

Análisis de iluminación basado en el campo de onda sísmico para una sección estructural compleja localizada en la Cuenca del Valle Superior del Magdalena

Patricia Chajín Ortiz

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Magíster en Geología

Director

Edwar Hernando Herrera Otero

M. Cs. Geólogo

Codirector

Germán Darío Camacho Almeyda

M. Cs. Geofísico

Universidad Industrial de Santander

Facultad Físico-química

Maestría en Geología

Bucaramanga

2020

## **Agradecimientos**

Esta tesis sólo fue posible gracias a la colaboración de varias personas:

Edwar Herrera Otero y Germán Camacho por su dirección, apoyo, experiencia y conocimientos para la elaboración de este trabajo de investigación.

Herling González Álvarez y Jorge Eduardo Pinto Valderrama, por sus sugerencias y orientación al momento de evaluarme.

Heber Julián Bueno Plata por su orientación y guía en la interpretación sísmica y David Gutiérrez Toledo por sus conocimientos y apoyo en la construcción de los modelos de velocidades.

María Teresa Duarte Castro y William Mauricio Agudelo, por compartirme sus conocimientos y experiencia.

## **Dedicatoria**

Como el ciervo brama por las corrientes de las aguas, así clama por ti ¡Oh Dios! el alma mía... Salmo 42:1

A mis hijos Abraham y Abigaíl, vidas de mi vida, por todos los juegos, películas y demás que me perdí mientras escribí este libro. A Rubiel Ordóñez, por todos los años de impulso. A mis papás, mi Doña y mi Viejo Chajín, por sus oraciones, sancochos, regaños, sátiras y al final, por su amor de madre y padre. A mis hermanos: Lorena, por recordarme que las noches de insomnio en cuarentena son mejores con cerveza; Verónica, Roberto y José Manuel, por su presencia desde lo lejos.

A esos amigos que con su apoyo, ejemplo y cantaleta me animaron por este tiempo. En especial, a Cata Niño, a Chanita, a Nata García y a Eli Cáceres.

## Tabla de contenido

Introducción .....	8
1. Objetivos .....	10
1.1 Objetivo general.....	10
1.2 Objetivos específicos .....	10
2. Pertinencia de la investigación.....	11
2.1 Antecedentes .....	12
2.2 Localización del Área de estudio.....	15
3. Marco geológico .....	17
3.1 Configuración estructural del área de estudio.....	17
3.2 Estratigrafía del área de estudio.....	19
4. Marco teórico .....	25
4.1 Modelo de velocidad.....	25
4.2 Barrido rápido ( <i>Fast sweeping</i> ) para construcción de modelos de velocidad .....	25
4.3 Campo de ondas adjunto.....	26
4.4 Principio de reciprocidad fuente-receptor.....	26
4.5 Iluminación por número de onda.....	27
4.6 Iluminación por campo de onda.....	30
5. Marco metodológico .....	31
6. Resultados de la Investigación.....	35
6.1 Interpretación sísmica .....	35
6.1.1 Modelo geológico 1 .....	35
6.1.2 Modelo geológico 2 .....	36
6.2 Modelos geofísicos .....	37
6.2.1 Modelo geofísico 1 .....	37
6.2.2 Modelo geofísico 2 .....	38
6.3 Simulación de adquisición para iluminación por campo de onda.....	39
7.Conclusiones .....	43
Bibliografía .....	46

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Modelo geológico general propuesto para una transecta en la CVSM. ....	12
Figura 2. Localización del área de estudio.....	16
Figura 3. Mapa geológico generalizado de la CVSM.....	17
Figura 4. Corte geológico A-A' .....	19
Figura 5. Columna estratigráfica del VSM .....	22
Figura 6. Flujo de información para elaboración del modelo de velocidad.....	26
Figura 7. Trayectoria de iluminación del campo de onda. A) Campo de velocidad para un par fuente/receptor. B) Ilustración de la trayectoria de la iluminación del campo de onda.....	27
Figura 8. Esquema de iluminación usando el número de onda k.....	28
Figura 9. Esquema de iluminación para $\theta = 45^\circ$ .....	29
Figura 10. Esquema de iluminación para $\theta = 27^\circ$ . Distancia corta entre fuente-receptor.....	29
Figura 11. Esquema de iluminación para $\theta = 72^\circ$ . Distancia larga entre fuente-receptor.....	29
Figura 12. Trayectoria de iluminación del campo de onda. A) Campo de velocidad. B) Mayor número de onda k mayor definición en el offset cercano. C) Menor número de onda k mayor definición en el offset lejano.....	30
Figura 13. Metodología aplicada a la iluminación por campo de onda. ....	31
Figura 14. Velocidades definidas para cada uno de los modelos geológico-estructurales propuestos. Tomada y modificada de Aparicio, 2018. ....	33
Figura 15. Modelo geológico 1.....	36
Figura 16. Modelo geológico 2.....	37
Figura 17. Modelo geofísico 1 asociado al modelo geológico 1. ....	38
Figura 18. Modelo geofísico 2 asociado al modelo geológico 2. ....	39
Figura 19. Modelo simulado para el modelo geofísico 1.....	40
Figura 20. Modelo simulado para el modelo geofísico 2.....	41

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ILUMINACIÓN BASADO EN EL CAMPO DE ONDA SÍSMICO PARA UNA SECCIÓN ESTRUCTURAL COMPLEJA LOCALIZADA EN LA CUENCA DEL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA.\*

**AUTOR:** PATRICIA CHAJÍN ORTIZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** CAMPO DE ONDA, ILUMINACIÓN, MODELO GEOFÍSICO, VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA

### DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se desarrolla un ejercicio de análisis de iluminación basado en el campo de onda sísmico en la Cuenca del Valle Superior de Magdalena, donde existen zonas prospectivas para la exploración petrolera localizadas debajo de fallas inversas o cabalgamientos donde el método sísmico convencional ofrece imágenes de baja calidad, por tanto, los modelos geológicos interpretados tienen alta incertidumbre, que sumándose a las perforaciones fallidas reportadas por algunas compañías, representan un reto técnico a resolver.

En la metodología, se propone usar la interpretación sísmica de dos modelos geológicos-estructurales en profundidad para una misma transecta que corta los trazos de las fallas de Chusma y Upar, en los que se consideran los estilos estructurales definidos en la bibliografía para esta zona de la cuenca y la relación estratigráfica de las unidades rocosas presentes, para generar un modelo de velocidad para cada uno de los modelos geológicos interpretados basados en información de pozos. Además, se realiza la construcción de un modelo geofísico, requerido como base para ajustar y correr las pruebas del modelado para iluminación por campo de onda, ejercicio con el que se pretende simular una adquisición sísmica donde se describan la mayoría de los caminos que toma la energía para entender los fenómenos que ocurren en las zonas debajo de las fallas de cabalgamiento interpretadas en los modelos geológicos que generan zonas iluminadas y zonas de sombra.

Así, se propicia la validación del modelo geológico que presenta un mejor ajuste para la transecta con el modelo geofísico construido dadas las condiciones de iluminación por campo de onda, de tal manera que las posibles zonas prospectivas debajo de las fallas inversas de Chusma y Upar, sean consideradas viables o no para continuar con el avance en la exploración y descubrimiento del potencial de hidrocarburos en esta zona de la cuenca.

---

\* Trabajo de Grado para Optar por el Título de Magíster en Geología.

\*\*Facultad Físico-química. Maestría en Geología. Director: Edwar Herrera Otero

## ABSTRACT

**TITLE:** ILLUMINATION ANALYSES BASED ON SEISMIC WAVEFIELD FOR A COMPLEX STRUCTURAL SECTION LOCATED IN UPPER MAGDALENA VALLEY BASIN\*

**AUTHOR:** PATRICIA CHAJÍN ORTIZ \*\*

**KEYWORDS:** GEOPHYSICAL MODEL, ILLUMINATION, UPPER MAGDALENA VALLEY BASIN, WAVEFIELD.

### DESCRIPTION:

An exercise of illumination analyses based on the seismic wavefield in Upper Magdalena Valley Basin, where there are prospective zones for petroleum exploration located in subthrust zones, where the reflection seismic method gives low quality images, which causes that interpreted geologic models shows high uncertainty and the report of unsuccessful cases of drilled wells by some petroleum companies, represents a technical challenge to solve.

