona sur del Piedemonte la exposición de Basamento es más notoria, causada por las fallas tipo “*thick-skinned*” (Jiménez (2013), ya que estas fallas involucran las rocas de basamento). Estas tienen un déficit de estructuras dúplex y apilamientos antiformes. Por el contrario, al Norte se invierte este patrón, allí la deformación es controlada por fallas de bajo ángulo, estructuras dúplex y apilamientos antiformes (Martínez, 2006).

De esta manera Jiménez et al. (2013), segmentan el Piedemonte Llanero Colombiano de la siguiente manera:

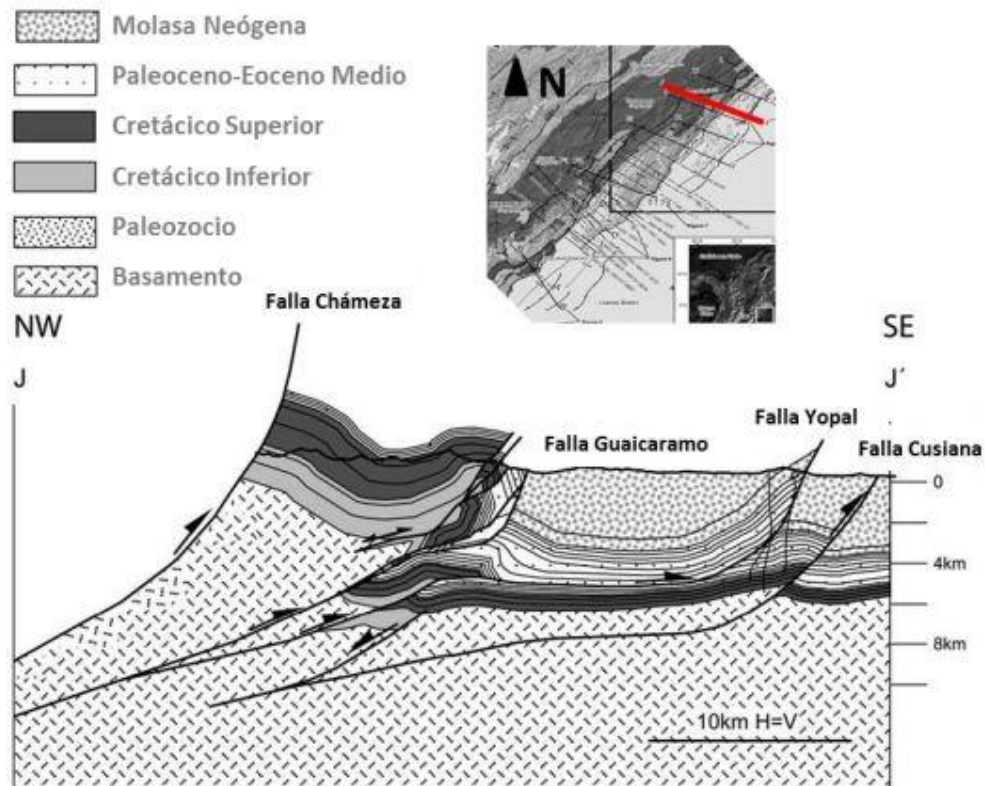
- Segmento Guatiquía: la deformación implica basamento principalmente, llevando el basamento a superficie.
- Segmento Guavio: zona en la que aparece la falla de Guaicaramo “*thick-skinned*”, saliendo a superficie frente al Sinclinal de Medina.
- Segmento Tierranegra: la falla de Guaicaramo se convierte en la estructura más importante.
- Segmento Piedemonte: en donde la deformación pasa a ser controlada por apilamientos antiformes y estructuras dúplex.

El área de estudio se ubica dentro del segmento Piedemonte, donde las fallas principales son las fallas de Yopal y Cusiana en el Este, y hacia el Oeste aflora la falla de Guaicaramo (Figura 3 y 5). En esta zona la falla Cusiana se muestra como una falla inversa y la falla Yopal como una falla que implica ligeramente el basamento y se hace horizontal en un despegue sobre las rocas del Oligoceno, Carvajal, (2014). De esta manera, Jiménez et al. (2013) interpretan la falla de Yopal como un escape frontal del acortamiento en subcabalgamientos generado por la falla de

Guaicaramo. En la siguiente sección estructural (Figura 5) de Mora et al. (2011), se observa la relación espacial que existe entre la falla de Yopal, la falla de Guaicaramo y Cusiana.

### Figura 5

*Sección estructural J-J', que muestra la relación espacial entre las fallas y estructuras*



*Nota.* Imagen modificada de Mora et al. (2011). Fuente (Carvajal, 2014).

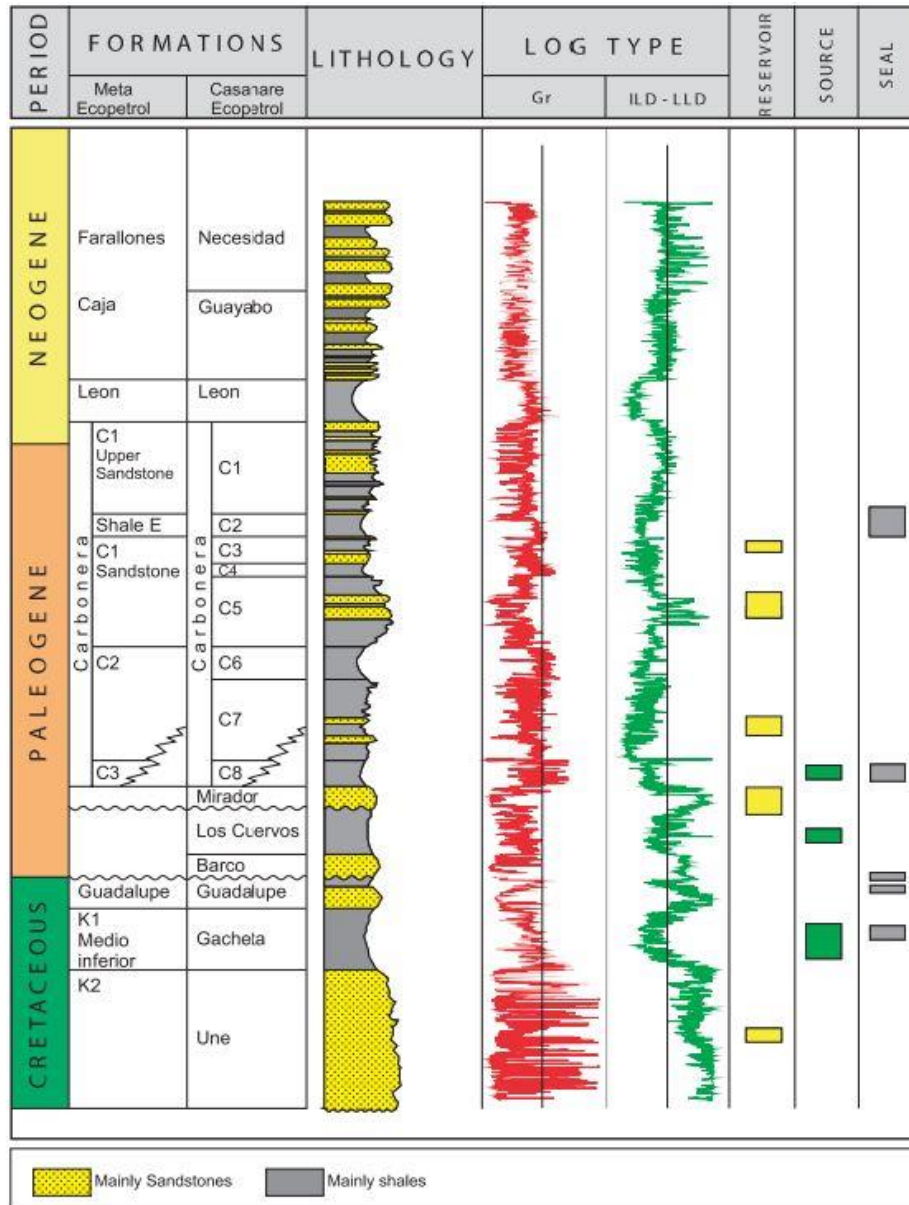
#### 4.2.2 Estratigrafía.

El proceso de desarrollo de la cuenca está dividido en tres periodos; Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. Durante el Paleozoico, comenzó la apertura de la cuenca generando fosas tectónicas, donde se depositaron sedimentos marinos someros y se inició un fallamiento de tipo normal (Ecopetrol y Beicip, 1995). A lo largo del Mesozoico, la cuenca experimentó esfuerzos

extensionales que continúan con la apertura de esta, generando una cuenca de tipo intra-arco asociada a un arco magmático con subducción, dando origen a fosas tectónicas en donde se depositaron sedimentos de ambientes fluviales del Jurásico-Triásico preservados hoy en el Graben de Arauca. En el transcurso de la segunda parte del Mesozoico, la cuenca experimentó una disminución de la temperatura, generando un decaimiento regional y una depositación de sedimentos marinos alcanzando su máxima superficie de inundación durante el Campaniano (Fajardo et al., 1993, Cooper et al., 1995; citados por Sarmiento, 2011) e inicia un régimen transpresivo debido a la subducción de la corteza oceánica con el continente, esta subducción induce el levantamiento de la Cordillera Central y el movimiento de la falla Cusiana-Tamara (Cooper et al., 1995). Durante el Cretácico, la subducción se detuvo, provocando esfuerzos horizontales que producen un bulto submarino para compensar la variación en el nivel del mar (Sarmiento-Rojas, 2001). En el Cenozoico los esfuerzos compresionales y el levantamiento de la Cordillera Central dieron origen a una megacuenca antearco, conformada por las cuencas de Valle Medio del Magdalena, Cordillera Oriental y Llanos Orientales; debido al movimiento de la orogenia hacia el Escudo Guayanés, se inició la fragmentación de la megacuenca, lo que también generó un decaimiento flexural en la cuenca de los Llanos Orientales donde se depositaron sedimentos continentales sobre sedimentos marinos. Al final del Paleógeno se levantó la Cordillera Oriental originando la cuenca antearco de los Llanos Orientales (Lozano et al., 2014).

**Figura 6**

*Gráfico regional del sistema petrolero de la cuenca de los Llanos Orientales*



Nota. Fuente (Barrero et al., 2007).

La descripción de las formaciones mostradas en la (Figura 6), es:

- Cretácico Inferior: las rocas depositadas en este periodo de tiempo (Berriasiano-Albiano), marcan la transición de “*syn-rift*” a “*post-rift*”, de las formaciones encontradas:
  - Formación Une: Hubach (1957) nombró de esta manera a una sucesión de areniscas blancas a amarillentas, con cemento silíceo o ferruginoso, intercaladas con lodolitas negras y limolitas silíceas. Ulloa y Rodríguez (1976) la correlacionan con la Formación Aguardiente de la cuenca de Santander y la Formación Caballos de la cuenca del Putumayo.
- Cretácico Superior: este paquete de rocas marca el final de la secuencia “*post-rift*”, usualmente dicho paquete de rocas se registra por medio de registros de pozos a lo largo del Piedemonte Llanero colombiano, donde se distinguen las siguientes formaciones:
  - Formación Gacheta: Barrero et al. (2007) mencionan en Cuencas Sedimentarias Colombianas, que principalmente se encuentran lutitas continentales marinas mixtas, las cuales contienen Querógeno tipo II y III.
  - Grupo Guadalupe: definido como grupo por Pérez y Salazar (1978), en Informe Geología de la Sabana de Bogotá-INGEOMINAS (2005), proponen formalmente las siguientes formaciones: I) Formación Arenisca dura, sucesión uniforme de lutitas fósiles y grises, II) Formación Plaeners, compuesta por arcillolitas, liditas, limolitas y un ligero contenido de areniscas de grano muy fino, III) Formación Arenisca Labor-Tierna: la arenisca Labor contiene capas muy gruesas de areniscas que se intercambian con capas muy finas de arcillolitas, y la arenisca Tierna se diferencia por presentar capas muy gruesas de areniscas de tamaño más grueso.

- Paleoceno-Eoceno: este grupo de unidades comenzó a ser depositada con la aparición de la cuenca de tipo antepaís (Cooper et al., 1995), en dos de las formaciones depositadas durante este periodo de tiempo (Barco y Mirador) se encuentran las principales acumulaciones de hidrocarburos (Martínez, 2006), siendo:
  - Formación Barco: es una formación altamente madura, rica en contenido arenoso y se considera un depósito derivado del Escudo Guayanés, con fuerte influencia marina en el área de Cusiana (Cooper et al., 1995).
  - Formación Cuervos: nombrada así por la Industria Petrolera, quien denominó Formación Cuervos a unas lodolitas con desarrollo de paleosuelos con intercalaciones de areniscas, limolitas y algunas capas de carbón, según Cooper et al. (1995), fue depositada en un ambiente pantanoso y regresivo, en planicie costera.
  - Formación Mirador: Inicialmente Hubach (1941), en Van Der Hammen (1960), la denominó Formación Areniscas del Limbo a un grupo de conglomerados con cantos subredondeados de cuarzo, cementados con matriz arenosa que presentan estratificación cruzadas, la Industria Petrolera la denominó Formación Mirador debido a su correlación con la Formación Mirador de la cuenca de Maracaibo, y según ANH (2012), la Formación Mirador del Eoceno Tardío , constituyen el yacimiento más importante de la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia.
- Oligoceno-Plioceno: durante el Oligoceno temprano el efecto de subsidencia incrementó el espacio de acomodación de los sedimentos (Formaciones Carbonera y León), en la cuenca de los Llanos Orientales, lo que dio paso a un rápido ingreso del

mar (Sarmiento, 1992). Las unidades que se registran en este periodo de tiempo para el Piedemonte Llanero Colombiano son:

- Formación Carbonera: descrita como una variación de rocas arcillosas, limosas y de areniscas, a veces con niveles de carbón por Charitat et al. (1985) en ANH (2012), nombrada por la Industria Petrolera por su correlación con la cuenca Carbones de Maracaibo (Ulloa y Rodríguez, 1976). Recientemente Mora y Parra (2008), y Mora et al. (2010), proponen que los miembros de la Formación Carbonera (C1 (tope) a C8 (base), fueron depositados en dos configuraciones estructurales: 1) como cuenca tipo “*piggyback*” los miembros más basales de C8-C6 y 2) un ambiente tectónico estable que depositó los miembros C5-C1.
- Formación León: corresponde a paquetes de lodolitas que se vuelven más arenosas en la parte oeste del Piedemonte Llanero Colombiano. Cooper et al. (1995), y Martínez (2006), plantean que el ambiente tectónico estable continuó, desde la depositación de los miembros superiores de la Formación Carbonera hasta la depositación de la Formación León.
- Formación Guayabo: Renz (1938), en Van Der Hammen (1960), la describe como areniscas cuarzosas, grises verdosas, de grano fino a grueso, estratificadas en la base, arcillolitas y limolitas grises verdosas a rojizas en medio y areniscas intercaladas con arcillolitas rojizas de grano fino a medio en el tope, Cooper et al. (1995), argumentan que la erosión de la Cordillera Este dio paso a la Formación Guayabo que actuó como un depocentro desde el Mioceno más tardío, siendo un depósito de molasa.

## **5. Marco Teórico**

### **5.1 Energía Renovable.**

Son fuentes de energía fundamentadas en el aprovechamiento de los recursos naturales: el sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal. Se caracterizan por el uso no de combustibles fósiles, sino de recursos naturales que pueden renovarse ilimitadamente.

Una de sus ventajas es que tienen un impacto muy bajo en el medio ambiente, ya que además de no utilizar recursos finitos, tampoco producen contaminantes. Las energías renovables también se conocen como energías alternativas o energías verdes (Factor Energía, 2020).

### **5.2 Geotermia:**

La palabra “geotermia” se deriva de la etimología griega: proviene de los sufijos “geo” que significa tierra, y “termos” que significa calor; en otras palabras, el calor proveniente de la tierra. La energía geotérmica es un tipo de energía térmica, formada por el flujo constante de calor desde el núcleo de la tierra, a través del manto y hacia la superficie terrestre, generado por los procesos naturales o artificiales de acumulación y calentamiento del subsuelo (Farietta, 2014, pp. 150-182 y Coviello, 1998, p. 7). Por otro lado, el término “geotermia” se usa indistintamente para referirse tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta, como al conjunto de procesos industriales que pretende aprovechar este calor para generar energía eléctrica y/o calor útil al ser humano (Llopis y Angulo, 2008).

### **5.3 Gradiente Geotérmico:**

Es el aumento de la temperatura terrestre en relación con la profundidad, que es un indicador del potencial geotérmico de un lugar. El valor normal del gradiente geotérmico corresponde a un aumento de entre 25 a 30 °C/km.

En algunas zonas, especialmente en aquellas donde se encuentran volcanes, el gradiente geotérmico es más alto de lo normal. En estas zonas a menudo afloran manantiales de aguas termales que constituyen una evidencia de la presencia de rocas calientes, magma o gases volcánicos que ascienden o se acercan a la superficie y que provienen del calor del interior de la tierra (Marzolf et al., 2014). Sin embargo, el potencial geotérmico de un territorio no está limitado a actividad volcánica e intrusivos magmáticos, existen otros escenarios donde los gradientes geotérmicos están asociados a otros factores como la carga litostática y también a basamentos inestables (Ortiz y Montenegro, 2021). Este es el caso de Alberta, Canadá, donde los proyectos geotérmicos que se están desarrollando en la “Western Interior Basin”, están asociados al calor transmitido desde el basamento de la cuenca (Renaud, 2020).

### **5.4 Anomalía Geotérmica:**

Es un conjunto de valores de flujo de calor en una región o zona, que se encuentran por encima (anomalía positiva) o por debajo (anomalía negativa) del valor de flujo de calor normal o medio en la Tierra. Con respecto a las zonas con gradientes geotérmicos anómalos, se ubican en las regiones geológicamente activas del planeta. Este gradiente suele ser mayor en zonas volcánicas, márgenes activos y zonas de rift, y menor en zonas de apilamiento de estructuras en cobertera (conjunto de rocas esencialmente sedimentarias, que se disponen sobre el basamento) o zonas cratonizadas estables (Gil, 2015).

### **5.5 Profundidad Vertical Verdadera, TVD:**

Al perforar un pozo, existe la posibilidad de que el pozo no sea perfectamente vertical. Según la técnica de perforación utilizada y las formaciones geológicas encontradas durante el proceso de perforación, un pozo puede desviarse de la dirección vertical prevista. La cantidad de desviación de la vertical medida en grados afectará la profundidad vertical verdadera (TVD) del pozo. Entonces TVD hace referencia a la distancia vertical entre un punto en el pozo (generalmente la profundidad actual o final) y un punto en la superficie, generalmente la elevación de la mesa rotatoria.

### **5.6 Falla Geológica:**

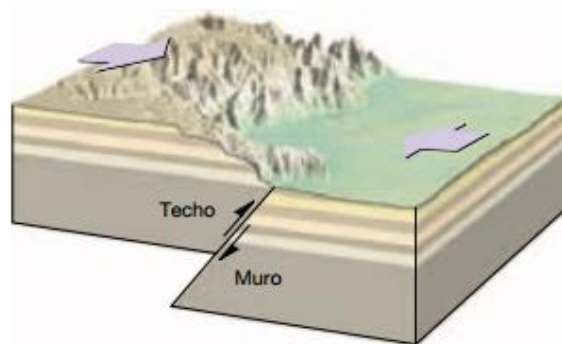
Una falla geológica es una fisura o fractura en la corteza terrestre a lo largo de la cual se desplazan los bloques rocosos separados por ella. Existen tres tipos principales:

- Las fallas normales componen planos a lo largo de los cuales un bloque “baja” en relación con el otro. Siempre se considera falla normal cuando el bloque que se encuentra “encima” del plano (techo) baja en relación con el bloque que se encuentra “debajo” del plano (piso), ver Figura 7. Este tipo de fallas es causa de la separación de placas tectónicas, es decir, por distensión (Tarbuck y Lutgens, 2001).
- Las fallas de desplazamiento de rumbo se generan cuando el movimiento general es paralelo al rumbo de la superficie de falla y los bloques se desplazan lateralmente entre si (Tarbuck y Lutgens, 2001).
- Las fallas inversas causan afloramiento del suelo, es decir, el bloque que se encuentra encima del plano de falla (techo) “se levanta” en relación con el bloque que se encuentra debajo del plano (piso). Se dice que son inversas porque las fuerzas que las

producen son compresivas (empujan un bloque hacia el otro) y generan la elevación de un bloque rocoso por el plano inclinado de la fractura: es decir que este tipo de movimiento es anti-gravitacional (es contrario a la acción de la gravedad) (Tarbuck y Lutgens, 2001).