The methodology, is to do the seismic interpretation for two geological models in depth for a same transect that intercept the Chusma and Upar faults in which is consider the structural styles defined in the books for this study area and the stratigraphic relationships between the rock units in order to generate a velocity model for each geological model using wells information. In addition, the construction of a geophysical model, required as a support to adjust and run the modeling tests for wavefield illumination. In addition, the construction of a geophysical model, required as a support to adjust and run the modeling tests for wavefield illumination. Is carried out an exercise which it is intended to simulate a 2D seismic acquisition where the most of the paths traveled by the energy are shown to describe the phenomena that occur in the subthrust areas interpreted in the geological models that produce illuminated zones and shadow zones.

Thus, the target is to validate the geological model, which presents a better fit in the transect simulated with the geophysical model constructed under the illumination conditions based on wavefield, in such a way that the possible prospective zones below the thrust faults "Chusma and Upar", whether considered viable in order to continue advancing in the exploration and discovery of the hydrocarbon potential in this area of the basin.

---

\* Master Thesis.

\*\*Facultad Físico-química. Master degree in Geology. Director: M.Sc. Edwar Herrera Otero

## Introducción

En la Cuenca del Valle Superior del Magdalena se han encontrado hidrocarburos con desde la década del sesenta. Sin embargo, se cree que aún existe un potencial no descubierto que ubica los prospectos en las zonas de estructuras complejas principalmente en las zonas *subthrust* que representan la localización de las posibles trampas subyacentes al basamento pre-cretácico.

Las estructuras *subthrust* representan alta incertidumbre para la exploración, ya que los modelos geológicos son interpretados utilizando las imágenes sísmicas, las cuáles muestran baja calidad, principalmente, en las áreas en donde se cree que se ubican estos prospectos. La baja calidad en ciertas áreas de las imágenes sísmicas en el área de estudio (norte de la subcuenca de Neiva), se atribuye a la baja o nula iluminación de los reflectores que se conoce como zonas de sombra de falla, que se pueden presentar según (Tucker, Yorston, & Hollister, 1973) por el efecto de las velocidades en las rocas, por la configuración estructural (en este caso prospectos *subthrust*) y por el procesamiento sísmico.

En la metodología, se propone usar la interpretación sísmica de dos modelos geológicos-estructurales en profundidad para una misma transecta que corta los trazos de las fallas de Chusma y Upar, en los que se consideran los estilos estructurales definidos en la bibliografía para esta zona de la cuenca y la relación estratigráfica de las unidades rocosas presentes, para generar un modelo de velocidad para cada uno de los modelos geológicos interpretados basados en información de pozos. Además, se realiza la construcción de un modelo geofísico, requerido como base para ajustar y correr las pruebas del modelado para iluminación por campo de onda, ejercicio con el que se pretende simular una adquisición sísmica donde se describan la mayoría de los caminos que

toma la energía para entender los fenómenos que ocurren en las zonas debajo de las fallas de inversas interpretadas en los modelos geológicos que generan zonas iluminadas y zonas de sombra.

Así, se valida el modelo geológico que presenta un mejor ajuste para la transecta con el modelo geofísico construido dadas las condiciones de iluminación por campo de onda, de tal manera, que las posibles zonas prospectivas debajo de las fallas inversas de Chusma y Upar, sean consideradas viables o no para continuar con el avance en la exploración y descubrimiento del potencial de hidrocarburos en esta zona de la cuenca.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Validar un modelo geológico y evaluar la iluminación de las estructuras presentes por el método de iluminación por campo de onda en una transecta localizada en la zona comprendida entre las fallas de Chusma y Upar en la Subcuenca de Neiva, Valle Superior del Magdalena.

### **1.2 Objetivos específicos**

Proponer dos modelos geológicos posibles que conserven las restricciones geológico-estructurales dadas por la cartografía de superficie e información del subsuelo disponible (sísmica y de pozos) en el área de estudio.

Elaborar el modelo geofísico para los modelos geológicos propuestos y aplicar el método de iluminación por campo de onda en cada uno de ellos para evaluar las zonas de mayor incertidumbre de acuerdo con las restricciones geológico-estructurales del área de estudio.

Validar cuál de los modelos geológicos propuestos corresponde con el mejor ajuste al modelo geofísico, dadas las interpretaciones geológicas y las condiciones de iluminación por campo de onda, en las posibles zonas prospectivas debajo de las fallas inversas de Chusma y Upar.

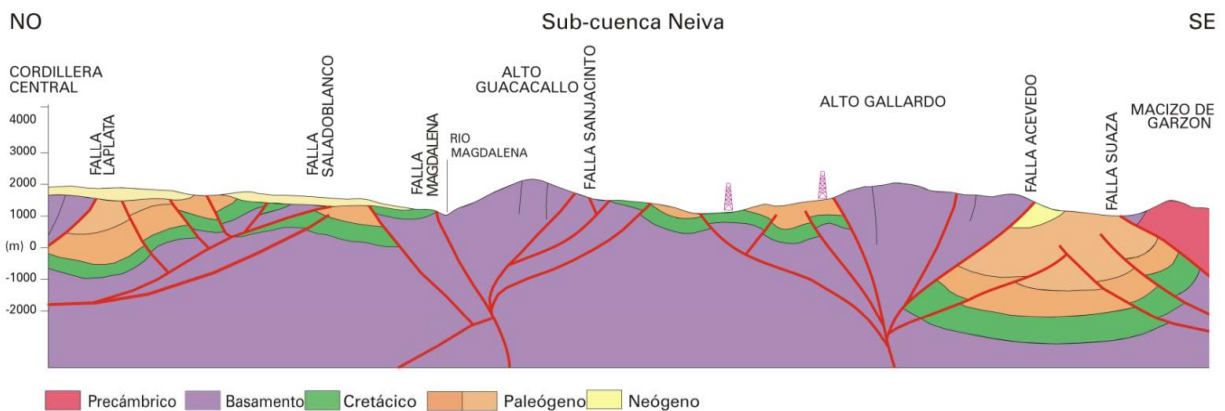
## 2. Pertinencia de la investigación

El potencial de hidrocarburos aún no descubierto de la Subcuenca de Neiva, en el área de estudio, en su mayoría se encuentra en los prospectos localizados debajo de las fallas inversas de Chusma y Upar; los cuales no son atractivos para la exploración petrolera debido a que la imagen sísmica en estas zonas, no muestra la mejor calidad para interpretarlas y generar modelos geológicos con baja incertidumbre, por lo que varios intentos exploratorios han resultado sin éxito. La incertidumbre en los modelos geológicos y los resultados obtenidos de perforaciones fallidas se basan en la definición de los reflectores de las imágenes sísmicas que incluyen errores en el mapeo de las estructuras geológicas, principalmente, en las zonas de geología estructural compleja que incluyen fallas inversas de altos ángulos como las fallas de Chusma y Upar. Esto lleva a que los modelos geológicos interpretados representen un reto técnico.

Los modelos interpretados del área de estudio, describen las características estructurales de las fallas de Chusma y Upar, y a su vez, describen la configuración estratigráfica de las rocas presentes en la secuencia, lo que propicia la validación de un modelo geológico interpretado con baja incertidumbre que muestre el mejor ajuste para que el objetivo de la exploración petrolera en la zona sea viable para nuevos descubrimientos.

Los modelos geológicos propuestos en el área de estudio, se basan en la interpretación de líneas sísmicas de diferentes programas de adquisición, nutrida con datos de campo de rumbo y buzamientos de las fallas principales e información disponible de pozos. La Figura 1 muestra un modelo geológico de transecta propuesta por (Mojica, 2010) , donde la interpretación geológica-estructural fue realizada sobre imágenes sísmicas y se observan los principales estilos estructurales de la Subcuenca de Neiva en la CVSM.

Figura 1. Modelo geológico general propuesto para una transecta en la CVSM. Tomado de (Mojica, 2010).



## 2.1 Antecedentes

La interpretación geológica-estructural en una imagen sísmica depende de la iluminación de los reflectores y la calidad de la imagen sísmica. (Tucker, Yorston, & Hollister, 1973); propusieron tres posibles situaciones en las que la imagen sísmica puede ser interpretada con errores: 1) el efecto de la velocidad, 2) el efecto causado por la geometría de las estructuras, y 3) el efecto causado por el procesamiento sísmico.

Según (Schneider & Winbow, 1999); la iluminación es la distribución de la amplitud migrada obtenida de un reflector, un campo de velocidad y una geometría de adquisición en el caso especial donde la reflectividad se mantiene constante.

(Hubral, Hoecht, & Jaeger, 1999) y (Schneider & Winbow, 1999); mostraron los primeros estudios de análisis de iluminación, los que fueron realizados por métodos de trazados de rayos, proveyendo información direccional de los rayos.

(De Freitas, 2000) sugiere que los resultados de la exploración sin éxito en los prospectos subthrust de la CVSM se atribuyen a los datos sísmicos, geológicos y datos generales de los pozos

perforados sugiere que se deben implementar estrategias para mejorar la rata de éxito, porque la geología estructural de la zona presenta dos tipos de fallas inversas o cabalgamientos con altos ángulos.

(Macellari, Amaral, Salel, & Osorio, 2003) sugirieron que en la CVSM existen importantes acumulaciones de hidrocarburos en estructuras subthrust subyacentes al basamento y que algunos intentos exploratorios del pasado no han sido exitosos. Sin embargo, reportaron los pozos La Hocha-1 e Iskana-1 como exitosos en este tipo de estructuras, pero en diferentes configuraciones estructurales de la Subcuenca de Neiva, y anotaron que hay un desafío técnico importante, para hallar la viabilidad económica de estas estructuras para la industria petrolera. Para su modelo geológico hicieron un modelo de velocidades robusto calculando las velocidades del basamento con información de un pozo estratigráfico piloto y utilizando información de estudios anteriores e información de velocidades de apilamiento de la sísmica.

Los análisis de iluminación sísmica empleando el campo de onda encontrados en la industria de los hidrocarburos, aparecieron como resultado de complementar los análisis de iluminación hechos por trazados de rayos imagen, así, (Lecomte, 2008) mostró que las imágenes sísmicas en profundidad requieren de un procesamiento ángulo dependiente, no obstante, la calidad de imagen que se espera, está sujeta a varios factores que son necesarios para mejorar el registro de las estructuras geológicas. También, reportó que la migración siempre incluye compensación para la propagación de las ondas en el *overburden*, antes de enfocarse en la energía reflejada/difractada en cada localización en profundidad de la imagen; por lo cual, lo ideal es recuperar la reflectividad de la tierra con mayor detalle para invertir los parámetros elásticos, pero

las ondas perciben la reflectividad de otra manera, viéndose estructuras borrosas e incompletas, dependiendo de la iluminación.

Mientras, (Xie & Yang, 2008), reportaron que el método basado en la ecuación de onda unidireccional, no tiene limitación de ángulo y la energía de reflexión/transmisión se puede calcular con precisión, sin embargo, tiene dificultades con las turning waves, que son cruciales para obtener imágenes de estructuras con altos buzamientos.

En (Mojica, 2010) la Agencia Nacional de Hidrocarburos en su ronda abierta, reportó para la CVSM en la Subcuenca de Neiva, que los objetivos exploratorios se asocian a fallas de cabalgamiento sumado a un potencial en trampas estratigráficas, usando interpretaciones de modelos geológicos sobre sísmica 2D adquirida en los años noventa.

(Yan & Xie, 2016), hablaron de que los métodos de ecuación de onda han sido usados para calcular la iluminación debido a que incluyen todos los fenómenos de propagación, generando información útil para corregir la imagen sísmica en zonas de geología estructural compleja.

(Aparicio, 2019) realizó una definición de los ángulos de buzamiento de las fallas inversas Chusma y Upar como de  $48^\circ$  y  $35^\circ$  respectivamente, en la CVSM donde estas fallas, ponen en contacto el basamento pre-Cretácico con la secuencia sedimentaria más joven configurando posibles trampas subthrust. También, reportó que no se dispone de muchos estudios donde la prospección geofísica es clave para definir con más certeza estructuras que involucran el basamento como parte del sistema petrolífero en la CVSM, señalando que en las imágenes obtenidas por el método geofísico tradicional (método sísmico) es difícil interpretar este tipo de estructuras.

(Chajín, Duarte, Beltrán, Díaz, & Agudelo, 2019) reportaron la influencia del modelo de velocidades en la posición y geometría de un prospecto localizado en una zona subthrust en la CVSM, basados en información de velocidades de pozos y velocidades del procesamiento de información sísmica, haciendo un análisis de sensibilidad en el modelo de velocidades para observar las afectaciones en los cambios laterales y verticales del prospecto respecto de las mismas, utilizando el método de trazado de rayos imagen.

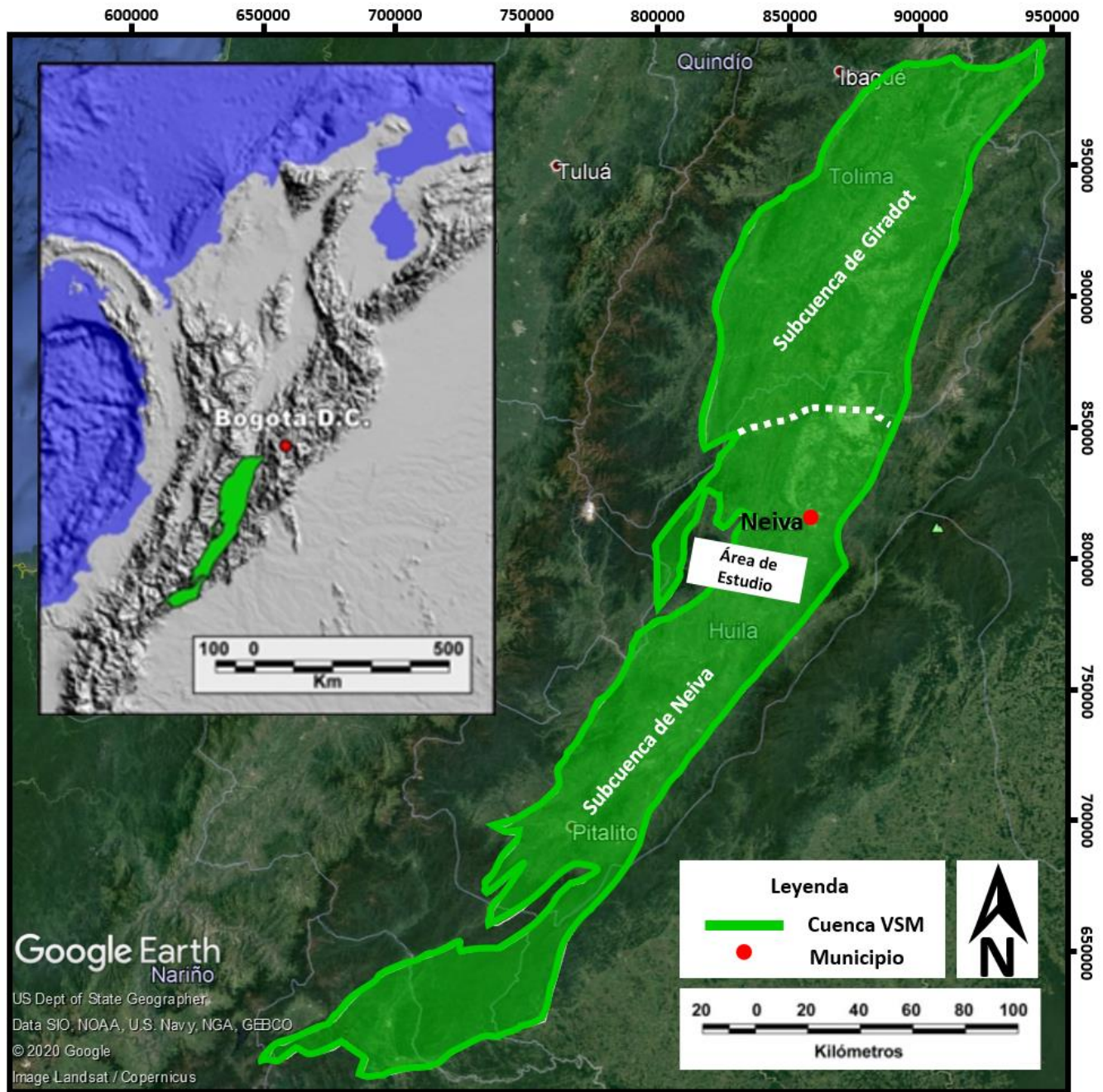
## **2.2 Localización del Área de estudio**

La Cuenca del Valle Superior del Magdalena (en adelante CVSM) se encuentra localizada geográficamente en el centro-sur de Colombia en el valle comprendido entre las cordilleras Central y Oriental, limitando al norte con la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) y al sur con la Cuenca Caguán-Putumayo. Su extensión abarca un área de 26.200 Km<sup>2</sup> (Kairuz, Ferreira,, & Solano, 2000) y SGC, 2014). Ver Figura 2.