### Figura 7

#### *Fallas geológicas*



*Nota.* Fuente (Tarbuck y Lutgens, 2001).

### 5.7 Basamento:

Conjunto de rocas que se encuentran bajo una cobertera sedimentaria y actúan de manera competente a lo largo de la deformación de la corteza terrestre. También, hace referencia a la corteza continental generada durante un ciclo anterior al de la secuencia estratigráfica suprayacente, denominada cobertera (RACEFN, 2010).

### 5.8 Kriging:

Las herramientas de interpolación IDW (Ponderación de distancia inversa) y *Spline* se consideran métodos de interpolación deterministas porque se basan directamente en valores

medidos circundantes o en fórmulas matemáticas predefinidas para determinan la suavidad de la superficie resultante. Existe una segunda familia de métodos de interpolación que incluye métodos geoestadísticos, como el método Kriging, que se basan en modelos estadísticos que involucran la autocorrelación, es decir, la relación estadística entre los puntos que se están midiendo. Por esta razón, las técnicas geoestadísticas no solo son capaces de generar una superficie de predicción, sino que también brindan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

El método Kriging asume que la dirección o la distancia entre los puntos de muestra reflejan correlaciones espaciales que pueden usarse para explicar los cambios en la superficie. Ajusta una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para encontrar el valor de salida para cada ubicación. Es un proceso que implica diferentes pasos, incluido: el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la generación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más apropiado cuando se sabe que existe una correlación espacial o un efecto direccional en los datos. Se utiliza comúnmente en la ciencia del suelo y la geología (ESRI, 2020).

#### ***5.8.1 Formula de Kriging.***

El método Kriging es similar a IDW en el sentido de que pondera los valores medidos circundantes para calcular la predicción de una ubicación no medida. La ecuación general para estos métodos de interpolación se forma como una suma ponderada de los datos:

**Ecuación 1**

*Formula general del método Kriging.*

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Donde:

$Z(s_i)$  : valor medido de la ubicación  $i$

$\lambda_i$  : ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación  $i$

$s_0$  : ubicación de la predicción

$N$  : cantidad de valores medidos

Con el método Kriging, las ponderaciones están basadas no solo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación prevista, sino también en la distribución espacial general de los puntos medidos. Para utilizar la distribución espacial ponderada, se debe cuantificar la correlación espacial. Por lo tanto, en un método Kriging ordinario, la ponderación  $\lambda_i$ , depende del ajuste del modelo a los puntos medidos, la distancia a la ubicación prevista y la relación espacial entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción (ESRI, 2020).

**5.8.2 Creación de mapas de superficie utilizando el método Kriging.**

Para hacer una predicción utilizando el método de interpolación Kriging, se deben realizar dos tareas:

- Encontrar las reglas de dependencia.
- Elaborar las predicciones.

Para realizar estas tareas, se deben realizar los siguientes pasos:

- Crear variogramas y funciones de covarianza para calcular los valores estadísticamente dependientes (denominados autocorrelación espacial) según el modelo de autocorrelación (ajuste del modelo).
- Predecir los valores desconocidos.

ESRI (2020) menciona que en este método los datos se utilizan dos veces, debido a estas dos tareas bien distintivas: la primera vez, para calcular la autocorrelación espacial de los datos, y la segunda, para realizar las predicciones.

### 5.9 Variografía:

El ajuste del modelo, o modelado espacial, también es llamado análisis estructural o variografía. En el modelado espacial estructural de los puntos medidos, se inicia con un gráfico empírico del semivariograma, calculado mediante la ecuación 2, para todos los pares de puntos separados por una distancia  $h$ :

#### Ecuación 2.

*Variografía, semivariograma.*

$$\text{semivariogram}(\text{distance}_h) = 0.5 * \text{average} \left( (value_i - value_j)^2 \right)$$

La fórmula implica el cuadrado de la diferencia entre los valores de las ubicaciones vinculadas.

La Figura 8 muestra la relación de un punto (en color rojo) con las demás ubicaciones medidas. Este proceso continúa con cada punto medido.



La autocorrelación espacial conjuga un principio básico de geografía: es más probable que las cosas que están muy juntas sean similares que las cosas que están más lejos. Por lo tanto, los pares de ubicaciones que se encuentran más cerca (extremo izquierdo del eje X de la Figura 9) tienden a tener valores más similares (parte inferior en el eje Y de la Figura 9). Dado que los pares de ubicaciones se encuentran más separados entre sí (hacia la derecha en el eje X de la Figura 9), tienden a ser más distintos y tener una mayor diferencia cuadrada (hacia arriba en el eje Y de la Figura 9) (ESRI, 2020).

### ***5.9.1 Ajustar modelos al semivariograma empírico.***

El siguiente paso es ajustar el modelo a los puntos que componen el semivariograma empírico. Moldear el semivariograma es un paso importante entre la descripción espacial y la predicción. La principal aplicación de Kriging es predecir los valores de atributos en las ubicaciones que no fueron muestreadas. El semivariograma empírico proporciona información sobre la autocorrelación espacial de los conjuntos de datos “*datasets*”. Sin embargo, no proporciona información para todas las direcciones y distancias posibles. Por este motivo, y para asegurar que las predicciones de Kriging tengan una varianza de Kriging positiva, es pertinente ajustar un modelo (es decir, una función o curva continua) al semivariograma empírico. En otras palabras, esto es similar al análisis de regresión, donde se ajusta una línea o curva continua a los puntos de datos.

Para hacer coincidir un modelo con el semivariograma empírico, se elige una función para que sea el modelo, por ejemplo, modelo del tipo esférico que se eleve y nivele las distancias más grandes que se encuentren fuera de un determinado rango. Existen desviaciones de los puntos en el gráfico de semivariograma empírico en relación con el modelo; algunos se encuentran por encima de la curva del modelo y otros se encuentran por debajo. Sin embargo, si se adiciona la

distancia de cada punto por arriba de la línea y la distancia de cada punto por abajo, los dos valores tienden a ser iguales. Existen varios modelos de semivariograma para elegir (ESRI, 2020).

### **5.10 Modelos de Semivariograma:**

La herramienta Kriging ofrece las siguientes funciones para seleccionar el modelo del semivariograma empírico:

- Esférica (Figura 10)
- Exponencial (Figura 11)
- Circular (Figura 12)
- Gaussiana (Figura 13)
- Lineal

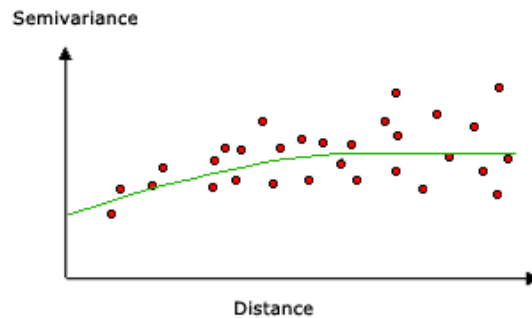
El modelo elegido afecta la predicción de los valores desconocidos, especialmente cuando la forma de la curva cerca del origen es significativamente diferente. Cuanto más pronunciada sea la curva cerca del origen, los vecinos más cercanos influenciarán en la predicción. Como resultado, la superficie de salida será menos suave. Cada modelo está diseñado para adaptarse con mayor precisión a diferentes tipos de fenómenos (ESRI, 2020).

#### ***5.10.1 Modelo esférico.***

Este modelo muestra una disminución gradual de la autocorrelación espacial (así como un incremento en la semivarianza) hasta una cierta distancia, y luego una autocorrelación de cero. Este modelo es uno de los más utilizados, ver Figura 10 (ESRI, 2020).

**Figura 10**

*Representación gráfica de modelo esférico*



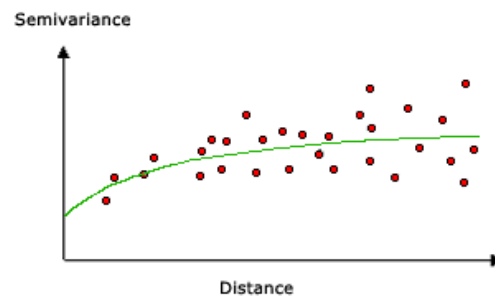
*Nota.* Modificado de ArcGIS DeskTop. Fuente (ESRI, 2020).

### **5.10.2 Modelo exponencial.**

Este modelo es aplicable cuando la autocorrelación espacial disminuye exponencialmente al aumentar la distancia. Para este caso, la autocorrelación simplemente desaparece por completo a distancias infinitas. El modelo exponencial también es un modelo de utilidad común. La elección del modelo a utilizar se basa en la autocorrelación espacial de los datos y en el conocimiento previo del fenómeno a modelar, ver Figura 11 (ESRI, 2020).

**Figura 11**

*Representación gráfica de modelo exponencial*



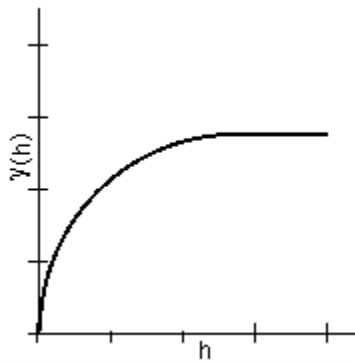
*Nota.* Modificado de ArcGIS DeskTop. Fuente (ESRI, 2020).

### 5.10.3 Modelo circular.

Este tipo de estimación utiliza una función circular para ajustar la variación espacial del histograma semivariante. Esto es similar al funcionamiento del modelo esférico, donde la dependencia espacial se desvanece en su nivel asintótico, ver Figura 12 (GISGeography,2016).

#### Figura 12

*Representación gráfica de modelo circular*



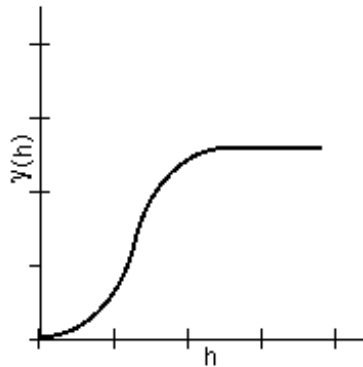
*Nota.* Modificado de ArcGIS DeskTop. Fuente (ESRI, 2020).

### 5.10.4 Modelo gaussiano.

Este modelo utiliza una curva de distribución de probabilidad normal. La función gaussiana es útil cuando los fenómenos son semejantes en distancias cortas porque el incremento se hace gradualmente a lo largo del eje Y (GISGeography,2016).

**Figura 13**

*Representación gráfica de modelo gaussiano*



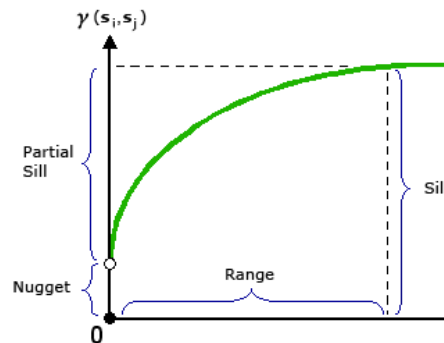
*Nota.* Modificado de ArcGIS DeskTop. Fuente (ESRI, 2020).

**5.11 Comprender un Semivariograma: Rango, Meseta y Nugget:**

Como se mencionó anteriormente, el semivariograma muestra la autocorrelación espacial de los puntos de partida medidos. De acuerdo con un principio básico de la geografía (cuanto más cerca están las cosas, más se parecen), los puntos medidos que se encuentran juntas por lo general tendrán una varianza cuadrática menor que aquellas que están más separadas. Una vez que todos los pares de ubicaciones se organizan después de haber sido colocados en un *bin*, se ajusta el modelo en estas ubicaciones. El rango, la meseta y el *nugget* se utilizan a menudo, para describir las tendencias de estos modelos (Figura 14) (ESRI, 2020).

**Figura 14**

*Representación gráfica de componentes: Meseta, Rango y Nugget*



*Nota.* Modificado de ArcGIS DeskTop. Fuente (ESRI, 2020).

### **5.12 Rango y Meseta.**

La Figura 14 muestra cómo se nivela el modelo de un semivariograma a una determinada distancia. La distancia donde el modelo comienza a nivelarse se denomina rango. Las ubicaciones de muestra que se encuentran separadas por distancias más pequeñas que el rango están autocorrelacionadas espacialmente, por el contrario, las ubicaciones que se encuentran más alejadas que el rango, no lo están. El punto en el que el modelo de semivariograma alcanza el equilibrio en relación con el valor del eje Y, se denomina meseta. (ESRI, 2020).

### **5.13 Nugget.**

Teóricamente, cuando la distancia de separación es cero, el valor del semivariograma es cero. Sin embargo, con una brecha de separación extremadamente inferior, el semivariograma generalmente muestra un efecto nugget, que corresponde a un valor mayor que cero. Si el modelo de semivariograma intercepta el eje Y en dos, entonces el nugget equivale a dos también.

El efecto nugget puede ser causado por errores de medición o fuentes espaciales de variación en áreas más pequeñas que el intervalo de muestreo (o ambos). Los errores de medición surgen debido a errores inherentes con los dispositivos de medición. Los fenómenos naturales pueden cambiar espacialmente en un rango de escalas. La variación a microescalas más pequeñas que las áreas de muestreo aparecerán como parte del efecto nugget. Antes de recopilar datos, es necesario comprender el grado de variación espacial en el área de interés (ESRI, 2020).

### **5.12 Métodos Kriging:**

El Kriging ordinario es el más común y utilizado de los métodos Kriging, además es el método predeterminado. Presupone que el valor medio constante es desconocido. Esa es una presuposición razonable, a menos que haya evidencia científica que la contradiga.

Por otro lado, el Kriging universal presupone que existe un sesgo en los datos iniciales, por ejemplo, un viento prevaleciente, y se puede modelar con una función determinística polinomial. Esta función polinómica se resta de los valores medidos inicialmente y la autocorrelación se modela a partir de los errores aleatorios. Después de que el modelo se ajusta a los errores aleatorios y antes de predecir, se agrega nuevamente la función polinómica a las predicciones para obtener resultados significativos. El Kriging universal solo debe utilizarse cuando se conoce una tendencia en los datos y se puede dar una justificación científica para describirla (ESRI, 2020).

### **5.13 Gráficos de Semivariograma:**

Kriging se basa en el concepto de variación regionalizada, que presupone que la variación espacial de la función representada por los valores  $z$  es estadísticamente comparable a lo largo de toda la superficie, es decir, se observa el mismo patrón de variación en todas las regiones de la

superficie. Este concepto de homogeneidad espacial es importante para la teoría de variables regionalizadas (ESRI, 2020).

#### **5.14 ArcGIS:**

Es un sistema completo que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, intercambiar y distribuir información geográfica. Este software proporciona herramientas para el mapeo y el razonamiento espacial (ESRI, 2020).

##### **5.14.1 Capa.**

El campo de mapeo determina cómo se simboliza y se etiqueta (de manera general, como se representa) un *dataset* (archivo autónomo que reside en una carpeta y hace referencia a datos específicos) en sus vistas de mapa. Cada capa representa los datos geográficos espacialmente en ArcGIS como registro de datos (ESRI, 2020).

##### **5.14.2 Sistema de coordenadas.**

Los sistemas de coordenadas en el software ArcGIS se utilizan como un medio para combinar automáticamente las ubicaciones geográficas de diferentes conjuntos de datos en un sistema de coordenadas común para la visualización y el análisis.

- GCS\_WGS\_1984: El WGS 84 (*World Geodetic System 1984*) es un sistema geodésico de coordenadas geográficas que se utiliza mundialmente, que permite encontrar o localizar cualquier punto de la Tierra (sin necesidad de un punto de referencia) utilizando las tres dimensiones (x, y, z). WGS 84 son las siglas en inglés de *World Geodetic System 84* (que significa Sistema Geodésico Mundial 1984).

#### **5.14.3 Etiquetas.**

Las etiquetas son cadenas de texto que se utilizan para marcar las características o entidades en un mapa. Las propiedades definen que cadena de caracteres como fuente de la cadena de texto y cómo se representa el carácter en el mapa (ESRI, 2020).

#### **5.14.4 Anotación.**

Esta expresión se utiliza para representar las etiquetas de datos o entidades que se guardan como campos de entidades gráficas en la *geodatabase*. La ubicación del texto se almacena junto con otros caracteres de texto para cada entidad de anotación. La anotación es diferente de las etiquetas, porque para las anotaciones se calcula solo una vez su ubicación y representación y luego se guarda. Se reutilizan en la medida que se vuelve a dibujar el mapa. Esto porque la posición de la anotación está predefinida, no es necesario realizar ningún cálculo de etiqueta cada vez que se dibuja el mapa (ESRI, 2020).

#### **5.14.5 Símbolos.**

Son elementos gráficos que se utilizan para la visualización de mapas. Existen diferentes tipos de símbolo, como: marcadores, de línea, de relleno o de texto (ESRI, 2020).

#### **5.14.6 Estilos.**

Es una colección de símbolos, colores y elementos del mapa según un tema o dominio de aplicación. Por ejemplo, un estilo establecido para mapas geológicos o de transporte (ESRI, 2020).

#### **5.14.7 Ráster.**

Es un modelo de datos que se basa en celdas; cada celda contiene un valor en las filas y columnas de una matriz. Un ráster es una representación gráfica bidimensional genérica. Los rásteres más comunes incluyen datos temáticos, de categorías, multidimensionales y de elevación.

Todas las imágenes son ráster, sin embargo, no todos los rásteres se consideran imágenes (ESRI, 2020).

#### ***5.14.8 Georreferenciación.***

Los datos ráster se obtienen de una variedad de fuentes, como las imágenes satelitales, fotografías aéreas y mapas escaneados. Las imágenes satelitales modernas y las fotografías aéreas a menudo contienen información de ubicación relativamente precisa, pero pueden requerir ajustes menores para mantener la coherencia de todos los datos SIG. Los mapas digitales y los datos históricos generalmente no contienen información de referencia espacial. En estos casos, se deben utilizar datos de ubicación exactos para ajustar o georreferenciar los datos ráster en un sistema de coordenadas de mapa. El sistema de coordenadas de un mapa se determina mediante proyección cartográfica, un método por el cual la superficie curva de la Tierra se representa sobre una superficie plana.

Al georreferenciar datos ráster, el usuario determina su ubicación utilizando las coordenadas del mapa y asignando el sistema de coordenadas del marco del mapa. La georreferenciación de datos ráster permite visualizarlos, consultarlos y analizarlos junto otros datos geográficos (ESRI, 2020).

#### ***5.14.9 Lenguaje SQL.***

El Lenguaje estructurado de consultas (SQL) es un lenguaje informático estandarizado con un conjunto de sintaxis y expresiones definidas que se utiliza para acceder y manipular datos en bases de datos y en otras técnicas de procesamiento de datos.

Una expresión SQL es una combinación de uno o más valores, operadores y funciones SQL que se pueden utilizar para indagar o seleccionar un subconjunto de propiedades, entidades y/o registros de tablas en ArcGIS.