El área de estudio se ubica en la extensión más sur de la CVSM en la Subcuenca de Neiva (Figura 2) sobre el borde oriental de la Cordillera Central. Se encuentra delimitada al Oeste por la falla inversa de Chusma en el borde de cuenca con la Cordillera Central que tiene vergencia al Este y pone en contacto al Batolito de Ibagué sobre las rocas del Cretácico y Paleógeno, mientras que, al Este la zona de estudio se delimita por la falla de Upar que es una falla de cabalgamiento que expone en superficie a la Formación Saldaña de edad pre-Cretácico y suprayace a las unidades cretácicas. Las fallas de Chusma y Upar presentan altos buzamientos y conforman una estructura de carácter compresivo donde las unidades cretácicas y paleógenas muestran un sistema

cabalgamiento - plegamiento que corresponde con los estilos estructurales descritos en toda la CVSM.

Figura 2. Localización del área de estudio. Modificado de (Google Earth, 2020) y (Carrera, 2015)

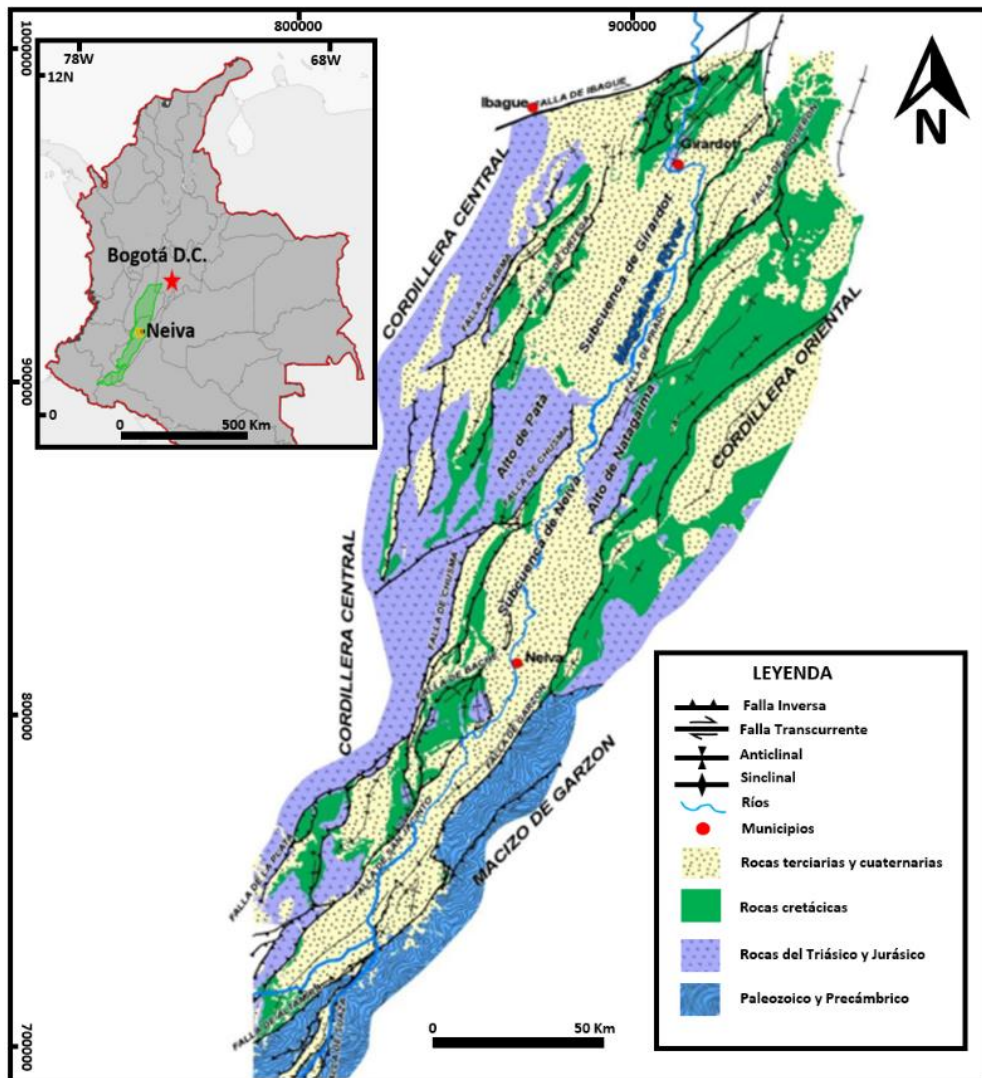


### 3. Marco geológico

#### 3.1 Configuración estructural del área de estudio

La CVSM se subdivide en dos subcuencas: la Subcuenca de Neiva al sur, y la Subcuenca de Girardot al norte, las cuales están separadas por el Arco de Natagaima – El Pata (Barrero, Pardo, Vargas, & Martínez, 2007) de edad Oligoceno (Mojica & Franco, 1990). Ver Figura 3.

Figura 3. Mapa geológico generalizado de la CVSM. Tomado y modificado de (Ramón & Rosero, 2006) en (Carrera, 2015).



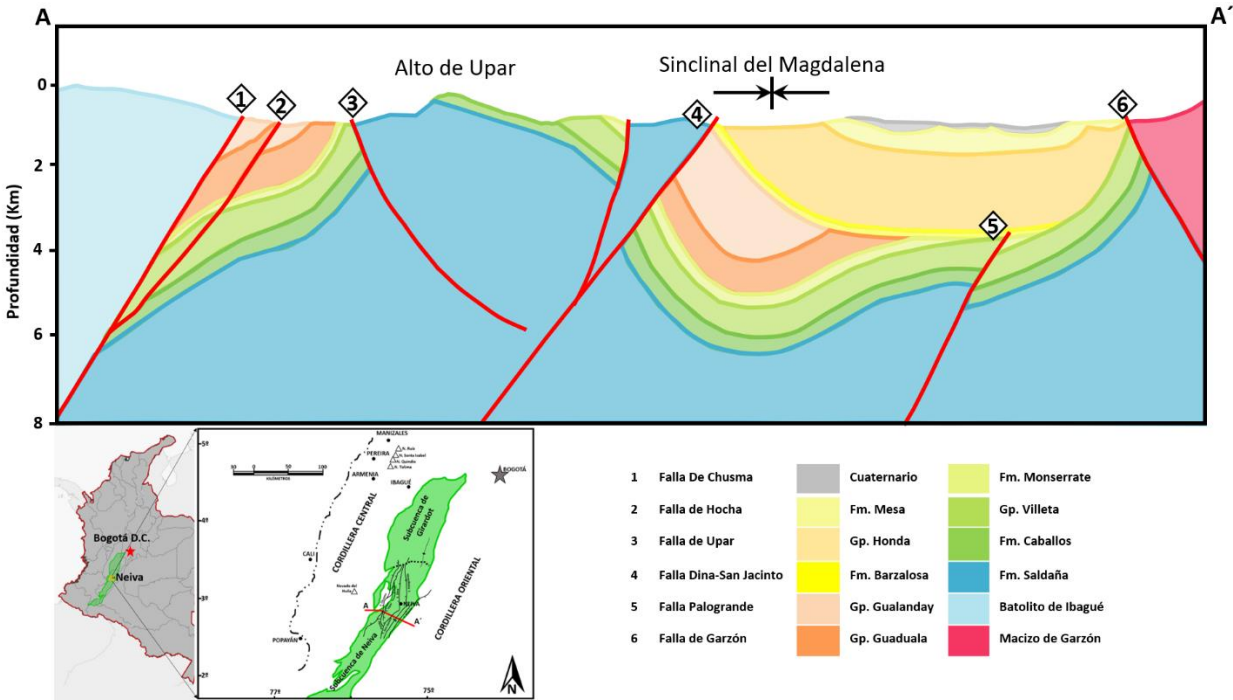
En la CVSM, la Subcuenca de Neiva, en general se caracteriza porque muestra dos sistemas estructurales distintos: El primero, asociado a fallas de cabalgamiento con trayectorias escalonadas que despegan desde el basamento pre-Cretácico pasando a planos semi-horizontales en las rocas suprayacentes Cretácicas, que a su vez son menos competentes ( (Mojica & Franco, 1990) y (Jiménez, 2008). Estos cabalgamientos presentan vergencia al este y se identifican en el área de estudio con el sistema de fallas de Chusma. El segundo, asociado a fallas de abanicos imbricados con terminaciones en fallas ciegas con vergencia al oeste que forman escamas delgadas con despegues someros en la Formación Saldaña y rocas cretácicas.