#### **5.14.10 Mapas Base.**

Reúnen información fundamental para proporcionar una base reutilizable para diferentes mapas. Los mapas base proporcionan un lienzo o base para realizar un trabajo. Pueden ser generales, (como los mapas base topográficos, de imágenes o callejeros), o específicos en relación con un tema en concreto, (como los mapas base hidrológicos o geológicos). Sobre un mapa base se puede dibujar cualquier dato. El mapa base proporciona un contexto espacial y detalles de referencia (ESRI, 2020).

- Capas de mapa base: se utilizan para contener capas de mapas estáticos y, de esta forma, se pueden utilizar para obtener una visualización del mapa dinámica y de alto rendimiento.

#### **5.14.11 Entidad.**

Objeto que almacena su forma espacial o la representación geográfica, comúnmente un punto, una línea o un polígono, como uno de sus campos (o propiedades) en una cadena. En ArcGIS, las clases de entidad son conjuntos similares de entidades tienen la misma estructura espacial y un conjunto de atributos almacenados en una tabla de base de datos. Por lo general, las clases de entidad son colecciones de puntos, líneas, polígonos o anotaciones, pero existen otras clases de entidad como dimensiones o multipuntos (ESRI, 2020).

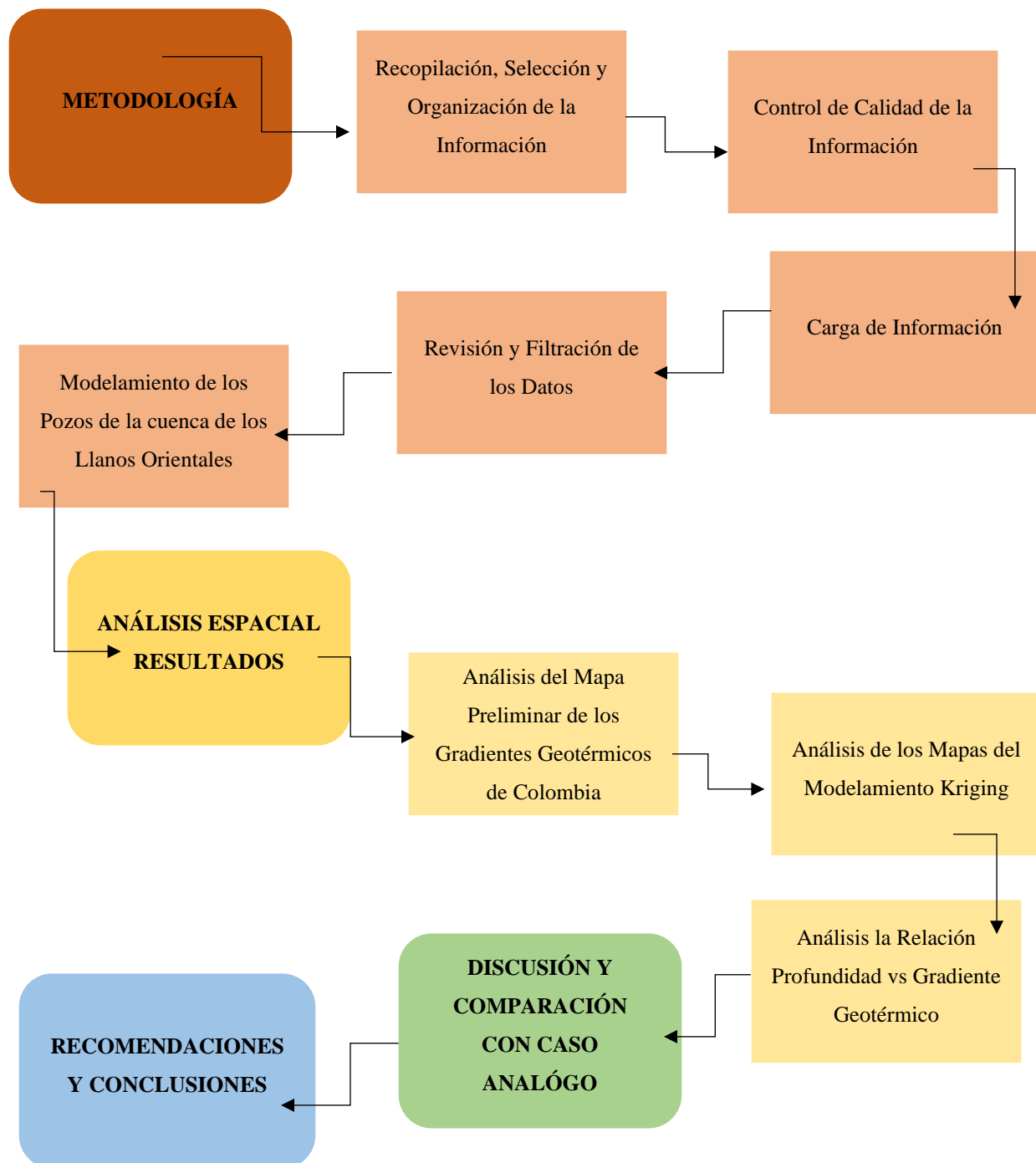
#### **5.14.12 Shapefiles.**

Un *shapefile* es un formato de forma que recopila datos vectoriales para almacenar la ubicación, la forma y los atributos de las entidades geográficas. Un *shapefile* se almacena dentro de un conjunto de archivos vinculados y contiene una clase de entidad. Se usan también para delimitar áreas sin perder la información de la forma original (ESRI, 2020).

## 6. Metodología

Figura 15

Mapa mental del flujo de trabajo



Para llevar a cabo este proyecto de manera organizada y estructurada, se realizaron diferentes etapas sucesivas de trabajo, teniendo en cuenta la secuencia de los objetivos específicos para su respectivo cumplimiento.

### **6.1 Recopilación, Selección y Organización de la Información.**

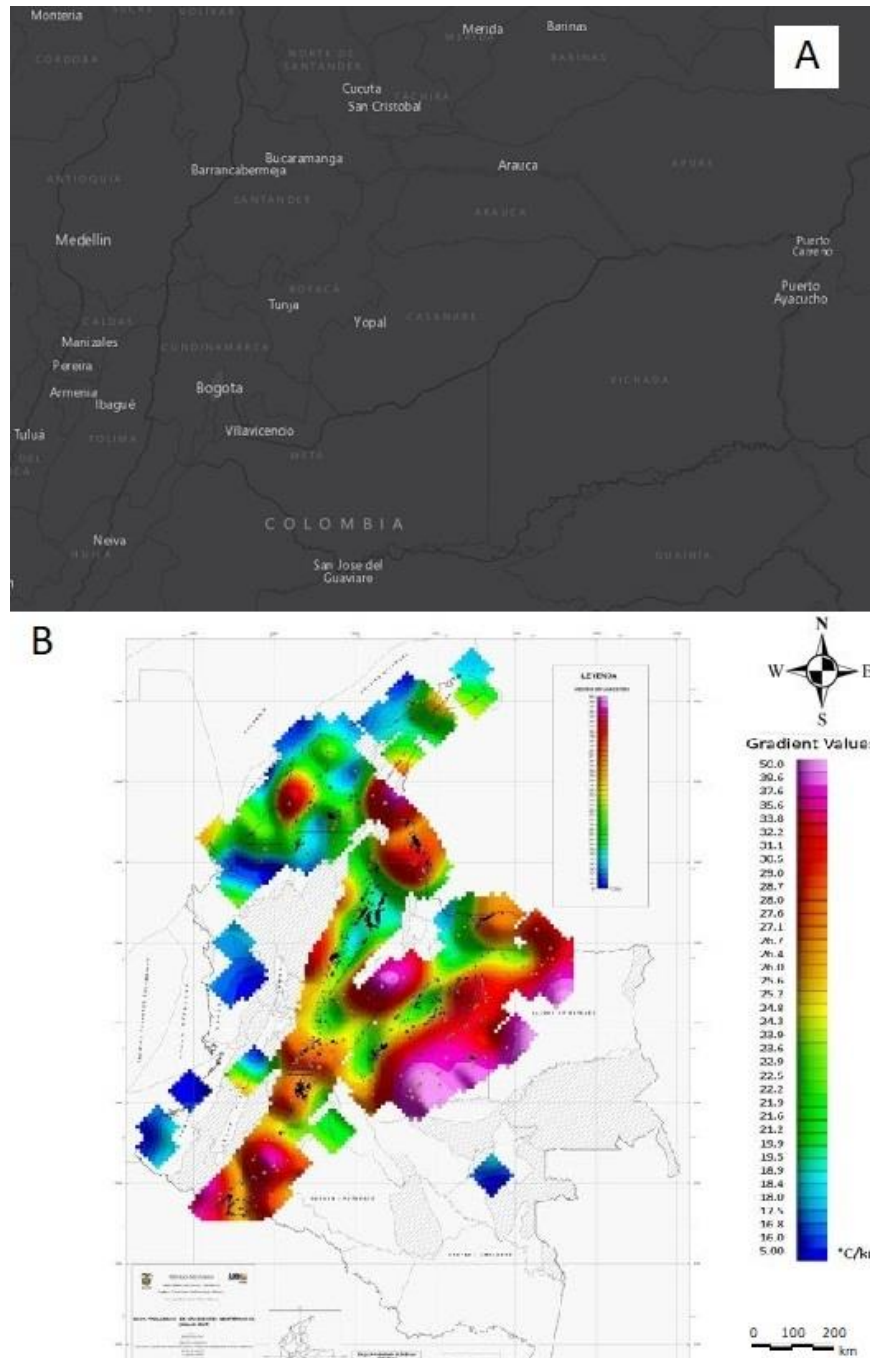
Durante esta fase, se compiló la mayor cantidad de información posible y disponible, incluida información bibliográfica para comprender la base conceptual, y la información reportada con respecto a los pozos de la cuenca Llanos Orientales que estaba directamente relacionada con el proyecto.

- Inicialmente, se revisaron artículos científicos, tesis, revistas, boletines y libros que estuvieran relacionados con el área de estudio de este proyecto de grado. Esta valoración se realizó en primera instancia desde las bases de datos de la Universidad Industrial de Santander por medio de la consulta de los Catálogos Bibliográficos desde la página web de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.
- Luego se descargó la información de los pozos perforados en toda la cuenca de Llanos Orientales, esta venía en formato “*shapefile*”. Así, se obtuvo un documento Excel con la información general de los pozos perforados a lo largo del tiempo en la cuenca de Llanos Orientales. Esta información se encontró en la base de datos del EPIS del Servicio Geológico Colombiano.
- Con el fin de importar los datos de pozos al software ArcGIS y que a su vez los datos estuvieran ubicados geográficamente de manera precisa, se evaluaron sus coordenadas con un mapa base de localización.

- Los datos contenidos en la tabla del archivo de pozos fueron evaluados para determinar su estado, unidades y duplicados. Estos fueron resaltados y filtrados para ser limpiados y tratados en una fase posterior.
- Asimismo, con el objetivo de tener un mapa base, se incluyó el Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia, que fue un trabajo colaborativo entre INGEOMINAS y la Agencia Nacional de Hidrocarburos, que incluyó el análisis y corrección de las mediciones de temperatura registradas en los pozos de diferentes cuencas sedimentarias del país. Los mapas mencionados anteriormente se pueden ver en la Figura 16.

**Figura 16**

*Mapas base para el modelamiento. A) Mapa base de referencia, usado para corroborar la localización de los puntos con referencia a los pozos. B) Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia, reportado por la ANH*



## 6.2 Revisión de Calidad de los Datos.

Para lograr mayor precisión en el modelado, se realizó un detallado control de calidad de los datos encontrados en el EPIS. Para ello se exportaron los datos a una hoja de cálculo de Excel. Para conservar la información inicial, se realizó una copia de la hoja inicial, donde la hoja llamada PreLimpiezatabla es la hoja inicial y PozosLlanosCalidad es la hoja donde se realizó la selección y certificación de los datos, ver Figura 17.

### Figura 17

*Hojas trabajadas en Excel*

6859	0.000000000000	CAST0406
6860	0.000000000000	CHIC0212
6861	0.000000000000	CHIC0209
6862	0.000000000000	SRDN0009
6863		

< > | PozosLlanosCALIDAD | Hoja1 | **PreLimpiezatabla**

Las hojas de cálculo contenían columnas de datos relacionados a los pozos de la cuenca Llanos Orientales, tales como UWI (Identificador de pozo único), nombre del pozo; TVD del pozo (profundidad vertical verdadera); longitud y latitud del pozo; coordenadas X, Y de cabeza y de fondo de pozo; operador del pozo; tipo de pozo; entre otros datos reportados. El control de calidad se muestra de manera general en la Tabla 1.

**Tabla 1***Selección y certificación de datos*

<b>SELECCIÓN Y CERTIFICACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Pauta de Depuración</b>	<b>Ejemplo</b>	<b>Motivo</b>
<p>Se verificó la columna de la hoja de Excel que contenía la profundidad vertical verdadera, TVD de los pozos</p>	<p>Valores de TVD -9999.000</p> <p>Valores de TVD equivalentes a 0</p> <p>Valores que no estaban relacionados en lo absoluto</p> <p>Valores de TVD y de MD de pozos desviados, el documento no contenía valores de azimut e inclinación para corroborar el valor TVD</p>	<p>Con el objetivo de ajustar la profundidad de los pozos para estudiar el gradiente geotérmico. En este proceso se filtraron aquellos datos que contenían valores anómalos</p>
<p>Se revisaron casos donde se observaban pozos duplicados, en relación con las coordenadas de longitud y latitud, de cabeza y fondo de pozo</p>	<p>Pozos duplicados con valores idénticos</p> <p>Pozos duplicados sin información con respecto a las coordenadas de fondo de pozo</p> <p>Pozos duplicados con valores equivalentes a 0 con respecto a las coordenadas</p>	<p>Con el objetivo de descartar pozos duplicados, de esta manera se evitaron errores en el software al realizar el modelamiento</p>
<p>Se ajustaron casos de pozos duplicados que tenían variación en las coordenadas de fondo y cabeza de pozo</p>	<p>Pozos ramificados varias veces, donde sus coordenadas de cabeza eran las mismas</p> <p>Pozos con ramificaciones, donde solo en una de ellas se encontraron datos de fondo de pozo, en las otras ramificaciones el valor era de 0</p>	<p>Con el objetivo de asegurar que el software tomará los valores únicos de profundidad que tenía cada pozo. Se evitó que el modelamiento tomará la media estadística al tener la misma coordenada</p>
<p>Además, se calcularon valores de coordenadas de fondo de pozo para veintidós pozos. Este proceso se realizó utilizando la función de cálculo de geometría de ArcGIS dado a que los datos estaban digitalizados y correctamente proyectados</p>		

Con respecto al control de calidad de los 6861 registros de pozos iniciales, se encontraron 152 pozos que tenían valores de -9999.00 con respecto a su valor de profundidad vertical, TVD. Además, 1258 pozos tenían valores equivalentes a 0 con respecto a su profundidad vertical, TVD. Luego, se revisaron los pozos que se consideraron duplicados y/o similares en cuanto a las coordenadas de longitud, latitud, así como las coordenadas de la cabeza y fondo del pozo, y finalmente se calcularon las coordenadas de los pozos que no tenían información correspondiente a su ubicación. Después de seguir estas pautas, y realizar un control de calidad óptimo, se terminaron estudiando 5049 pozos en relación con los pozos iniciales.

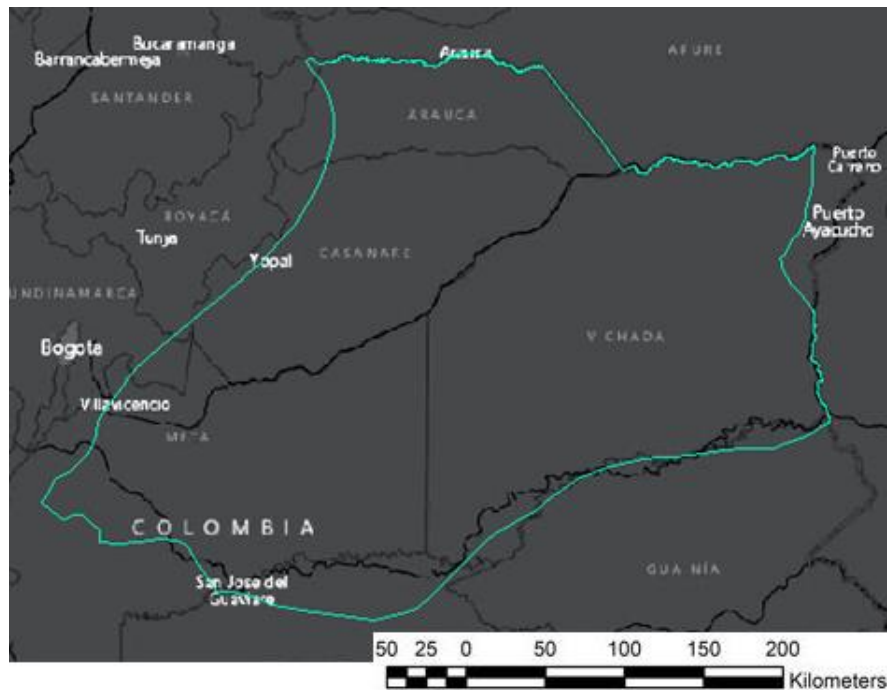
### **6.3 Carga de Información.**

En esta fase se comenzó a utilizar el software ArcGIS. Donde principalmente se importó la información pertinente para realizar el modelamiento de manera precisa.

- Se cargó el mapa base que proporcionó el contexto geográfico y los detalles de referencia con respecto a la ubicación del proyecto. Para usar solo el área de estudio en relación con el mapa base, se delimitó usando la herramienta *shapefile*, la cual permitió almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. En este caso, la entidad geográfica del *shapefile* está representada por un polígono que corresponde al área de la cuenca de los Llanos Orientales, como se muestra en la Figura 18.

**Figura 18**

*El polígono celeste, corresponde al shapefile creado con el fin de delimitar en el mapa base el área de estudio de este proyecto, cuenca Llanos Orientales*



- Se incluye el mapa de las anomalías geotérmicas presentado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (2009), sin embargo, cuando se importó en el software ArcGIS, este no se encontraba georreferenciado. Mediante la georreferenciación, se logró ubicar la imagen espacialmente definiendo sus coordenadas. Este procedimiento se basó en introducir puntos de control, mínimo cuatro (4) puntos sobre la imagen original y asociarlos con sus puntos correspondientes en el mapa base utilizando la herramienta *update georeferencing*. Se corroboró que el mapa de las anomalías geotérmicas estuviese espacialmente ubicado de la manera correcta, para esto se revisó que el mapa, el croquis de Colombia y el *shapefile* de la cuenca de los Llanos Orientales estuviesen en la misma área espacial del software ArcGIS como se muestra en la Figura 19. El



#### 6.4 Carga y Revisión de Calidad de Datos

En esta fase se importó la información de la hoja de cálculo de Excel. Primero se realizó la filtración de la información de los pozos de la cuenca de los Llanos Orientales, los cuales se seleccionaron y certificaron para asegurar que los datos fueran de alta calidad; se revisaron las coordenadas duplicadas de longitud y latitud, coordenadas de cabeza y de fondo de pozo, y posteriormente se calcularon las coordenadas de los pozos donde no se tenía información. Sin embargo, cuando se comenzó a exportar los datos al software ArcGIS, se encontró que los datos filtrados (datos de pozos que se ajustaban a este objetivo) no coincidían con los datos originales. La razón fue que, cuando se intentó importar la información en el software en base a los valores de las coordenadas de los pozos, no fue posible hacer que coincidieran espacialmente los 5049 pozos que se habían filtrado, esto porque la hoja de cálculo de Excel contenía distintos sistemas de coordenadas, como, por ejemplo: Bogotá Central, Magma Sirgas Este, Magma Sirgas Central, Bogotá Este, entre otros. Algunos ejemplos se muestran en las siguientes figuras:

#### Figura 20

*En la columna W de la hoja de cálculo de Excel, se pueden ver algunos de los sistemas de coordenadas usados en el documento*

	A	B	V	W
1	object_key	uwi	datum_key	datum
2	18278.000000000000	SASA0009	126.000000000000	BOGOTA CENTRAL
3	0.000000000000	RUBI1022H	0.000000000000	MAGNA SIRGAS 3 ESTE
4	15960.000000000000	SIRU0000	120.000000000000	MAGNA SIRGAS CENTRAL
5	3365.000000000000	SABN0010STRAT	120.000000000000	MAGNA SIRGAS CENTRAL

**Figura 21**

*Otros ejemplos de pozos con distintos sistemas de coordenadas*

112	168842.000000000000	CHIC0204ST	0.000000000000	BOGOTA CENTRAL
113	4142.000000000000	RUBI0816H	121.000000000000	MAGNA SIRGAS ESTE
114	15956.000000000000	SIAR0001	120.000000000000	MAGNA SIRGAS CENTRAL
115	16263.000000000000	EMIE0001	127.000000000000	BOGOTA ESTE
116	61488.000000000000	RUBI0951H	121.000000000000	MAGNA SIRGAS

Por esta razón, y para evitar un modelado incorrecto, se filtraron los datos utilizando el lenguaje SQL directamente en el software ArcGIS. De la siguiente manera:

- Como se filtró anteriormente, se conocía que había 5049 pozos para procesar. Así que esta vez se utilizó de la hoja de cálculo de Excel, el UWI (valor único del pozo) con el objetivo de crear un código que fuera posible ingresar en el software, ver Figura 22.