Las fallas principales reconocidas en el área son el sistema de Fallas de Chusma, la Falla de San Francisco y la Falla de Upar. Las Fallas de Chusma y San Francisco tienen vergencia hacia el este, mientras, que la Falla de Upar tiene un comportamiento de cabalgamiento con vergencia hacia el oeste. Según (Mojica & Franco, 1990), este estilo estructural corresponde a un estilo compresivo, de cabalgamientos y plegamientos, que muestra la convergencia de los esfuerzos hacia el centro de la Subcuenca de Neiva, en donde se observan múltiples despegues dentro de las unidades sedimentarias de los grupos Villeta y Guaduala; y abanicos imbricados, con escamas gruesas que afectan las rocas pre-cretácicas (Formación Saldaña) y también escamas delgadas que no afectan el basamento.

La

Figura 4, es un corte geológico transversal A-A' donde se observa la configuración estructural general de la CVSM en el área de estudio y el comportamiento de las unidades estratigráficas de acuerdo con la evolución tectónica de este sector de la cuenca.

Figura 4. Corte geológico A-A'. Modificado de (Mojica & Franco, 1990)



### 3.2 Estratigrafía del área de estudio

La estratigrafía descrita para el área de estudio involucra de base a tope unidades lito-estratigráficas encontradas en la subcuenca de Neiva que van desde el Jurásico hasta el Oligoceno (Figura 5).

**Formación Saldaña (JR<sub>s</sub>):** (Velandia, Núñez, & Marquínez, 2001) describen la Formación Saldaña como una unidad que puede ser separada, de acuerdo con su litología y origen, en dos conjuntos; uno sedimentario compuesto por capas de areniscas tobáceas sucias de tonos rojizos, areniscas feldespáticas, lodolitas rojizas, limolitas grises a verdosas, calizas bioclásticas y conglomerados con cantos principalmente de caliza y limolita. El otro conjunto es de origen

volcánico y está constituido principalmente por aglomerados, flujos de lava de composición predominantemente andesítica y tobas líticas, vítreas y cristalinas, varicoloreadas, con colores desde blanco y crema hasta verdes, grises, rojos y violetas. En algunos sitios del departamento son comunes las estructuras columnares en las vulcanitas. El contacto inferior con la Formación Payandé se determinó que es concordante transicional. El contacto superior es, en algunos sectores, netamente discordante bajo las rocas sedimentarias de la Formación Yaví; en la mayor parte del área departamental la Formación Caballos reposa discordantemente sobre el Saldaña. La edad de la Formación Saldaña abarca desde el Triásico superior hasta el Jurásico medio. Además, la Formación Saldaña es intruida por plutones jurásicos como el Batolito de Ibagué, el Granito de Altamira, la Monzodiorita de El Astillero y la Cuarzomonzonita de Dolores.

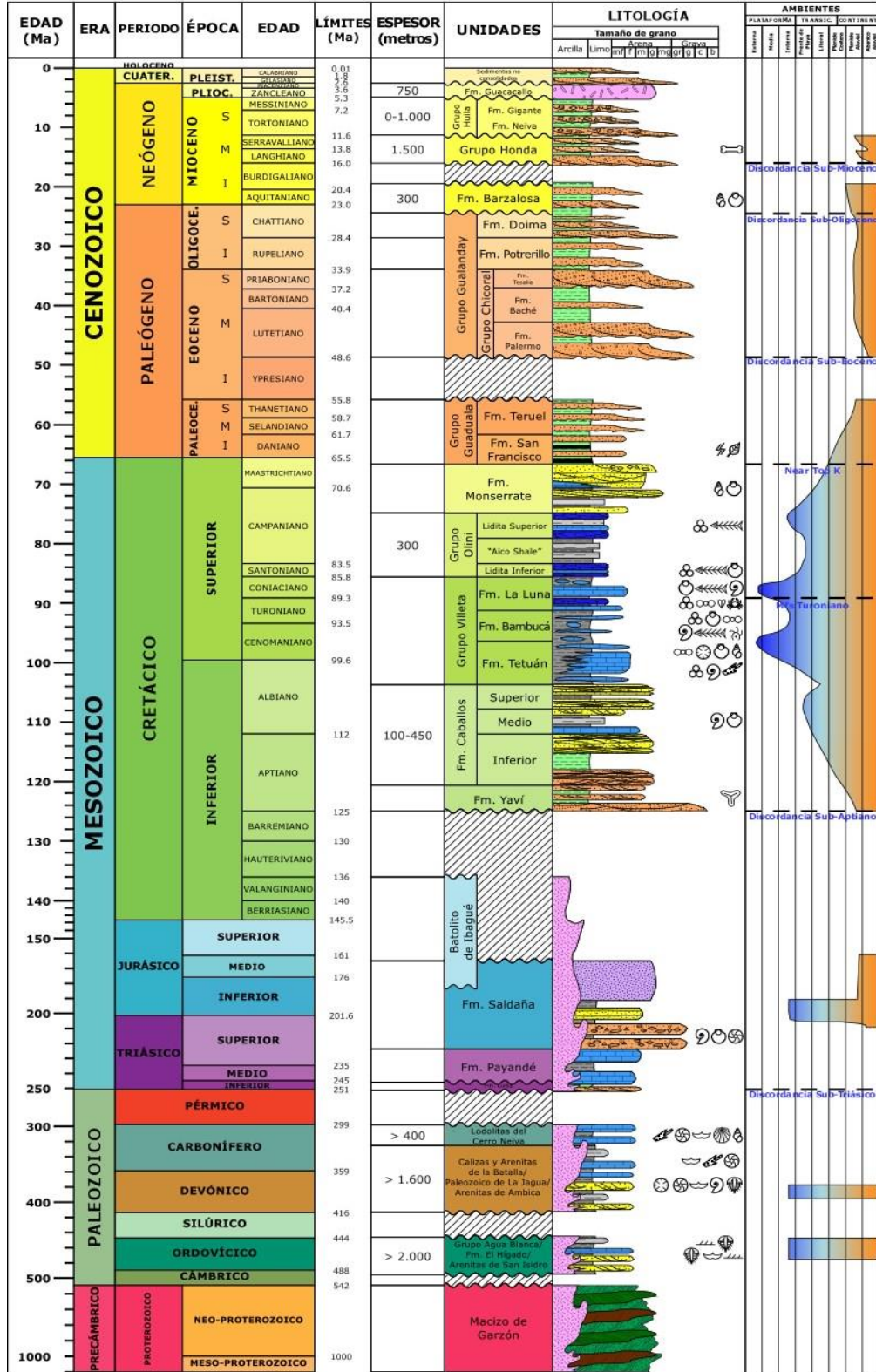
**Batolito de Ibagué (Ji):** De acuerdo con Núñez (1986), el Batolito de Ibagué es un cuerpo intrusivo en el que predominan las cuarzodioritas, con un tamaño de grano medio a grueso, generalmente en color gris con diversos tonos de acuerdo al contenido de minerales tipo hornblenda y biotita. El Batolito de Ibagué también presenta rocas como granodioritas con alto contenido de feldespatos potásicos, cuarzomonzonitas y dioritas con influencia de rocas metamórficas preexistentes. La edad del Batolito de Ibagué de acuerdo con (Barrero y Vesga, 1976) en dataciones radiométricas de K/Ar en hornblenda y biotita se ubica entre 140 y 150 millones de años, por lo cual corresponde al Jurásico Superior.

**Formación Caballos (Kc):** Según (Corrigan, 1967) y (Beltrán & Gallo, 1968) la Formación Caballos se divide en tres miembros: el miembro inferior descrito en (Ramón & Fajardo, 2004) como unos depósitos fluviales, y los miembros medio y superior compuestos de areniscas en las que se registran cambios en tamaño de grano consistentes con variaciones de

facies. (Renzoni, 1994) se refiere la sección tipo de la Formación Caballos en la Quebrada Yaví. En general, la Formación Caballos consiste de areniscas cuarzosas de colores amarillentos, de grano medio a grueso, areniscas lodosas intercaladas con arcillolitas y lodolitas amarillentas y negras, y en ciertas capas se encuentran concreciones de siderita y nódulos ferruginosos. Las lodolitas se hacen más frecuentes hacia el tope. El contacto de esta unidad está concordante transicional con la suprayacente Formación Villeta y discordante con la infrayacente Formación Saldaña. (Corrigan, 1967) postuló un rango de edad que va desde Aptiano inferior hasta Albiano.

**Grupo Villeta (Kv):** Según (Kairuz, Ferreira, & Solano, 2000) el Grupo Villeta, está conformado por las formaciones Tetuán, Bambucá y La Luna, de carácter calcáreo y lutítico, calizas micríticas fosilíferas con concreciones y shales silíceos negros a grises (Jiménez, 2008). Según (Carrera, 2015) la Formación Tetuán consta de intercalaciones de lodolitas calcáreas y calizas dolomitizadas, la Formación Bambucá, está compuesta por limolitas y arcillolitas levemente calcáreas y la Formación La Luna consta de calizas margosas con algunas intercalaciones de lodolitas calcáreas. La Formación Villeta está en contacto concordante transicional con la infrayacente Formación Caballos y en contacto concordante neto con el suprayacente Grupo Oliní. La edad registrada para el Grupo Villeta es desde el Albiano al Santoniano.

Figura 5. Columna estratigráfica del VSM. Modificado de (Roncancio & Martínez, 2011) en (Carrera, 2015).



**Formación Monserrate (Km):** Según (Beltrán & Gallo, 1968) en (Veloza, Mora, De Freitas, & Mantilla, 2008), la Formación Monserrate es una unidad principalmente arenosa. Constituida por cuarzo areniscas de grano fino a medio con restos fósiles (Jiménez, 2008) y (Vargas, Palencia, & Chavarro, 2013) definen cuatro unidades: dos arenosas y dos lodosas: el K4, compuesto de arcillolitas y limolitas con un nivel de roca fosfórica, el K3, compuesto de areniscas cuarzosas blancas a grises de grano fino a medio, el K2, compuesto de limolitas silíceas y chert con dos niveles de rocas fosfóricas, y el K1, compuesto por cuarzoarenitas de grano grueso con cemento silíceo (Vargas, Palencia, & Chavarro, 2013). Según (Veloza, Mora, De Freitas, & Mantilla, 2008) el contacto con el infrayacente Grupo Oliní es concordante neto y con la suprayacente Formación Guaduala el contacto es una paraconformidad. La edad registrada para esta unidad corresponde al registro fósil que la ubica del Campaniano al Maastrichtiano (Beltrán & Gallo, 1968).

**Grupo Guaduala (KPga):** Según (Carrera, 2015), el Grupo Guaduala corresponde a depósitos arcillosos y limosos de tonalidades rojizas y verdosas. El Grupo Guaduala está conformado por las formaciones San Francisco y Teruel (Beltrán & Gallo, 1968). En (Velandia, Núñez, & Marquínez, 2001), la Formación San Francisco denominada por (Beltrán & Gallo, 1968) está conformada por arcillolitas limosas, predominantemente rojizas y verdosas con algunos tonos parduscos, morados y grisáceos y la Formación Teruel denominada según (Beltrán & Gallo, 1968) está conformada por capas gruesas de areniscas líticas de grano fino, bien cementadas, de color gris oscuro, con textura tipo “sal y pimienta”, intercaladas con arcillolitas limosas varicoloreadas. Esta división se diferencia únicamente en la subcuenca de Neiva.

Se encuentra en contacto discordante con la infrayacente Formación Monserrate y el contacto superior es discordante y se marca por la aparición de la primera capa de areniscas conglomeráticas de tono rojizo pertenecientes al Grupo Chicoral (Ingeominas, 2001). La edad del Grupo Guaduala se registra desde el Maastrichtiano al Paleoceno (Beltrán & Gallo, 1968).

**Grupo Gualanday (Tg):** (Galvis & Támara, 1985) describen al Grupo Gualanday como una secuencia de conglomerados, areniscas y arcillolitas, con un espesor que algunos autores estiman en más de 2000 mts., en la región del Río Yaya, en las proximidades de la población de Palermo (Beltrán & Gallo, 1979). En general los conglomerados y areniscas son de color rojo o violeta y las arcillolitas presentan tonos grises o azules. Los clastos de los conglomerados son principalmente jaspes de diversos colores, cuarzo y en menor proporción granitos y neises. El Grupo Gualanday está conformado de base a techo por las formaciones Palermo, Baché, Tesalia, que conforman el Grupo Chicoral, y las formaciones Potrerillo y Doima. Se relaciona una edad Eoceno medio hasta el Oligoceno. Se encuentra en contacto discordante con la infrayacente Formación Guaduala y de igual manera, con la suprayacente Formación Honda.

## 4. Marco teórico

Se definen todos los conceptos que están asociados a este estudio:

### 4.1 Modelo de velocidad

El mejoramiento de las imágenes sísmicas incluye el uso de diferentes tipos de velocidades, como las velocidades de apilamiento, velocidades interválicas y velocidades sísmicas y de pozo. Construir un modelo de velocidad implica dos factores principales: uno es evaluar el campo de velocidades revisando si es coherente con el comportamiento estructural del subsuelo y el otro es utilizar diferentes fuentes de velocidad, como la sísmica convencional y la sísmica de pozo.

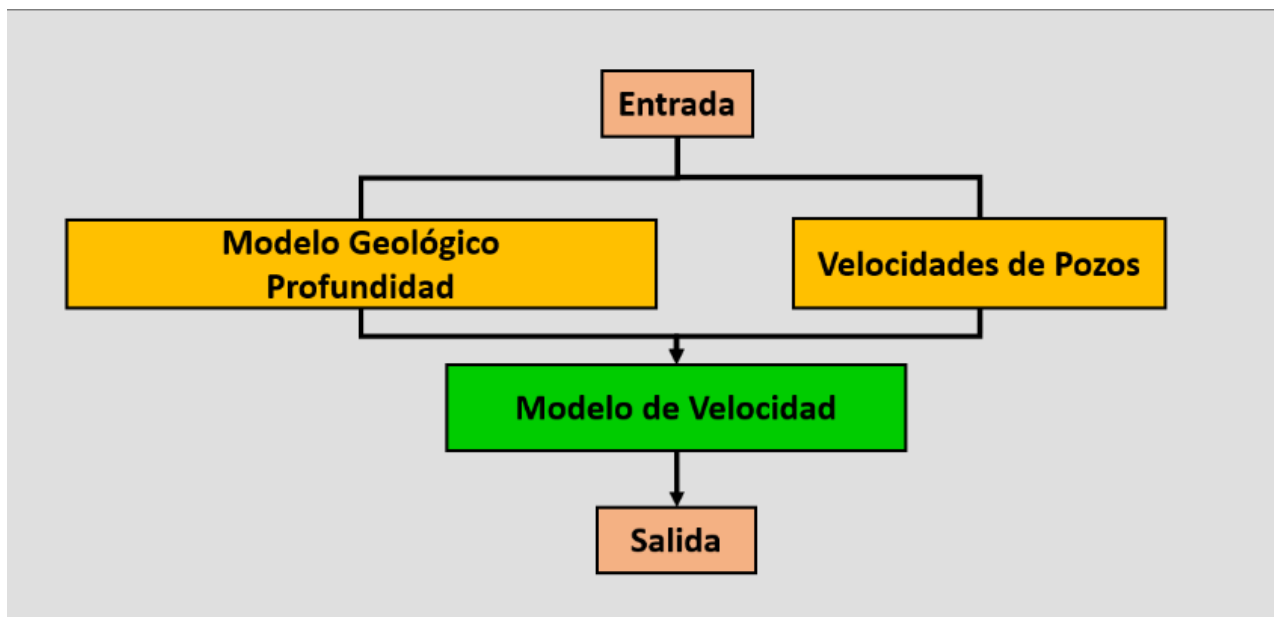
Según (Etris, Crabtree, Dewar, & Pickford, 2001); el modelo de velocidad más robusto es el que es geológicamente consistente siguiendo el esquema apropiado de las capas, usa la información detallada de velocidades e incorpora toda la información de velocidades, incluyendo las velocidades de procesamiento sísmico y de pozo (Figura 6).

### 4.2 Barrido rápido (*Fast sweeping*) para construcción de modelos de velocidad

En matemáticas aplicadas, el método de barrido rápido es un método numérico para resolver problemas de valores límite de la ecuación de Eikonal. Calcula eficientemente el tiempo de propagación a lo largo de un frente de onda en expansión (Zhao, 2005). Utiliza el método de diferencia finita para resolver la ecuación Eikonal.