**Figura 22**

*La columna B muestra el UWI de cada pozo, la columna C la fórmula y la columna D es la fórmula, pero tipo texto para facilitar su manejo en el software*

	B	C	D
1	uwi	Codigo (Formula)	Codigo (Texto)
2	SASA0009	'SASA0009' OR "uwi"=	'SASA0009' OR "uwi"=
3	RUBI1022H	'RUBI1022H' OR "uwi"=	'RUBI1022H' OR "uwi"=
4	SIRU0000	'SIRU0000' OR "uwi"=	'SIRU0000' OR "uwi"=
5	SABN0010STRAT	'SABN0010STRAT' OR "uwi"=	'SABN0010STRAT' OR "uwi"=
6	SIRU000N	'SIRU000N' OR "uwi"=	'SIRU000N' OR "uwi"=
7	RCUR0001	'RCUR0001' OR "uwi"=	'RCUR0001' OR "uwi"=
8	AVIS0007	'AVIS0007' OR "uwi"=	'AVIS0007' OR "uwi"=
9	SLTN0001ST	'SLTN0001ST' OR "uwi"=	'SLTN0001ST' OR "uwi"=
10	RZAN0001	'RZAN0001' OR "uwi"=	'RZAN0001' OR "uwi"=
11	MACA0001	'MACA0001' OR "uwi"=	'MACA0001' OR "uwi"=
12	CSI1000202	'CSI1000202' OR "uwi"=	'CSI1000202' OR "uwi"=
13	SIRU000E	'SIRU000E' OR "uwi"=	'SIRU000E' OR "uwi"=
14	RGUE0001	'RGUE0001' OR "uwi"=	'RGUE0001' OR "uwi"=
15	SIRU000L	'SIRU000L' OR "uwi"=	'SIRU000L' OR "uwi"=
16	RUBI0979H	'RUBI0979H' OR "uwi"=	'RUBI0979H' OR "uwi"=
17	AVIS0007ST2	'AVIS0007ST2' OR "uwi"=	'AVIS0007ST2' OR "uwi"=
18	SIRU000H	'SIRU000H' OR "uwi"=	'SIRU000H' OR "uwi"=
19	SIRU000D	'SIRU000D' OR "uwi"=	'SIRU000D' OR "uwi"=
20	CIPI0024	'CIPI0024' OR "uwi"=	'CIPI0024' OR "uwi"=
21	SIRU000M	'SIRU000M' OR "uwi"=	'SIRU000M' OR "uwi"=
22	QUIF0388H	'QUIF0388H' OR "uwi"=	'QUIF0388H' OR "uwi"=

- Luego se desplazó toda la columna D de la hoja de cálculo de Excel correspondiente al texto del código SQL a un documento de Word para compilar todo el código para importarlo al software. Este segmento fue el texto utilizado como código SQL para que el software filtrará únicamente los pozos que se necesitaban estudiar. En total fueron 16 páginas de Word que contenían 15142 palabras y representaban el código SQL, como se muestra en la Figura 23.

### Figura 23

*Segmento del código SQL utilizado para filtrar información en el software ArcGIS. Corresponde a una pequeña sección de todo el código generado desde la hoja de cálculo de Excel*

```

"uwi"='SASA0009'.OR."uwi"='RUBI1022H'.OR."uwi"='SIRU0000'.OR."uwi"='SABN0010STRAT'.OR.
"uwi"='SIRU000N'.OR."uwi"='RCUR0001'.OR."uwi"='AVIS0007'.OR."uwi"='SLTN0001ST'.OR.
"uwi"='RZAN0001'.OR."uwi"='MACA0001'.OR."uwi"='CSI1000202'.OR."uwi"='SIRU000E'.OR.
"uwi"='RGUE0001'.OR."uwi"='SIRU000L'.OR."uwi"='RUBI0979H'.OR."uwi"='AVIS0007ST2'.OR.
"uwi"='SIRU000H'.OR."uwi"='SIRU000D'.OR."uwi"='CIP10024'.OR."uwi"='SIRU000M'.OR."uwi"='
'QUIF0388H'.OR."uwi"='CPO0016EST8'.OR."uwi"='SIRU000K'.OR."uwi"='SMSM0007'.OR."uwi"='
'CPO0016EST7'.OR."uwi"='SMSM0001'.OR."uwi"='CPO0017EST5'.OR."uwi"='SIRU000G'.OR.
"uwi"='SASA0004'.OR."uwi"='SASA0003'.OR."uwi"='CPE00005SD'.OR."uwi"='SIRU000J'.OR.
"uwi"='CIP10016'.OR."uwi"='LINO0001'.OR."uwi"='AVIS0007ST1'.OR."uwi"='SASA0002'.OR.
"uwi"='SIRU000B'.OR."uwi"='OROP0007B'.OR."uwi"='CPO0016EST6'.OR."uwi"='BALA0001'.OR.
"uwi"='CPE00005SE'.OR."uwi"='SMSM0002'.OR."uwi"='CPE00005SC'.OR."uwi"='CPO0016EST5'.
OR."uwi"='CHIC0045SW'.OR."uwi"='SIRU000C'.OR."uwi"='STCI0013'.OR."uwi"='CPO0016EST1'.
OR."uwi"='CPO0017WI1'.OR."uwi"='SIRU0001A'.OR."uwi"='CPE00005SG'.OR."uwi"='
'SASA0009A'.OR."uwi"='CPO0016EST2'.OR."uwi"='STCN0005'.OR."uwi"='STCN0007'.OR."uwi"='
'CHRN0001'.OR."uwi"='SVSV0005'.OR."uwi"='STCI0014'.OR."uwi"='QUIF0382H'.OR."uwi"='
'RUBI0985H'.OR."uwi"='QUIF0219H'.OR."uwi"='RETO0001'.OR."uwi"='SVSV0009'.OR."uwi"='
'STO00001'.OR."uwi"='SMSM0009'.OR."uwi"='OROP0008'.OR."uwi"='SASA0016'.OR."uwi"='
'AKAC0001EST'.OR."uwi"='SEGA0002'.OR."uwi"='QUIF0360D'.OR."uwi"='CHIC0071SWST2'.OR.
"uwi"='CHIC0071SWST1'.OR."uwi"='SASA0011'.OR."uwi"='RUBI0596H'.OR."uwi"='ABAR0087D'.
OR."uwi"='OCEL0015SW'.OR."uwi"='RUBI0063DWD'.OR."uwi"='DORC0001'.OR."uwi"='
'CSEX0009'.OR."uwi"='TOPP0001S'.OR."uwi"='LLAS0058A5'.OR."uwi"='CLIM0055'.OR."uwi"='
'STO00002'.OR."uwi"='LYUC0272'.OR."uwi"='LYUC0271'.OR."uwi"='RUBIDW0007H'.OR."uwi"='
'RUBIDW0007'.OR."uwi"='LYUC0261ST'.OR."uwi"='LYUC0261A'.OR."uwi"='LYUC0267'.OR.
"uwi"='CHAF0004'.OR."uwi"='LYUC0269'.OR."uwi"='CHIC0016SW'.OR."uwi"='LYUC0268'.OR.
"uwi"='PASO0001'.OR."uwi"='BONS0001'.OR."uwi"='RUBI0623H'.OR."uwi"='OJOT0002ST'.OR.
"uwi"='RUBI0821H'.OR."uwi"='RUBI0751H'.OR."uwi"='ARDI0001'.OR."uwi"='KANA0001'.OR.
"uwi"='RUBI0730H'.OR."uwi"='CMTA0001'.OR."uwi"='RUBI0822H'.OR."uwi"='BUEO0044H'.OR.

```

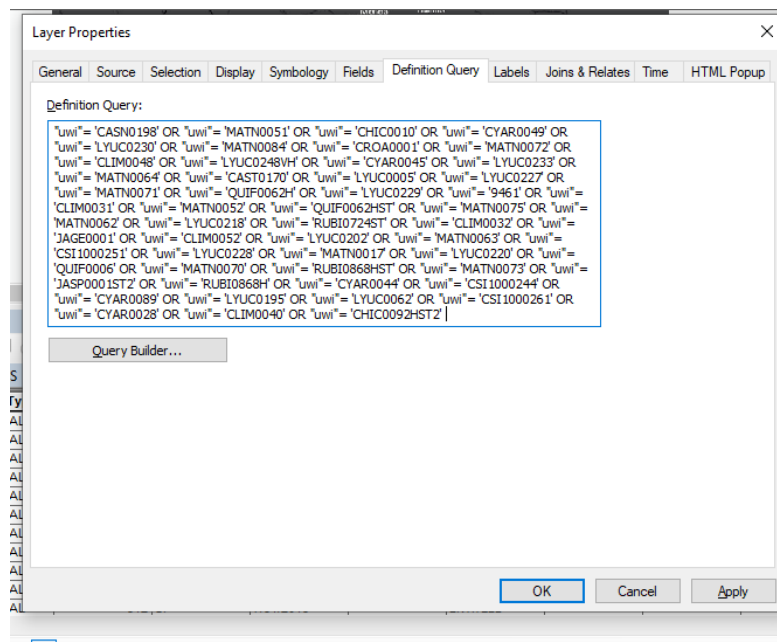
- El propósito de este paso fue importar todo el código generado en el paso anterior, pero al ser un código tan extenso, no fue posible hacerlo de una sola vez, por esta razón se importaron en repetidas ocasiones segmentos del código SQL. Entonces, en la capa de trabajo, se desplegó el menú de propiedades, se seleccionó *Definition Query* (esto

ajustar la imagen por medio del código de SQL, además se determinaron las entidades que aparecían en la tabla de atributos de la capa de trabajo), luego se procedió a dar OK. Este paso se repitió hasta ingresar en su totalidad el código SQL, teniendo presente que el lenguaje del código se debía respetar para no afectar la información de los pozos.

Como se muestra en la siguiente figura:

### Figura 24

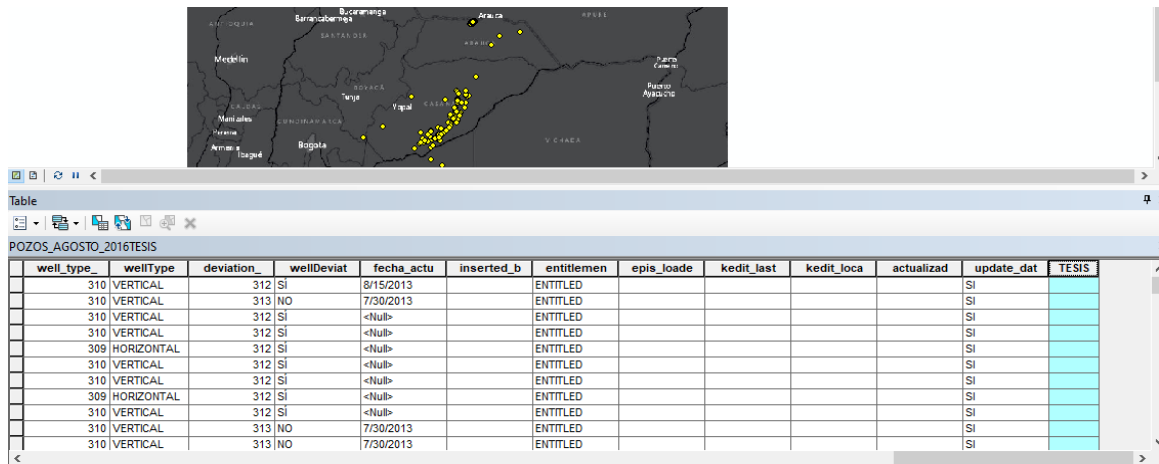
*Tabla de propiedades, donde se ingresó el segmento del código SQL. Definition Query hace que, al ingresar el código, se pueda determinar las entidades que aparecen en la tabla de atributos de la capa*



- Cada vez que se ingresaron segmentos del código de SQL o, dicho de otra manera, cierta cantidad de pozos, estos se resaltaron en el programa. Para esto, se creó una columna en la tabla de atributos que se llamó TESIS y cada pozo agregado se etiquetó ingresando una letra “Y” en dicha columna, para tenerlos identificados y poder filtrarlos posteriormente, Figura 25.

**Figura 25**

Tabla de atributos de la capa de trabajo. Donde la columna creada es la resaltada de celeste, esto con el fin de etiquetar los pozos agregados por medio de lenguaje SQL

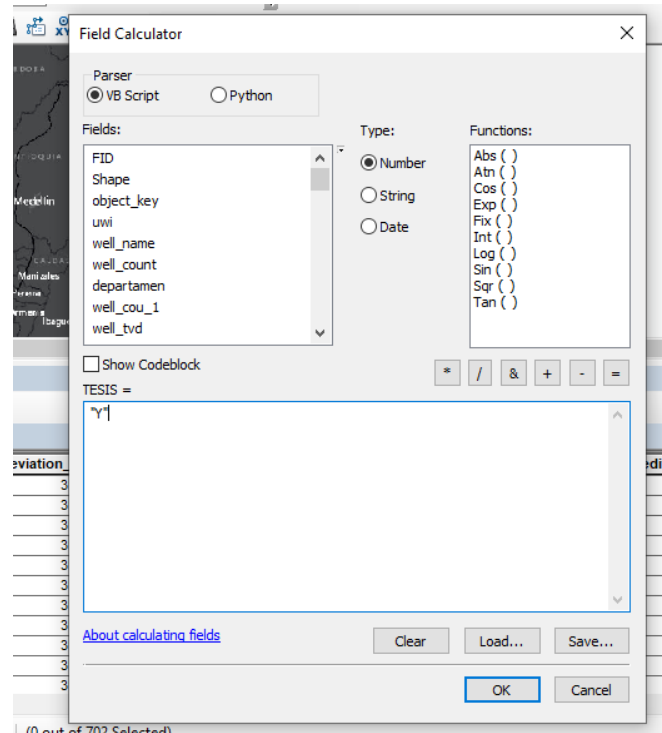


well_type_	wellType	deviation_	wellDeviat	fecha_actu	inserted_b	entitlemen	epis_loade	keditt_last	keditt_loca	actualizad	update_dat	TESIS
310	VERTICAL	312	SI	8/15/2013		ENTITLED					SI	
310	VERTICAL	313	NO	7/30/2013		ENTITLED					SI	
310	VERTICAL	312	SI	<Null>		ENTITLED					SI	
310	VERTICAL	312	SI	<Null>		ENTITLED					SI	
309	HORIZONTAL	312	SI	<Null>		ENTITLED					SI	
310	VERTICAL	312	SI	<Null>		ENTITLED					SI	
310	VERTICAL	312	SI	<Null>		ENTITLED					SI	
309	HORIZONTAL	312	SI	<Null>		ENTITLED					SI	
310	VERTICAL	312	SI	<Null>		ENTITLED					SI	
310	VERTICAL	313	NO	7/30/2013		ENTITLED					SI	
310	VERTICAL	313	NO	7/30/2013		ENTITLED					SI	

- Para agregar la etiqueta mencionada “Y”, se seleccionó la columna llamada TESIS, luego se oprimió clic derecho y se seleccionó *Field Calculator*, lo que desplegó la tabla de la Figura 26, y luego se agregó la marca, esto con el objetivo de filtrar los pozos agregados mediante el código SQL.

**Figura 26**

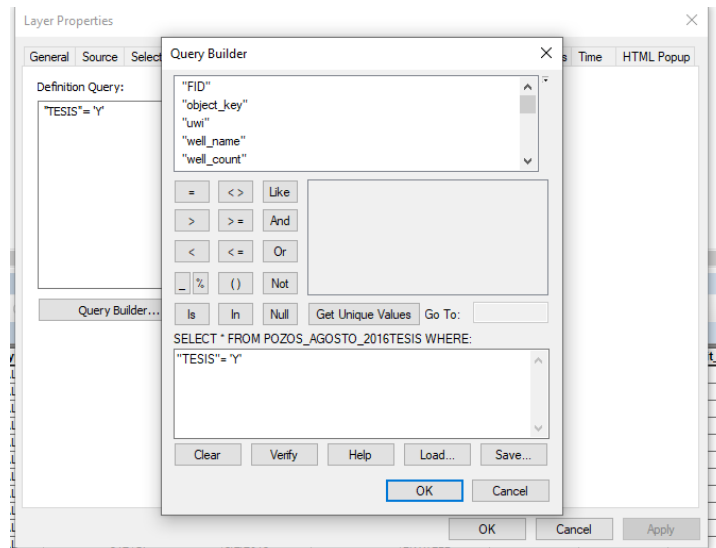
Tabla de la columna TESIS, donde se etiquetaron los pozos filtrados mediante lenguaje SQL



- Finalmente, después de agregar en su totalidad el código SQL al software ArcGIS, se procedió a definir nuevamente el *QUERY*, esta vez para filtrar los 5049 pozos que se habían seleccionado y certificado con anterioridad en este caso de estudio. Esto se hizo por medio de la marca “Y” que contenían los pozos a estudiar en la columna TESIS, como muestra la Figura 27.

**Figura 27**

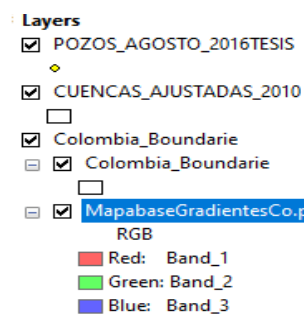
Definición del QUERY para filtrar los 5049 pozos, siguiendo la etiqueta de la marca "Y" que tenían los pozos a revisar



La Figura 28 muestra las capas de trabajo creadas en el software ArcGIS esto con el objetivo de tener un espacio de trabajo organizado.