Para construir modelos de velocidad (Rickett & Fomel, 2000) por bloques de acuerdo a la configuración de la geología estructural de un área de estudio, se utiliza el método de barrido rápido para calcular y asignar los gradientes de la velocidad de acuerdo a las características de las rocas (Treister & Haber, 2016), tales como litología, compactación, estratificación, buzamiento de las capas, etcétera.

Figura 6. Flujo de información para elaboración del modelo de velocidad.



#### 4.3 Campo de ondas adjunto

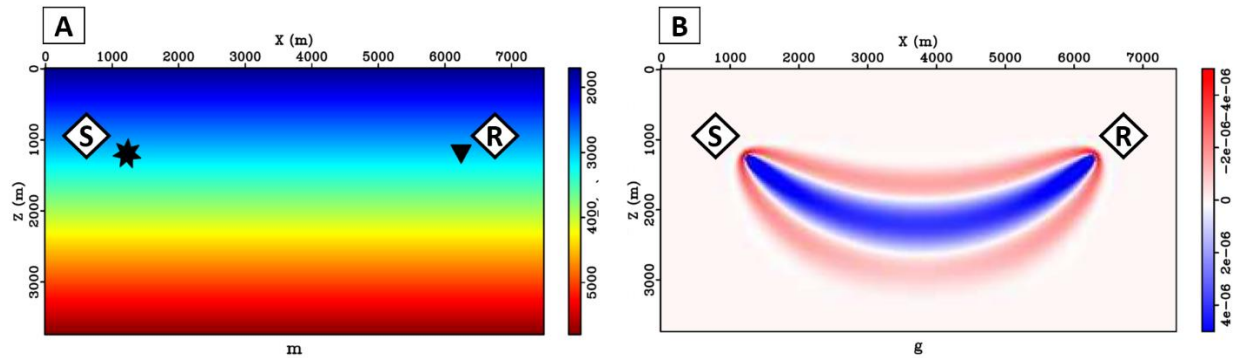
Es el principal componente en los algoritmos de inversión del campo de onda y se requiere para computar el gradiente de la función objetivo lineal y no lineal (Tarantola, 1984).

#### 4.4 Principio de reciprocidad fuente-receptor

Se basa en un fundamento de la teoría de ondas que cumple la simetría en la información de los tiempos de arribo. Este principio consiste en un campo de onda invariante en el tiempo (no

importa la dirección de la flecha del tiempo), acotado en un dominio espacial, donde se da la superposición de dos estados del campo para un par fuente/receptor (Liu, Dong., Wang, Zhu, & Ma, 2009). Ver Figura 7A.

Figura 7. Trayectoria de iluminación del campo de onda. A) Campo de velocidad para un par fuente/receptor. B) Ilustración de la trayectoria de la iluminación del campo de onda.



La trayectoria de la iluminación del campo de onda es una estimación de la variación del fenómeno de la propagación en una solución numérica de la ecuación de onda.

En un medio homogéneo la trayectoria de la iluminación del campo de onda forma una imagen similar a una banana (Figura 7B), sin embargo, cuando el medio es asimétrico y se tienen en cuenta los rasgos geológicos-estructurales, se obtiene que la reciprocidad muestra todos los caminos que toma la energía, dejando ver rasgos del subsuelo y características como zonas de no iluminación, fallas, pliegues, etc.

#### 4.5 Iluminación por número de onda

Cuando se asume un medio simple de capas planas con ondas que se propagan, se pueden calcular los componentes de la iluminación basados en el número de onda ( $k$ ), como se indica en la Figura 8. (Sirgue & Pratt, 2004) propusieron que:

$$k_x = \frac{\omega}{v} \sin \theta, \quad k_z = \frac{\omega}{v} \cos \theta$$

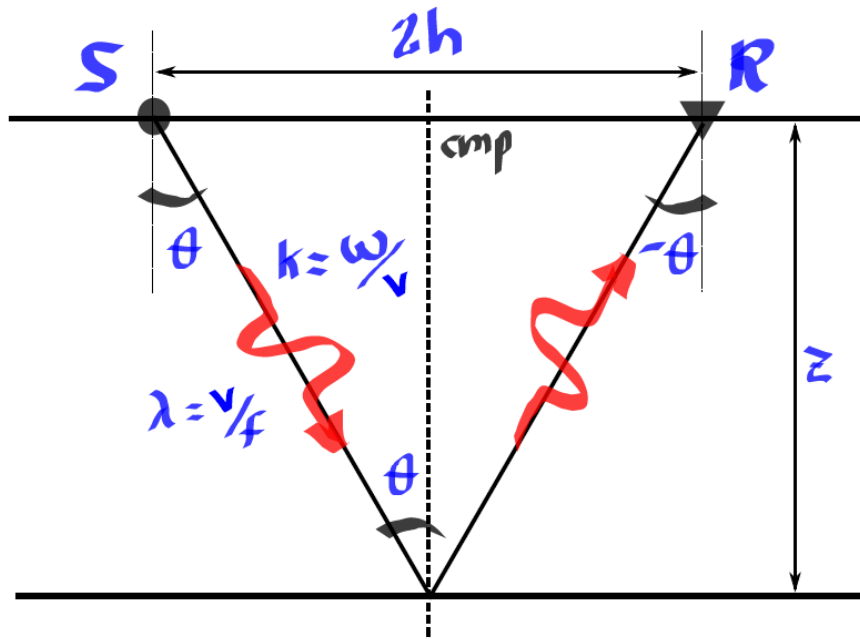
Donde,

$$\|k\| = \|k_x\| + \|k_z\|$$

La función de onda plana en el dominio del número de onda (k) puede ser:

$$\xi(k, r) = A \sin(k \cdot r), \quad r \equiv \{x, z\}$$

Figura 8. Esquema de iluminación usando el número de onda k.



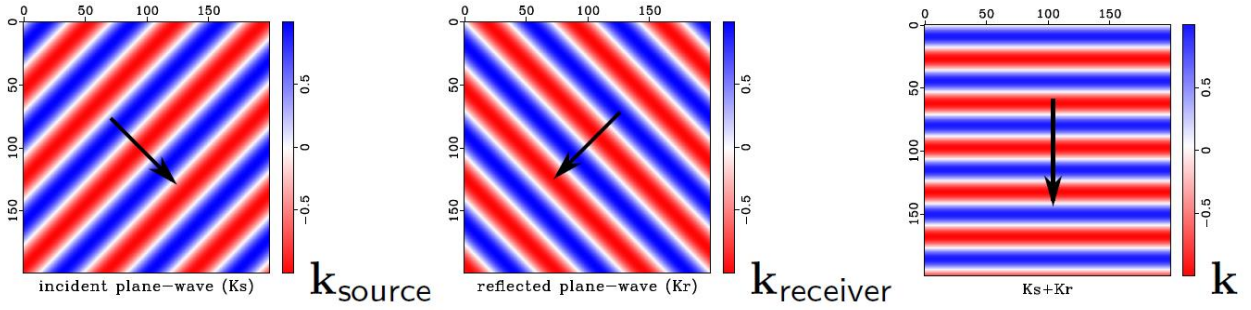
Donde,

$$\sin \theta = \frac{h}{\sqrt{z^2 + h^2}}$$

El número de onda k del sistema fuente-receptor es  $k_{fuente} + k_{receptor} = k$ , cuya longitud de onda es inversa.

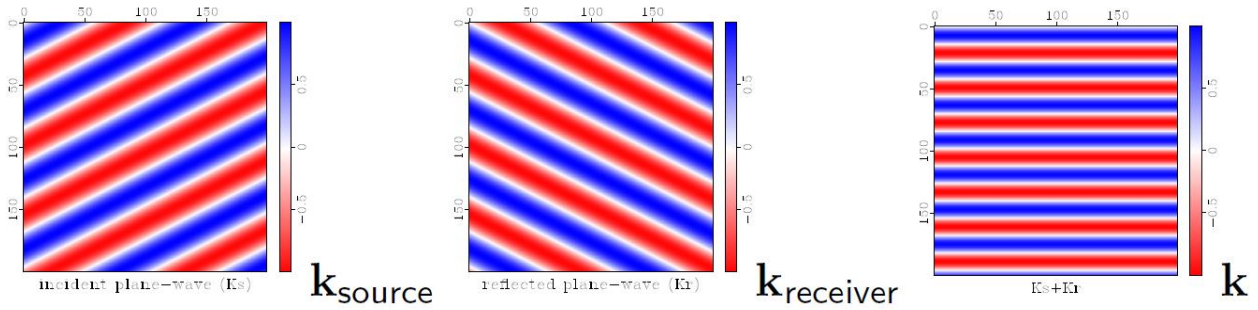
Un medio con  $v = 2500 \left[ \frac{m}{s} \right]$ ,  $z = 200 [m]$ ,  $offset = 200 [m]$ ,  $f = 50 [Hz]$  se tiene una iluminación según la Figura 9.