**Figura 28**

Capas creadas en el software ArcGIS



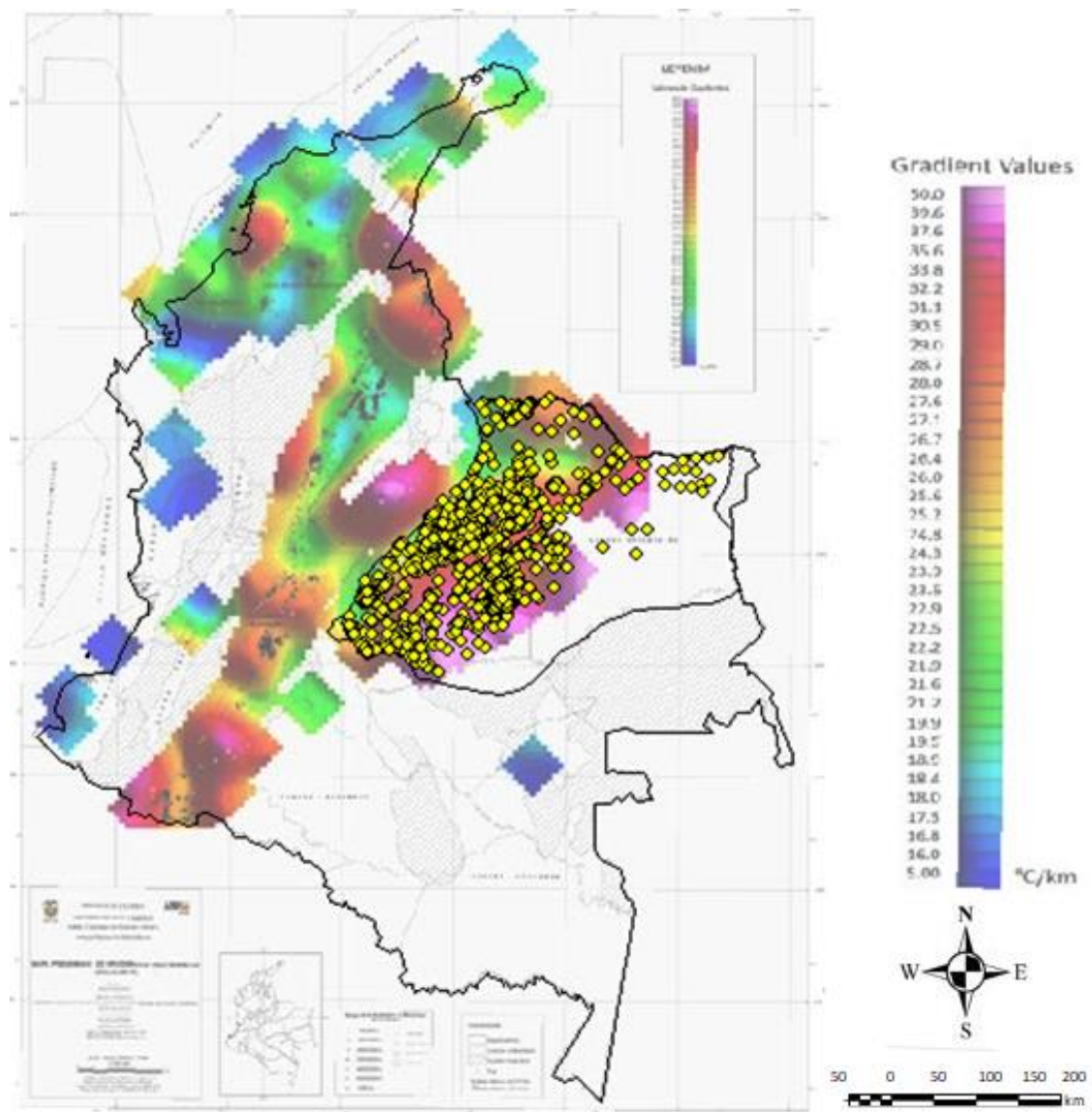
Donde Pozos\_Agosto, corresponde al archivo original donde se filtraron por medio del código SQL los 5049 pozos que se revisaron. Cuencas\_Ajustadas corresponde a la delimitación que se realizó mediante *shapefiles* de la zona de estudio la cuenca de los Llanos Orientales.

Colombia\_Boundarie corresponde al croquis de Colombia que se utilizó para georreferenciar el mapa de las anomalías geotérmicas presentado por la ANH.

En la Figura 29 se observa que todo se encontraba espacialmente alineado, tanto el mapa de las anomalías geotérmicas, como la cuenca de los Llanos Orientales y los pozos que se filtraron para su revisión, estos corresponden a los puntos amarillos que aparecen en la imagen.

### Figura 29

*Información pertinente para realizar el modelado en el software ArcGIS*



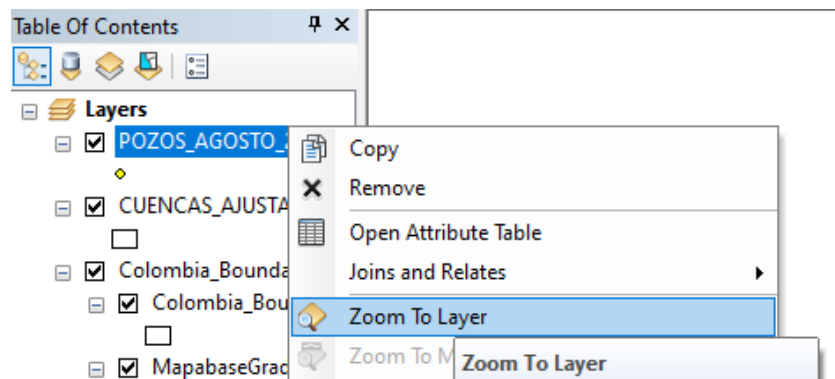
### 6.5 Modelamiento de los Pozos de la Cuenca de los Llanos Orientales.

Con el objetivo de analizar espacialmente la cuenca de los Llanos Orientales, se modelaron primeramente los pozos, esta interpolación se realizó utilizando el método Kriging en el software ArcGIS, donde el valor base para el modelado fue la profundidad TVD de los pozos filtrados. Cabe mencionar que la herramienta Kriging de ArcGIS tiene dos tipos, Ordinario y Universal. Este proyecto utilizó el método Ordinario que contenía cinco tipos diferentes basados en el modelo de semivariograma: esférico, circular, exponencial, gaussiano y lineal; dependiendo del semivariograma seleccionado en la herramienta, se obtenía un gráfico correspondiente al modelamiento Kriging. Este proceso se realizó de la siguiente manera:

- Se organizó espacialmente todos los datos en el espacio de trabajo en el software ArcGIS para que la información estuviese centrada en la pantalla y fuese posible ajustarla y examinarla correctamente, esto se hizo por medio de “Zoom to Layer”, Figura 30.

#### Figura 30

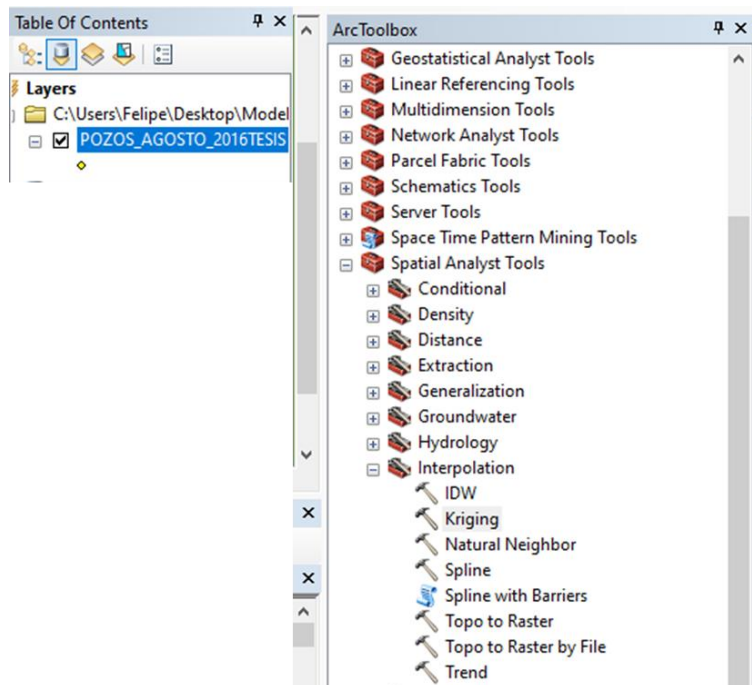
*Zoom to Layer, para examinar el área de estudio de la capa de trabajo*



- Se utilizó la herramienta de análisis espacial “Interpolación” y posteriormente se seleccionó “Kriging”. Esta se encuentra en la barra de herramientas “Arc Toolbox” del software ArcGIS, Figura 31.

**Figura 31**

*Barra de herramientas de ArcGIS. En este proyecto se utilizó del menú de Interpolación, la herramienta Kriging, para realizar el modelamiento*

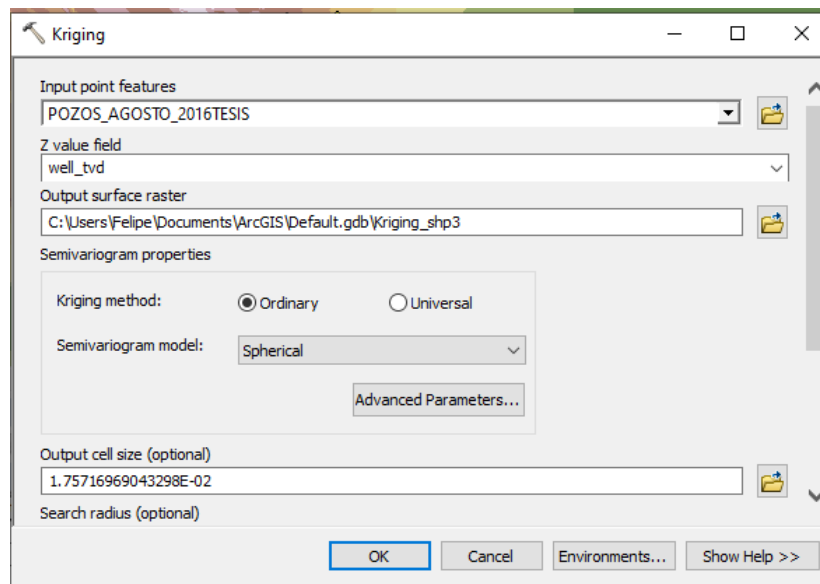


- Al seleccionar la herramienta “Kriging”, se desplegó la ventana que se muestra en la Figura 32. Donde cada campo corresponde a lo siguiente:
  - “*Input point features*”: se refiere a la información de entrada del modelamiento, en este espacio se seleccionó el archivo que contiene la información de los pozos de la cuenca Llanos Orientales.
  - “*Z value field*”: se refiere al valor que fue la base para realizar la interpolación, en este caso fue la profundidad vertical del pozo TVD.

- “*Output surface raster*”: un ráster es un modelo de datos basados en celdas de la información de salida, que corresponde a una representación pictórica bidimensional de la interpolación, para este caso se utilizó el método Kriging.
- “*Kriging method*”: se seleccionó el método Ordinario para realizar todo el modelamiento.
- “*Semivariogram model*”: En este campo es donde se seleccionaron cada uno de los cinco semivariogramas que se utilizaron para interpolar la información. En este caso se inició usando el método esférico.
- “*Output cell size*”: este campo es opcional y correspondía al tamaño de las celdas, entre menos diferencia tengan las celdas o en otras palabras más pequeño fuese el valor, la representación gráfica era más precisa.

### Figura 32

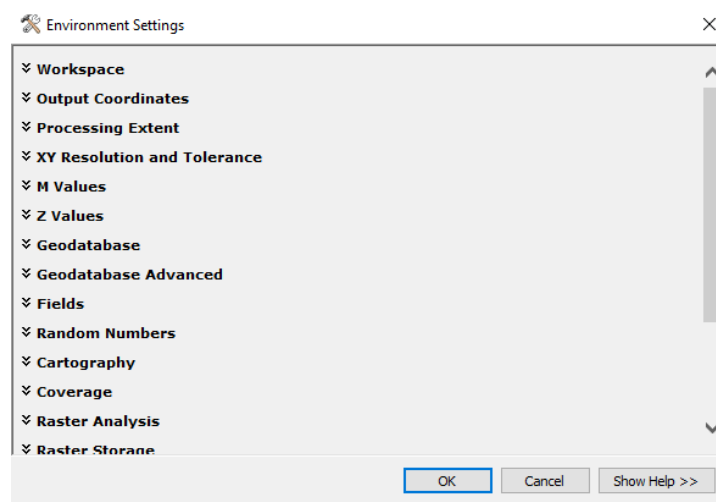
*Interpolación usando el método Kriging. En esta ventana aparece como ejemplo el método esférico, el cual fue el primer modelamiento*



- Se procedió a dar click en la parte inferior derecha de la Figura 32, específicamente en el cuadro llamado “*Environments*” que, posteriormente desplegó la ventana de la Figura 33. Esto se hizo para modificar las opciones que aparecían en la Figura 34 con el fin de ajustar de manera precisa la interpolación:
  - “*Processing Extent*”: Se usa para definir el área de interés geográfica que va a aplicarse en la interpolación, en este caso se modificó para que el modelamiento se realizará en la misma pantalla que se estaba trabajando “*Same as Display*”.
  - “*Geostatistical Analysis*”: Permite definir qué puntos o en este caso campos se querían procesar en el modelamiento, para este proyecto se seleccionó la opción para que incluyeran todos, y así omitir que existieran aproximaciones o medias con respecto a los datos de los pozos.

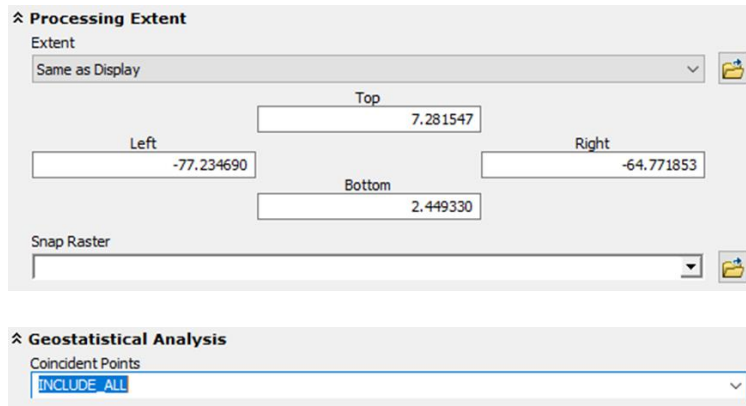
### Figura 33

*Ventana emergente del método de Kriging donde se hicieron los ajustes correspondientes para mejorar el resultado de la interpolación*



**Figura 34**

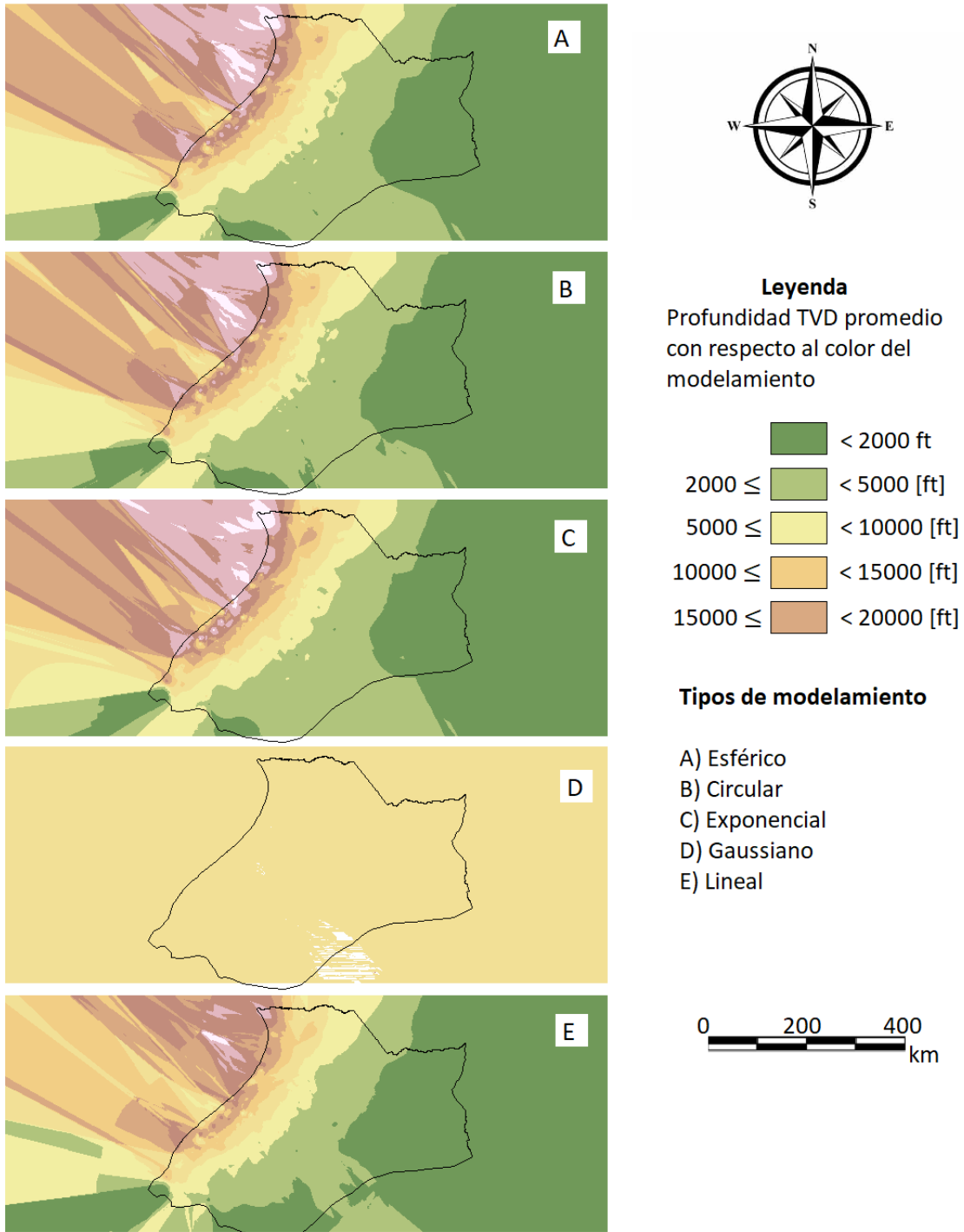
*Opciones que se modificaron para ajustar de manera precisa la interpolación que se quería realizar*



Al ejecutar en cinco ocasiones los pasos anteriores, se obtuvo cinco gráficos diferentes de interpolación del método Kriging, donde únicamente se modificó por ocasión, el modelo de semivariograma que aparecía en la ventana de la Figura 32. De esta manera fue posible observar si existían diferencias entre los modelos de semivariograma que se seleccionaron. Estos gráficos se observan en la gráfica de la Figura 35.

**Figura 35**

*Resultado final del modelamiento. Corresponden a él ráster de cada uno de los semivariogramas seleccionados*



## 7. Análisis Espacial de la Anomalía Geotérmica de los Llanos Orientales - Resultados

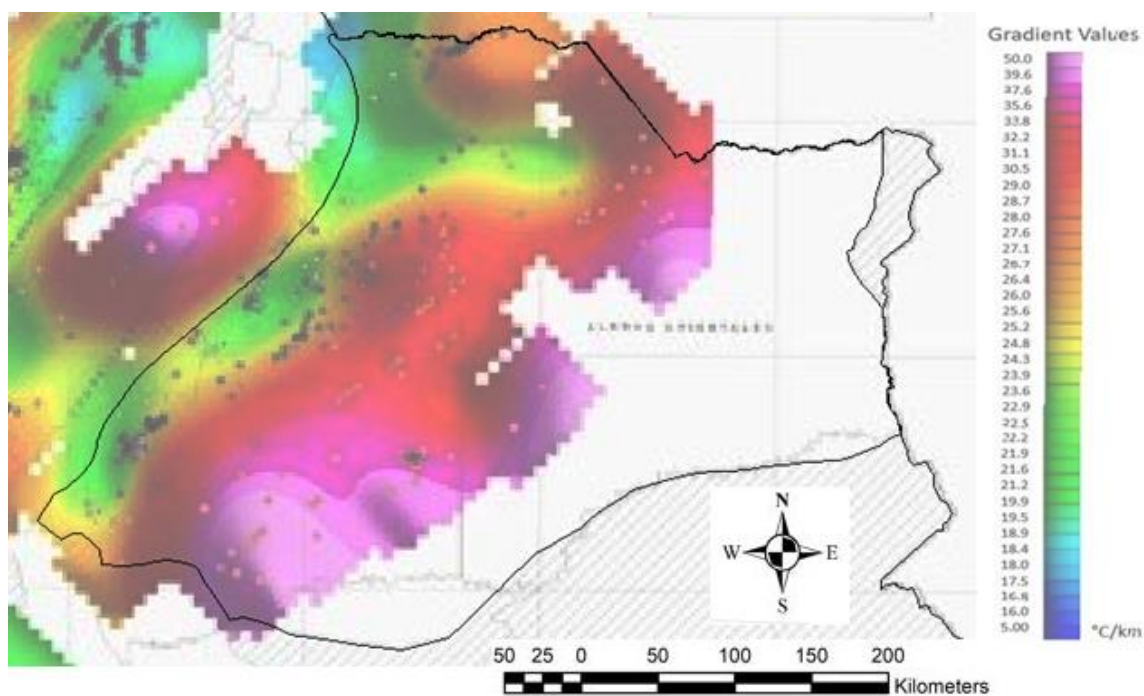
Una vez realizado el modelamiento y obtenido diversos resultados usando el modelo de semivariograma para la interpolación del método Kriging, se realizó una interpretación detallada en base al mapa inicial de gradientes geotérmicos de Colombia y los resultados del modelamiento, para luego analizar la relación de la profundidad con el gradiente geotérmico.

### 7.1 Análisis del Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia Presentado por la ANH.

En esta fase se examinó el comportamiento de los gradientes expuestos en el mapa preliminar de la ANH (2009). Este mapa de Colombia se recortó para analizar la sección del mapa que corresponde a la zona de estudio de este proyecto, como muestra la Figura 36.

**Figura 36**

*Gradientes geotérmicos de la cuenca de los Llanos Orientales*



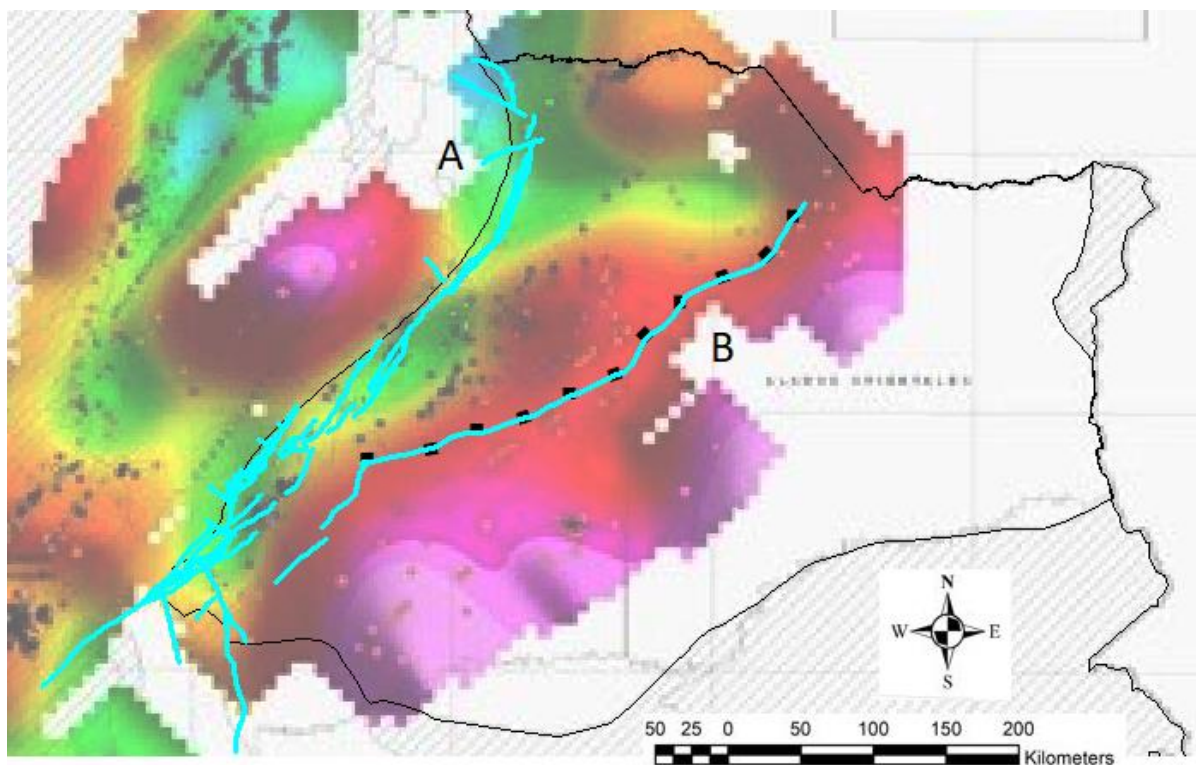
Según la escala de colores el color morado indica los gradientes más altos ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), y los colores verde y azul indican los cambios de temperatura más bajos reportados en esa área del mapa. En el mapa se pueden ver dos tendencias:

- La primera es que, se detectaron gradientes muy bajos cerca del borde de la cuenca de los Llanos Orientales, en la zona del piedemonte.
- La segunda es que a medida que se avanza hacia la cuenca, los gradientes aumentan considerablemente.

Para comprender las razones de estas tendencias de los gradientes, en el software ArcGIS se agregó una capa de trabajo que corresponde a las fallas geológicas que se encuentran en la zona de estudio, como se muestra en la siguiente figura:

### Figura 37

*Fallas geológicas de la cuenca de los Llanos Orientales*



Las líneas de color celeste de la Figura 37 representan las fallas geológicas de la región, con la letra A correspondiente al sistema de fallas de Guaicaramo del Piedemonte Llanero, y la letra B correspondiente a la falla normal del Meta. Por lo tanto, en relación con estas fallas geológicas y a las tendencias, se puede decir que la falla del Meta la cual está inclinada hacia la cordillera como lo indican los cuadros negros sobre la línea azul, es la zona de transición donde se observa el cambio en las temperaturas de los gradientes geotérmicos de la cuenca de los Llanos Orientales.

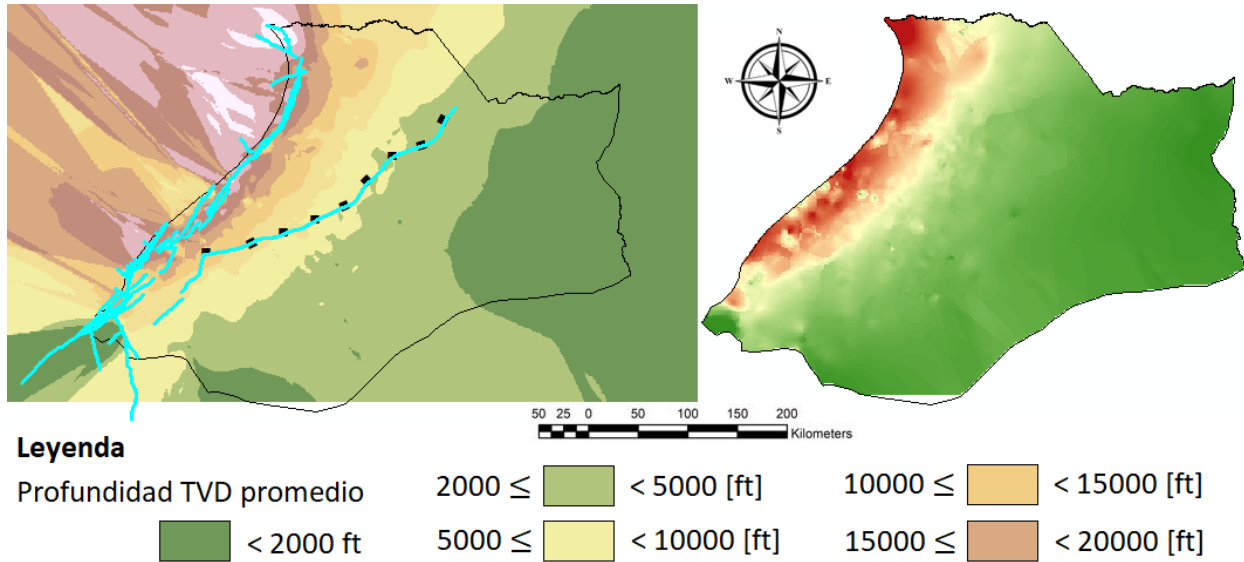
## **7.2 Análisis de los Mapas Modelados con el Método de Interpolación Kriging.**

Se obtuvieron cinco modelos diferentes, uno para cada semivariograma seleccionado: esférico, circular, exponencial, gaussiano y lineal. Los cuales pertenecen al grupo de los métodos ordinarios que hacen parte del software ArcGIS. Para cada resultado obtenido del modelado, se recortó visualmente solo el área de estudio del proyecto usando la herramienta *shapefile* del software. Esto se puede ver en el lado derecho de las imágenes que se exponen en esta fase, Figuras 38 a 41.

Para obtener las figuras, se modeló la profundidad vertical verdadera TVD de los pozos de la cuenca de los Llanos Orientales. Donde el color rojo indica una zona más profunda y el color verde indica pozos más someros.

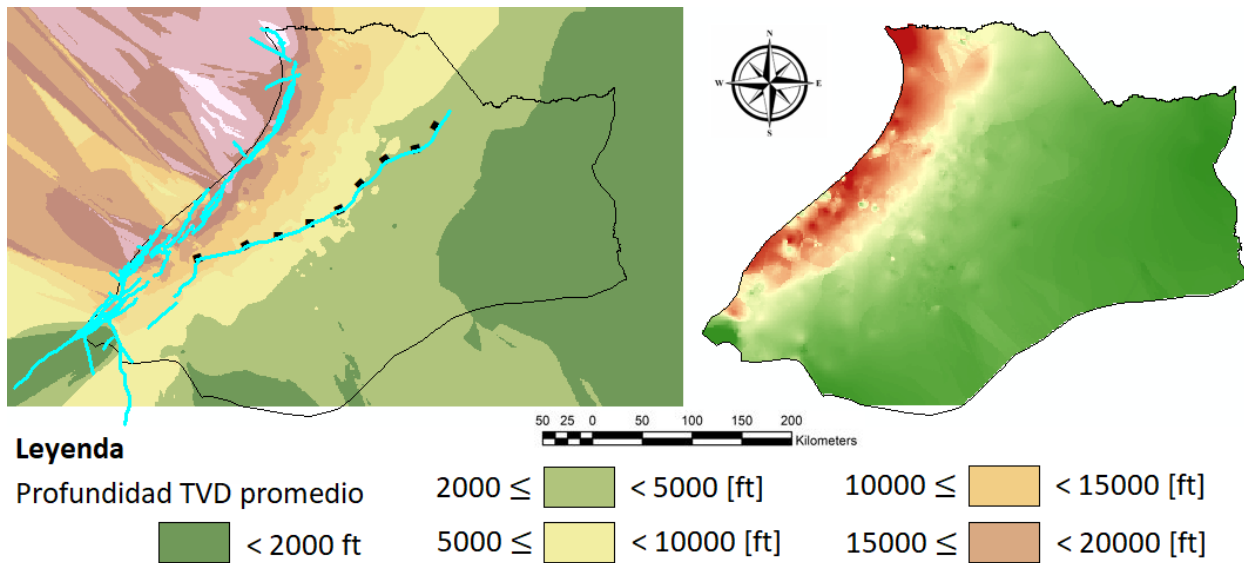
**Figura 38**

*Método Kriging: modelo esférico*



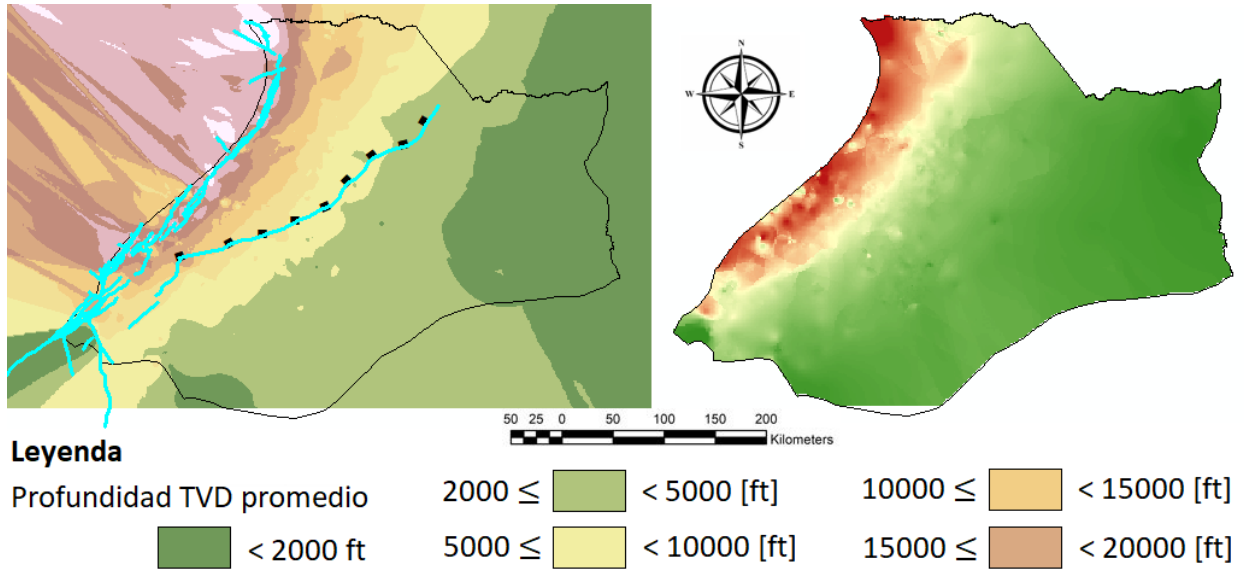
**Figura 39**

*Método Kriging: modelo circular*



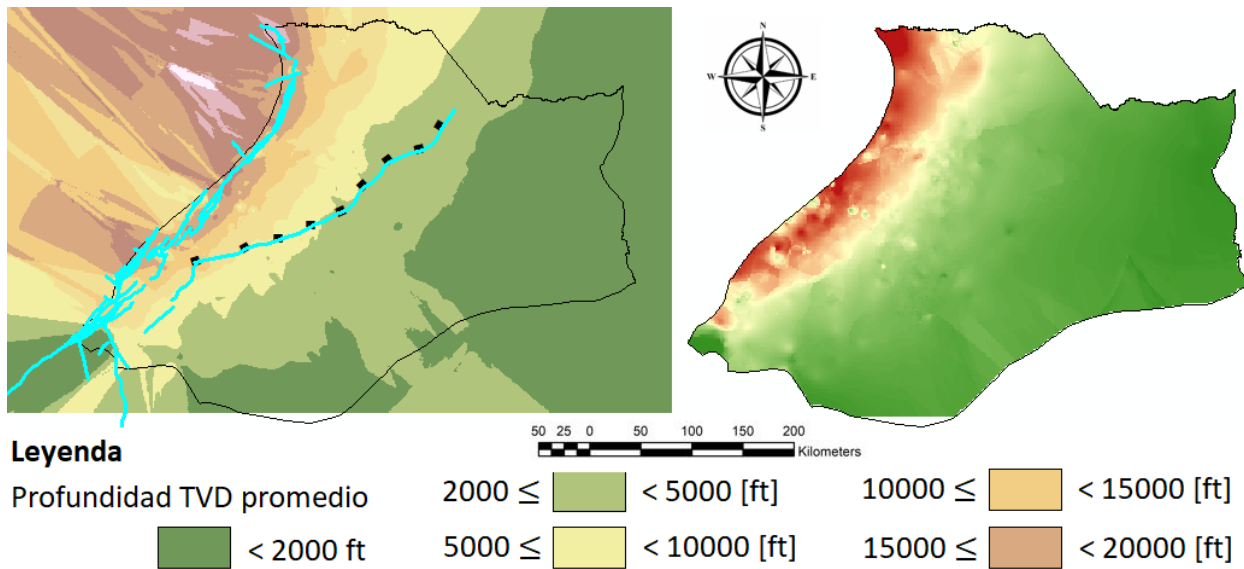
**Figura 40**

*Método Kriging: modelo exponencial*



**Figura 41**

*Método Kriging: modelo lineal*



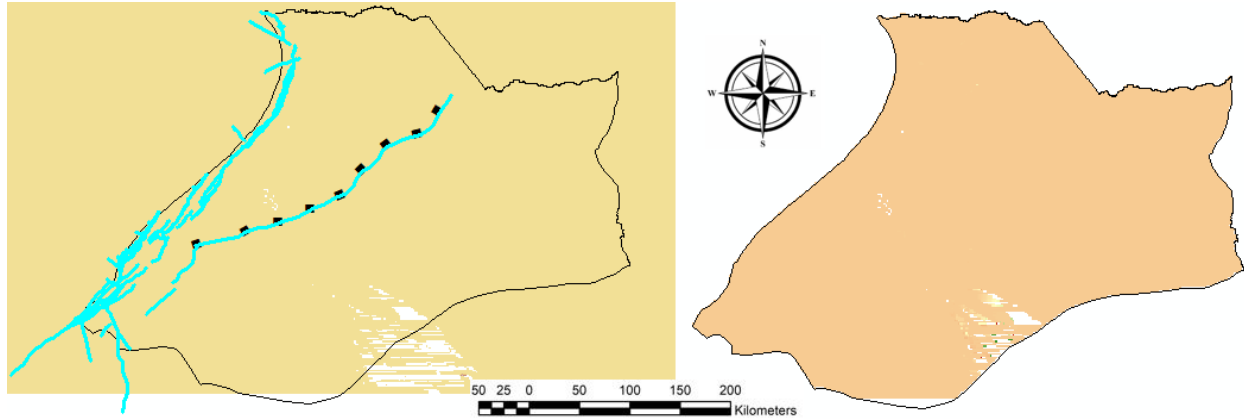
Se observó que los cuatros modelos anteriores siguen el mismo patrón y que el resultado obtenido en el modelamiento fue similar en cada ocasión. Se encontraron dos tendencias principalmente:

- Cerca al Piedemonte llanero, donde se encuentra el sistema de fallas Guaicaramo, las profundidades de los pozos de la cuenca de los Llanos Orientales eran más profundas, pues se observa un color rojo que hace referencia al modelamiento del TVD.
- A medida que se avanza hacia a la cuenca, se observó que los pozos tienen profundidades más someras, por esta razón se observa en la mayor parte un color verde.

Ahora bien, cuando se realizó la interpolación usando el modelo de semivariograma Gaussiano, el resultado fue totalmente diferente, como lo muestra la Figura 42. Según la primera ley de la geografía de Tobler, “todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las cosas distantes”. En el caso de los semivariogramas, las características que están más juntas son más predecibles y menos variables. La función Gaussiana utiliza una distribución de probabilidad estándar. Este tipo de modelo es útil cuando los eventos son uniformes a distancias cortas debido a su ascenso progresivo en el eje Y. Por lo tanto, al tener tanta variabilidad en los datos de los pozos es probable que la interpolación haya presentado un error y por esta razón la representación gráfica no es útil para este proyecto.

**Figura 42**

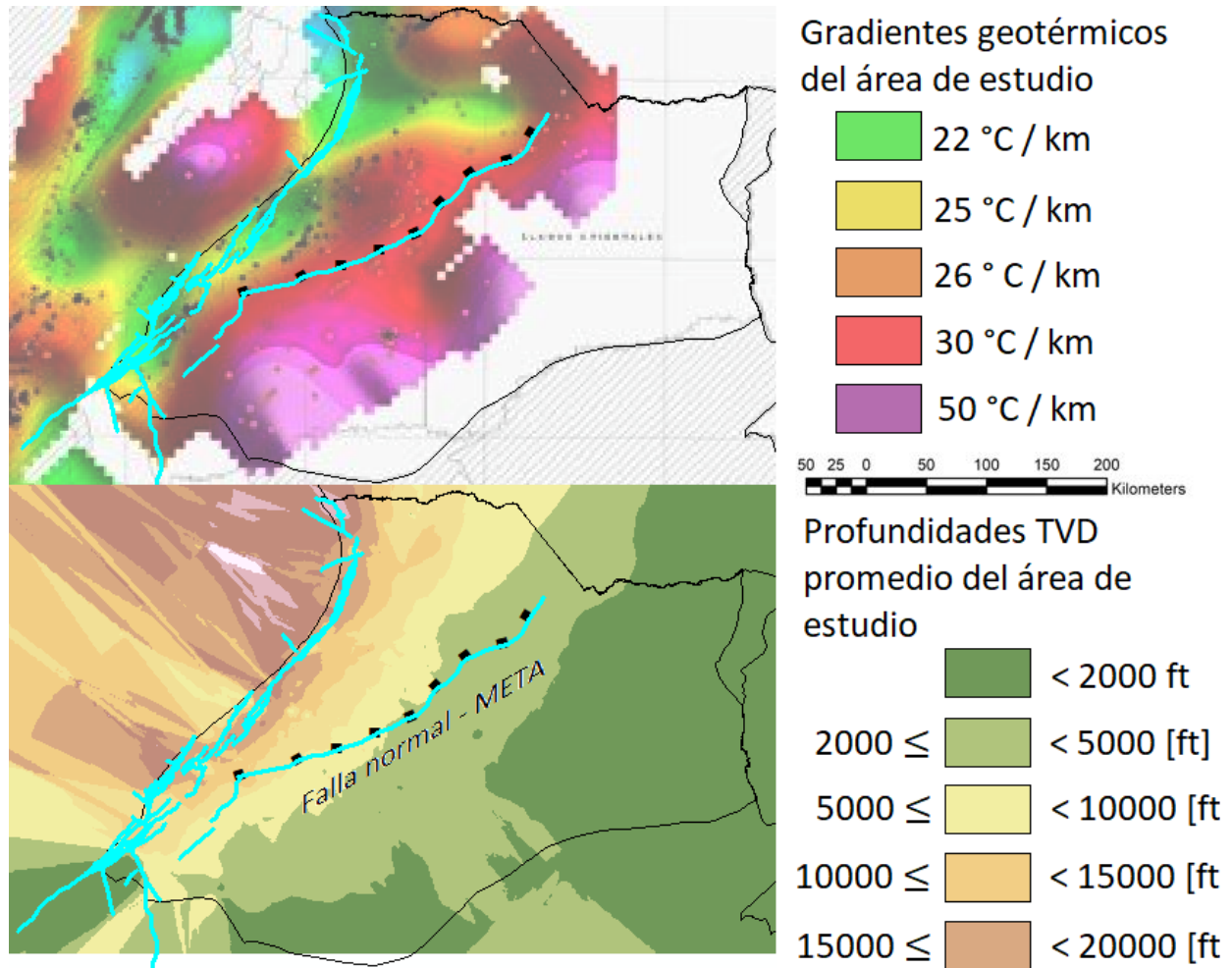
*Método Kriging: modelo gaussiano*



### **7.3 Análisis de la Relación de la Profundidad con el Gradiente Geotérmico, Comparativa del Mapa de la ANH y de los Mapas Modelados con Kriging.**

En esta fase se realizaron las comparaciones del apartado anterior. Donde se analizó la relación entre los gradientes geotérmicos (Mapa Preliminar presentado por la ANH) y la profundidad TVD (para ello se optó por el modelo lineal de la interpolación por el método Kriging). La Figura 43 muestra el mapa de los gradientes geotérmicos en el recuadro superior y en el recuadro inferior el modelamiento lineal.

Es importante señalar que, en un contexto normal para una cuenca de antepaís como los Llanos Orientales, el gradiente geotérmico aumenta en relación directa a la carga litostática. Por tanto, la temperatura aumenta con la profundidad siguiendo una progresión de  $3^{\circ}\text{C}$  cada 100 metros de profundidad. Sin embargo, en el área de estudio de este proyecto ocurre lo contrario. Cuanto más profundo es el pozo, más bajo es el gradiente, y cuanto menos profundo es el pozo, se encontraron gradientes más altos.

**Figura 43***Gradiente geotérmico vs Profundidad de la cuenca de los Llanos Orientales*

En la Figura 43 se observa como la relación profundidad vs gradiente geotérmico es inversa, además se observa lo siguiente:

- En el recuadro superior se observa que en el Piedemonte Llanero los valores del gradiente geotérmico son bajos, por esta razón el color verde, mientras que en el recuadro inferior el Piedemonte Llanero presenta una coloración café rojiza, que hace referencia a una mayor profundidad TVD de los pozos de la cuenca de los Llanos Orientales.

- Revisando la falla normal del Meta, se observa que en el recuadro superior los valores del gradiente geotérmico es de color rojo y morado lo que significa valores altos, y en el cuadro inferior se observa que, en la misma zona de la falla del Meta, la coloración es principalmente verde que hace referencia a pozos someros con valores pequeños de TVD.

Para entender mejor esto:

- Se debe conocer cómo se comporta el gradiente geotérmico con respecto al modelamiento de la profundidad en el modelo lineal. Entonces para realizar la siguiente tabla, se debe tener en cuenta el valor normal del gradiente geotérmico con respecto a la profundidad, y se deben cambiar las unidades de las profundidades TVD, esto para mantener el mismo sistema de unidades entre profundidad y gradientes geotérmicos.

### **Ecuación 3**

*Ecuaciones para calcular la temperatura esperada a condiciones normales.*

$$\text{Gradiente geotérmico [condiciones normales]} = \pm 25^{\circ}\text{C/km}$$

$$1 \text{ ft} = 0,0003048 \text{ Km}$$

$$\text{Temperatura esperada } [^{\circ}\text{C}] = \text{profundidad pozo} * \text{gradiente geotérmico}$$

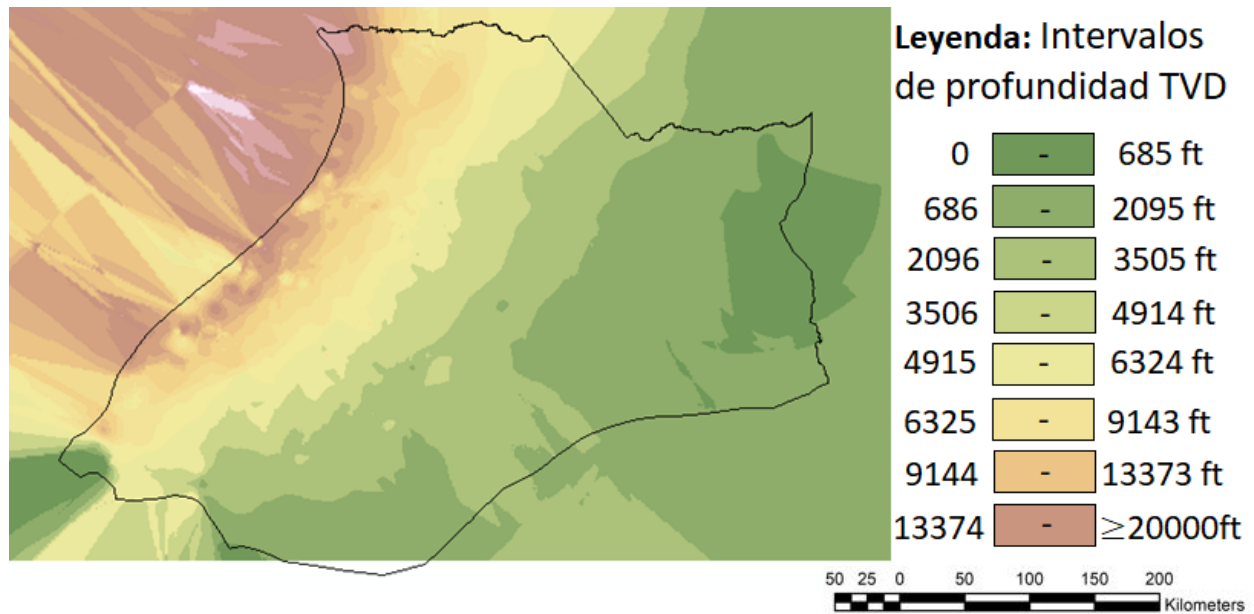
**Tabla 2***Temperaturas esperadas a condiciones normales*

<b>Profundidad promedio TVD [ft]</b>	<b>Profundidad promedio TVD [km]</b>	<b>Temperatura esperada a condiciones normales [°C]</b>
2000	0.6096	≈ 15
3500	1.0668	≈ 27
7500	2.286	≈ 57
12500	3.81	≈ 95
17500	5.334	≈ 133

- Se revisa de manera más detallada el gradiente geotérmico con respecto a la profundidad TVD, para eso se trabajó en el modelamiento lineal de la interpolación Kriging en el software ArcGIS, donde inicialmente se aumentó la cantidad de intervalos entre profundidades, esto con el objetivo de tener un mayor detallado de las distintas zonas de la cuenca de los Llanos Orientales, como lo muestra la siguiente figura:

**Figura 44**

*Modelo lineal, con mayor número de intervalos con respecto a las distintas profundidades TVD en el área de estudio*



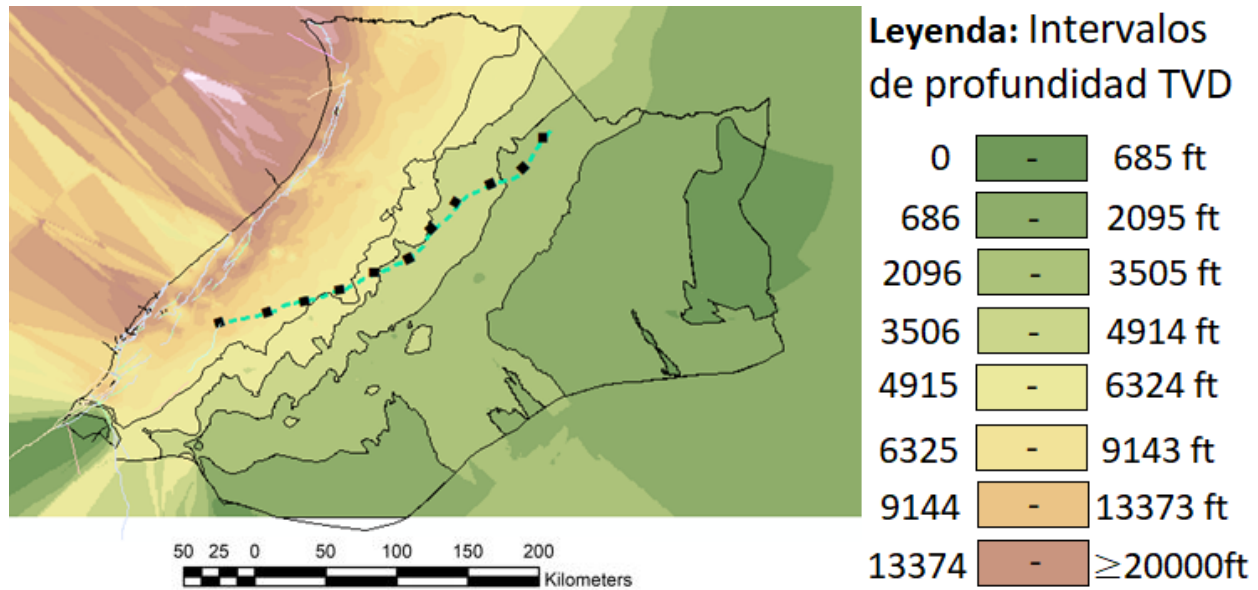
*Nota.* se puede observar cómo aparecen más tonalidades con respecto al modelo lineal de la Figura 41.

- Se crea una nueva capa en ArcGIS y usando la herramienta “*create features*” se procedió a crear polígonos para delimitar las áreas que contienen color verde en la Figura 44, estas áreas corresponden a las zonas con profundidades más someras, esto con el objetivo de estudiar de manera más detallada el comportamiento del gradiente geotérmico. Se delimitaron teniendo como referencia la tonalidad del color verde, la cual hace referencia a la profundidad TVD del área. Luego de realizar este paso, se obtuvo como resultado la Figura 45, en la cual las zonas con posible anomalía se encuentran delimitadas por polígonos independientes, donde además también aparece

el sistema de fallas de Guaicaramo en el Piedemonte Llanero y la falla del Meta que está representada de color azul y tiene cuadros negros que indican su inclinación.

**Figura 45**

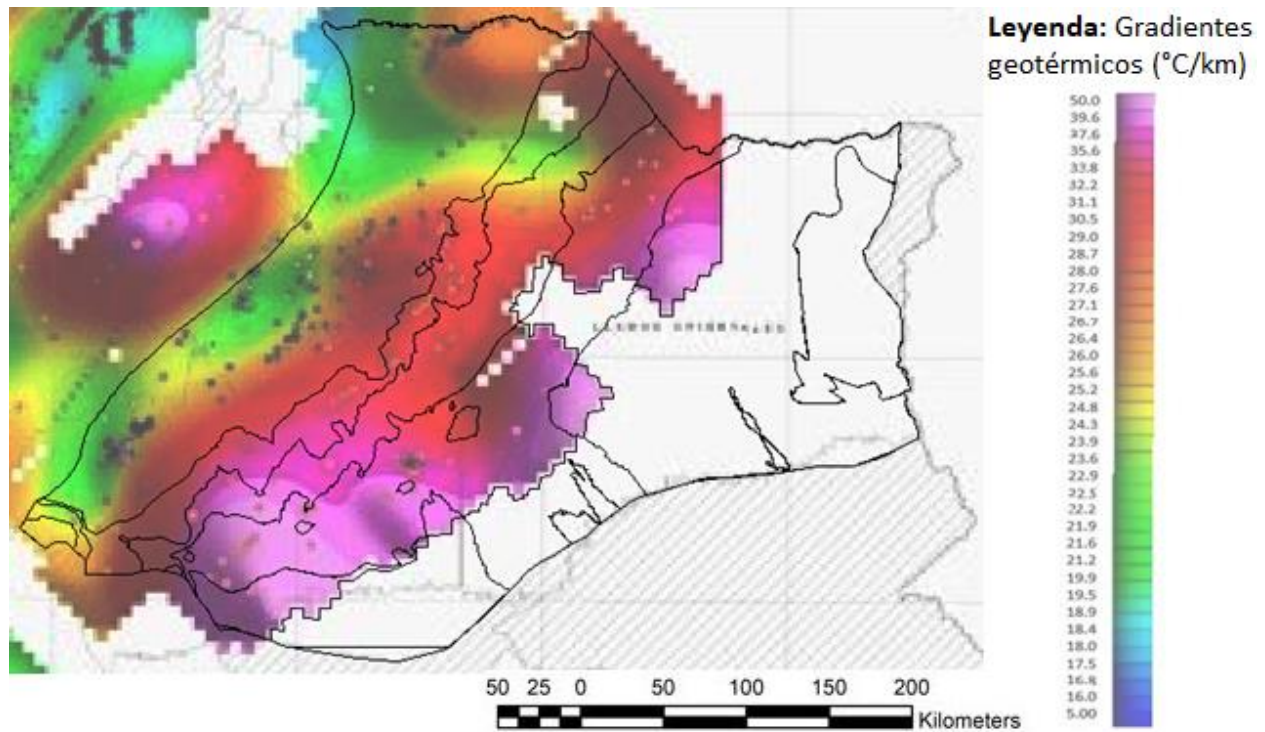
*Delimitación de las áreas con profundidad somera*



- Una vez delimitadas las áreas con respecto a las profundidades, se procedió a delimitar nuevamente estas áreas, pero ahora teniendo en cuenta los gradientes geotérmicos reportados en estas áreas, como lo muestra la Figura 46.

**Figura 46**

*Delimitación de áreas de la Figura 45, teniendo en cuenta los gradientes geotérmicos reportados en la zona*

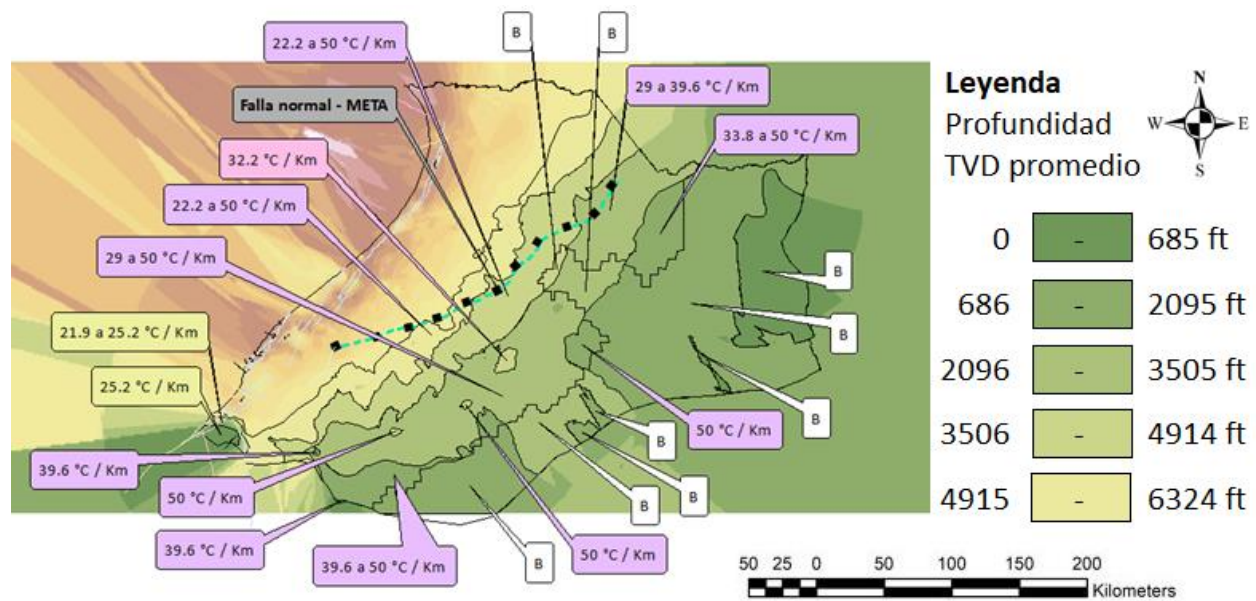


### 8. Discusión

Los resultados del modelamiento numerico de las profundidades de pozo demuestran una tendencia de pozos más someros al este de la cuenca de los Llanos Orientales. Esta tendencia muestra estar alineada con el comportamiento de los gradientes geotérmicos en la cuenca, los cuales pasan de valores entre 20°-30°C/km en el Oeste a 40°-50°C/km al Este, tal como muestra la Figura 47.

**Figura 47**

*Delimitación de áreas anómalas de la cuenca Llanos Orientales*



Estos resultados sugieren un comportamiento irregular del gradiente geotérmico. Para una cuenca sedimentaria de antepaís como los Llanos Orientales, se espera que los gradientes geotérmicos más altos sean asociados a los pozos más profundos porque la carga litostática es mayor. Sin embargo, el análisis de la relación profundidad – gradiente geotérmico indica una

relación inversa. Altos gradientes geotérmicos asociados a zonas más someras y viceversa, Figura 47.

Este análisis divide la cuenca en dos zonas. El Oeste, donde los pozos alcanzaron puntos más profundos pero el gradiente geotérmico está entre  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$  C/km, y el Este, con pozos más someros y gradientes geotérmicos de hasta  $50^{\circ}$ C/km. Estas zonas se muestran estar separadas por la falla normal del Meta, Figura 47. Esto concuerda con López-Ramos et al. (2022), quienes demostraron que los pozos en el piedemonte llanero se requieren más de 3km para alcanzar los  $100^{\circ}$ C. Mientras que al sureste de la falla del Meta esta temperatura se alcanza a profundidades menores de 2 Km.

Para entender mejor esta relación se buscó un caso análogo. Renaud (2020), demuestra que hay un sistema similar en la cuenca sedimentaria del Oeste de Canadá (Western Canada Sedimentary Basin, WCSB). La WCSB también es una cuenca de antepaís con una rica historia de exploración y producción de hidrocarburos que hoy día alberga varios yacimientos geotérmicos potenciales de baja entalpía con una capacidad de energía térmica total estimada de  $\sim 6100$  MWt para un período de producción de 30 años (Banks & Harris, 2018). Uno de esos yacimientos es el campo Clarke Lake, un prolífico, pero ahora agotado productor de gas natural.

El yacimiento en el campo Clarke Lake está alojado dentro de la Formación Slave Point, que está compuesta de sedimentos de carbonato alterados hidrotermalmente con una porosidad secundaria significativa y una mayor permeabilidad a partir de la recristalización, el reemplazo y la disolución de la piedra caliza huésped. En dicho estudio mencionan que, Weides y Majorowicz (2014) mapearon el flujo de calor ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) y el gradiente geotérmico ( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ) en toda la cuenca sedimentaria del Oeste de Canadá para ubicar posibles depósitos geotérmicos que cumplan con el requisito de temperatura. Encontraron un gradiente geotérmico de 50 a  $55^{\circ}$  C/km en el campo del

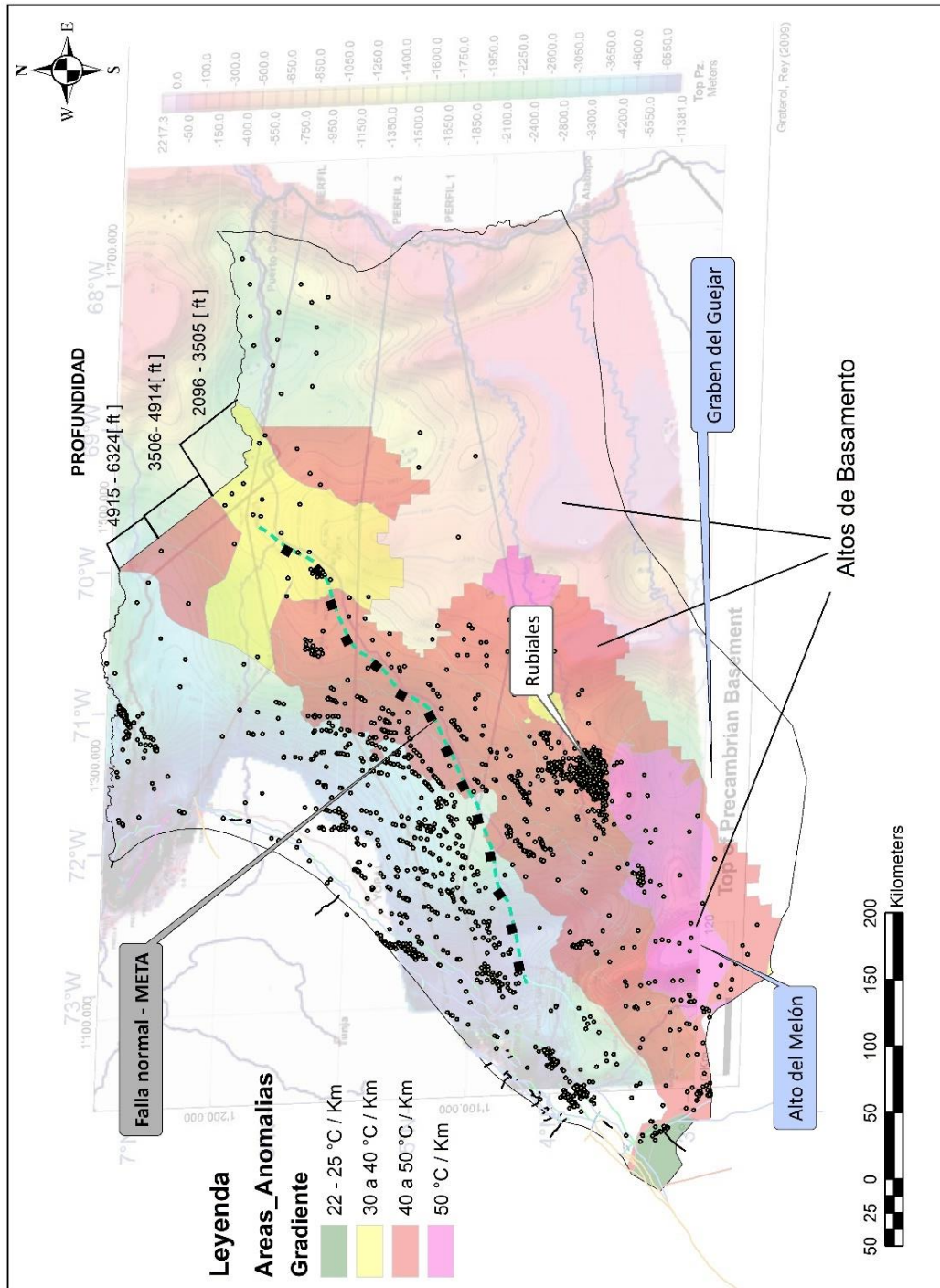


Los datos permiten establecer que las zonas de mayores gradientes geotérmicos ( $50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), están asociados con altos de basamento, Figura 49. Esta zona en general aparenta recibir flujo de calor asociada al decaimiento del basamento en el Graben de Guejar y el Alto el Melón. Por esta razón, en áreas como el campo Rubiales, la isoterma de  $100^{\circ}\text{C}$  se alcanza a  $\pm 2\text{Km}$  de profundidad. Aunque este análisis no alcanza la zona del Graben del Guejar, ya que no hay datos en esta área, se infiere que el comportamiento de altos gradientes se puede extender hasta esta zona.

Finalmente, este estudio sugiere hacer un modelamiento numérico similar al realizado por Renaud (2020) en la WCSB en las zonas de mayor flujo de calor. A diferencia de las áreas ya propuestas por López-Ramos et al. (2022), que se encuentran hacia Villavicencio, se proponen en este proyecto zonas de interés geotérmico cerca del Graben del Guejar y el Alto del Melón, donde la cercanía del basamento a superficie evidencia una zona de mayor flujo de calor. Probablemente, este flujo esté producido por el decaimiento de los Isótopos inestables que componen dicho basamento. Por ende, se sugiere también realizar un modelamiento 3D del basamento siguiendo interpretaciones sísmicas en líneas 2D y cubos 3D, incluyendo interpretaciones gravimétricas del mismo. Asimismo, se sugiere hacer un modelo hidrogeológico dinámico de las aguas subterráneas y las zonas de recarga en las áreas de interés. Para identificar los corredores de aguas del subsuelo y evaluar sus temperaturas.

**Figura 49**

*Áreas anómalas asociadas al basamento de la cuenca de los Llanos Orientales*



### Conclusiones

Los resultados del modelamiento numérico de las profundidades de pozo demuestran una tendencia de pozos más someros al este de la cuenca de los Llanos Orientales, es decir la parte más alta de la estructura se encuentra al este de la cuenca. Esta tendencia parece estar alineada con el comportamiento de los gradientes geotérmicos en la cuenca, los cuales pasan de valores entre 20°-30°C/km en el Oeste a 40°-50°C/km al Este.

La relación profundidad – gradiente geotérmico indica una relación inversa, con un comportamiento irregular del gradiente geotérmico. Se espera que para una cuenca sedimentaria de antepaís como la cuenca de los Llanos Orientales los gradientes geotérmicos más altos sean asociados a los pozos más profundo esto porque la carga litostática es mayor. Sin embargo, los gradientes geotérmicos más altos están asociados a las zonas con profundidad más somera y viceversa.

Las anomalías geotérmicas encontradas en la cuenca (50 °C/km), están asociadas con los altos estructurales del basamento. En general esta zona parece recibir flujo de calor asociado al decaimiento radioactivo del basamento en el Graben de Guejar y el Alto el Melón.

Se compararon los resultados de este proyecto con el caso análogo de la cuenca sedimentaria del Oeste de Canadá, WCSB, la cual también es una cuenca de antepaís donde se encontraron gradientes geotérmicos de 50 a 55 °C/km que corresponden a temperaturas de 110 a 123°C. En el que concluyen que el gradiente geotérmico está dominado por un basamento

inestable, donde los isotopos menos inestables a más inestables terminan creando las anomalías térmicas.

Se sugiere hacer un modelamiento numérico similar al realizado en la WCSB en las zonas de mayor flujo de calor. A diferencia de las áreas que se encuentran hacia Villavicencio, se propone zonas de interés geotérmico cerca del Graben del Guejar y el Alto del Melón, donde la cercanía del basamento a la superficie evidencia una zona de mayor flujo de calor.

### Referencias Bibliográficas

- AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, ANH. (2012). Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos, Cuenca Llanos Orientales
- ALFARO, C., ALVARADO, I., QUINTERO, W., VARGAS, C., Y BRICEÑO, L.A. (2009) Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS & Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH.
- BACHU, S., RAMON, J., VILLEGAS, M., AND UNDERSCHULTZ, J. (1995). Geothermal regime and thermal history of the Llanos Basin, Colombia. AAPG Bulletin, 79 (1), p. 116 – 129.
- BANKS, J., AND HARRIS, N. B. (2018). Geothermal potential of Foreland Basins: a case study from the Western Canadian Sedimentary Basin. Geothermics, 76, 74-92
- BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C., Y MARTÍNEZ, J. (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Bogotá, Colombia: Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH.
- BAYONA, G., CARDONA, A., JARAMILLO, C., MORA, A., MONTÉS, C., CABALLERO, V., MAHECHA, H., LAMUS, F., MONTENEGRO, O., JIMÉNEZ G., MESA, A., Y VALENCIA, V. (2013). Inicio de reactivación de fallas en la Cordillera Oriental de Colombia y cuenca proximal de los Llanos; respuesta a la convergencia Caribe-América del Sur a principios del Paleógeno. Sociedad Geológica, Londres, Publicaciones especiales, v377(1), p. 285-314. Doi:10.1144/SP377.5.

- BONNET, C., MALAVIEILLE, J., AND MOSAR, J. Interactions between tectonics, erosion, and sedimentation during the recent evolution of the Alpine orogen: Analogue modeling insights. *Tectonics*, v26. Doi:10.1029/2006TC002048.
- BURROUGH, P. A. (1986). Principles of geographical information systems for land resources assessment. *Geocarto International*. v1(3), p. 54. Doi: 10.1080/10106048609354060.
- CARVAJAL-TORRES, J.S. (2014). Interacción mecánica y tectónica activa entre las fallas de Cusiana y Yopal interpretando sísmica y geometría de terrazas. Bucaramanga, Colombia: [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].
- CARVAJAL-TORRES, J.S. (2021). The Role of Tectonism in the Development of Stratigraphic Surfaces in the Colombian Llanos Foreland Basin. Edmonton, Canada: [Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta].
- CLAUSTER, C. (2009). Heat Transport Processes in the Earth's Crust. *Surveys in Geophysics*, v30, p.163-191.
- COOPER, M., ADDISON, F., ÁLVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTÍNEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A., AND TABORDA, A. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v79(10), p. 1421-1442.
- COVIELLO, M. (1998). Financiamiento y regulación de las fuentes de energía nuevas y renovables: el caso de la geotermia. Santiago de Chile: División de Medio Ambiente y Desarrollo 13, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL.
- DUFF, D. AND HOLMES, A. W. (2004). Holmes' Principles of Physical Geology, v4, p. 832.

- ECOPETROL Y BEICIP. (1995). Cuenca de los Llanos Orientales. Santafé de Bogotá, Colombia: Estudio geológico regional, p. 198.
- ESRI, Software de representación cartográfica SIG, análisis de datos espaciales y plataforma de ubicación. (2020). ArcGIS Desktop, Resources for Arcmap. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>
- ESRI, Software de representación cartográfica, SIG. (1999). ArcGIS (Versión 10.4.1). Microsoft Windows. Estados Unidos.
- FACTORENERGÍA. (2020). Factor energía. Energías renovables: características, tipos y nuevos retos. <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>
- FARIETTA, K. (2013). Políticas públicas en Colombia de generación distribuida en nuevas fuentes energéticas: el caso de la geotermia y las zonas no interconectadas. *Revista Vía Inveniendi et iudicandi*, v8(2). Doi: 10.15332/s1909-0528.2013.0002.07
- GIL, E. (2015). *Dejadme Vivir. Geología, Paleontología, Ecología, Educación*. <http://dejadmevivir.blogspot.com/2015/04/apuntes-de-geotermia-algunos-conceptos.html#>
- GISGEOGRAPHY. (2016). *GIS Analysis. Semi-Variogram. Nugget, Range y Sill*. <https://gisgeography.com/semi-variogram-nugget-range-sill/>
- GRATEROL, V., Y REY, C. (2009). Mediciones Aerogravimétricas y Aeromagnéticas en los Llanos Orientales de Colombia.
- HEINE, G. W. (1986). A Controlled Study of Some Two-Dimensional Interpolation Methods. *COGS Computer Contributions*, v2, p. 60–72.

- HERMESTON, S., AND NEMCOK, M. (2013). Thick-skin orogen – foreland interactions and their controlling factors, Northern Andes of Colombia. Geological Society, London, Special Publications Online First, v377(1), p. 443-471. Doi: 10.1144/SP377.16.
- HUBACH, E. (1957). Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. Bogotá, Colombia: Servicio geológico regional.
- JIMÉNEZ, L., MORA, A., CASALLAS, W., SILVA A., TESÓN, E., TAMARA, J., NAMSON, J., HIGUERA-DÍAZ, I. C., LASSO, A., AND STOCKLI, D. (2013). Segmentation and growth of foothill thrust-belts adjacent to inverted grabens: the case of the Colombian Llanos foothills. Geological Society London, Special Publications, Online First, v377(1), p. 189-220. Doi:10.1144/SP377.11.
- JONES, F., AND MAJOROWICZ, J. (1987). Regional trends in radiogenic heat generation in the Precambrian basement of the Western Canadian Basin. *Geophys. Res. Lett*, 14, p. 268–271.
- LAM, H., AND JONES, F. (1984). Geothermal gradients of Alberta in western Canada. *Geothermics*, 13, p. 181–192.
- LLOPIS, G., Y RODRIGO, V. (2008). Guía de la energía geotérmica. Madrid, España: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- LÓPEZ, E., GONZÁLES, F., PATIÑO, C., Y LÓPEZ, A. (2022). Evaluación de recursos geotérmicos de baja-media entalpía en reservorios profundos de la cuenca de los Llanos Orientales. Bucaramanga, Colombia: Ecopetrol. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, v12(1), p. 13-44. Doi:10.29047/01225383.380.
- LOZANO, E., Y ZAMORA, N. (2014). Compilación de la cuenca de los Llanos Orientales. Bogotá, Colombia. Servicio Geológico Colombiano.

- MAJOROWICZ, J.A., GARVEN, G., JESSOP, A., AND JESSOP, C. (1999). Present heat flow along a profile across the Western Canada Sedimentary Basin: The extent of hydrodynamic influence. In *Geothermics in Basin Analysis*; Springer: Heidelberg, Germany, p. 61–79.
- MALAVIEILLE, J. (2010). Impact of erosion, sedimentation, and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges: Analog models and case studies. *GSA Today*, v20(1), p. 4-10. Doi:10.1130/GSATG48A.1.
- MARTÍNEZ, J. (2006). Structural evolution of the Llanos foothills, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, v21(4), p. 510-520. Doi: 10.1016/j.jsames.2006.07.010.
- MARZOLF, N. (2014). *Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo, BID & ISAGEN.
- MCBRATNEY, A., AND WEBSTER, R. (1986). Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, v37(4), p. 617–639. Doi: 10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x
- MONTENEGRO, F., Y ORTIZ, A. (2021). *La Geotermia, Fuente de Energía Alternativa para el Departamento de Nariño; Potencialidad, Usos y Beneficios*. Pasto, Colombia: Colección Resultado de Investigación.
- MORA, A., Y PARRA, M. (2008). El estilo estructural de los atajos de la pared de piso a lo largo de las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental de Colombia. Diferencias con otras estructuras relacionadas con la inversión. *Revista Ciencia Tecnología & Futuro*, v3(4), p. 7-21.
- MORA, A., HORTON, B., MESA, A., RUBIANO, J., KETCHAM, R., PARRA, M., BLANCO, V., GARCIA, D., AND STOCKLI, D. (2010). Migration of Cenozoic deformation in the

- Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v94(10), p. 1543-1580. Doi: 10.1306/01051009111.
- MORA, A., PARRA, M., STRECKER, M., KAMMER, A., DIMATÉ, C., AND RODRIGUEZ, F. (2006). Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, v25(2). Doi:10.1029/2005TC001854.
- OLIVER, M., AND WEBSTER, R. (1990). Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems*, v4(3), p. 313–332. Doi: 10.1080/02693799008941549.
- PRESS, W., TEUKOLSKY, S., VETTERLING, W., AND FLANNERY, B. (1988). *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. New York: Cambridge University Press.
- RACEFN. (2010). Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. *Glosario de Geología*. [https://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac\\_geologia/rac.htm](https://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm)
- RENAUD, E. (2020). Characterization of the Geothermal Resource at Clarke Lake Field Northeast British Columbia. Edmonton, Canada: [Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta].
- REYES-HARKER, A., RUIZ-VALDIVIESO, C., MORA, A., RAMÍREZ-ARIAS, J., RODRÍGUEZ, G., PARRA, F., CABALLERO, V., PARRA, M., MORENO, N., HORTON, B., SAYLOR, J., SILVA, A., VALENCIA, V., STOCKLI, D., AND BLANCO, V. (2015). Hyperspectral imaging for the determination of bitumen content in Athabasca oil sands core samples. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v99(8), p. 1407-1453. Doi: 10.1306/06181411110.

- ROYLE, A., CLAUSEN, F., AND FREDERIKSEN, P. (1981). Practical Universal Kriging and Automatic Contouring. *Geoprocessing*, v1, p. 377–394.
- SARMIENTO, G. (1992). Estratigrafía y medios de depósito de la formación Guaduas. Bogotá, Colombia: *Boletín Geológico, Servicio Geológico Colombiano*, v32(1-3).
- SARMIENTO, L. (2011). Cuenca de los Llanos Orientales. Medellín, Colombia: Departamento de Geología, ANH-Universidad EAFIT, v9, p. 184.
- SARMIENTO-ROJAS, L. (2001). Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, Inferences from tectonic models. Bogotá, Colombia: ECOPETROL-Netherlands Research, School of Sedimentary Geology, p. 295.
- SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (1916). Banco de Información Petrolera. EPIS (Exploration and Production Information Service).
- TARBUCK, E., AND LUTGENS, F. (2001). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*. Madrid, España. Prentice Hall, v6.
- TESÓN, E., MORA, A., SILVA, A., NAMSON, J., TEIXELL, A., CASTELLANOS, J., CASALLAS, W., JULIVERTH, M., TAYLOR, M., IBÁÑEZ-MEJÍA, M., AND VALENCIA, V. (2013). Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Geological Society, London, Special Publications*, v377(1), p. 257-283. Doi: 10.1144/SP377.10.
- ULLOA, C., Y RODRÍGUEZ, E. (1976). *Geología del Cuadrángulo K13-Tauramena*. Bogotá, Colombia: INGEOMINAS, *Boletín Geológico*, v22.

VAN DER HAMMEM. (1960). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano con continentales y tectogénesis de los Andes colombianos. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Nacional, Informe 1279.

WEIDES, S., AND MAJOROWICZ, J. (2014). Implications of Spatial Variability in Heat Flow for Geothermal Resource Evaluation in Large Foreland Basins: The Case of the Western Canada Sedimentary Basin. *Energies* v7(4), p. 2573-2594. Doi: 10.3390/en7042573.