Figura 9. Esquema de iluminación para  $\theta = 45^\circ$ .



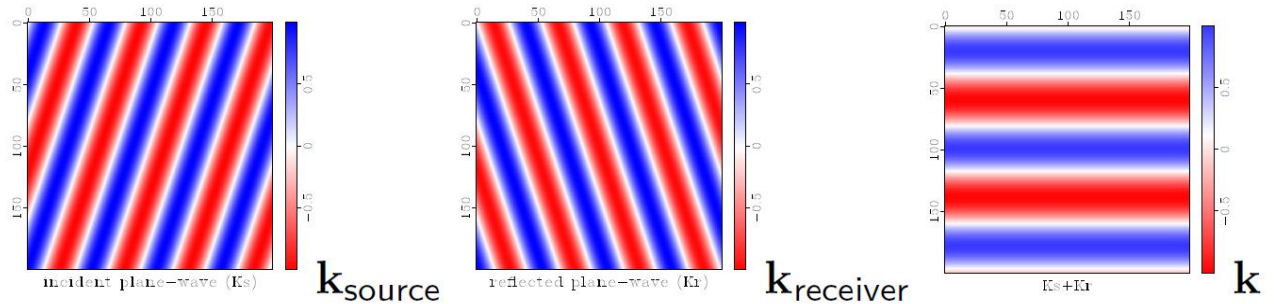
Si se cambia el offset a 100 [m]  $\cong \theta = 27^\circ$  se tiene el esquema de iluminación según la Figura 10.

Figura 10. Esquema de iluminación para  $\theta = 27^\circ$ . Distancia corta entre fuente-receptor.



Si se cambia el offset a 600 [m]  $\cong \theta = 72^\circ$  se tiene el esquema de iluminación según la Figura 11.

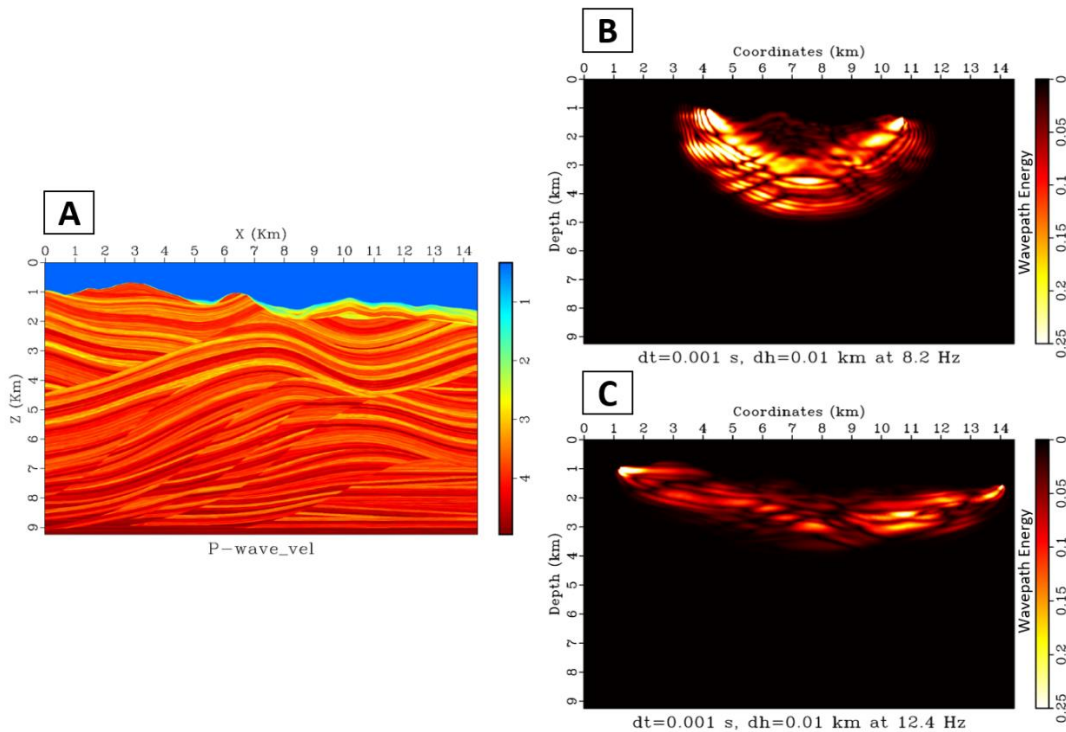
Figura 11. Esquema de iluminación para  $\theta = 72^\circ$ . Distancia larga entre fuente-receptor



Entonces,  $k = k_{fuente} + k_{receptor}$ ,  $\lambda \propto \frac{1}{\|k\|}$

En la Figura 12B, se observa que un mayor  $\|k\|$  o mayor frecuencia espacial, tiene una menor longitud de onda  $\lambda$ , y mayor definición de la velocidad vertical (reflectividad), con offsets cortos, mientras la Figura 12C, se observa que un menor  $\|k\|$  o menor frecuencia espacial, tiene una mayor longitud de onda  $\lambda$ , buena definición de la velocidad lateral con offsets largos.

Figura 12. Trayectoria de iluminación del campo de onda. A) Campo de velocidad. B) Mayor número de onda  $k$  mayor definición en el offset cercano. C) Menor número de onda  $k$  mayor definición en el offset lejano.



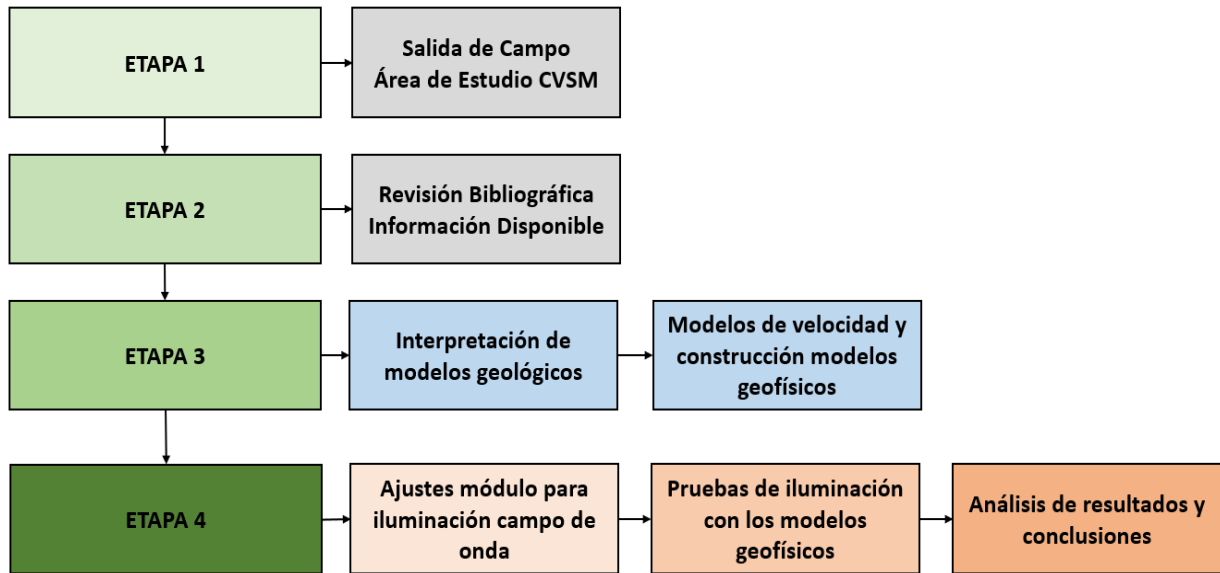
#### 4.6 Iluminación por campo de onda

En diseño de adquisición sísmica, los modelos de propagación reducen el riesgo en exploración sísmica proveyendo información cuantitativa para mejores diseños de geometrías de adquisición 2D/3D. El modelado por propagación permite que se creen mapas de iluminación para visualizar la distribución de la energía sísmica en el subsuelo “*wavepaths*”.

## 5. Marco metodológico

La metodología propuesta para este trabajo se divide en cuatro etapas y se describe según el esquema de la Figura 13:

Figura 13. Metodología aplicada a la iluminación por campo de onda.



**Etapa 1:** Se realizaron dos salidas de campo en el desarrollo de este estudio: La primera se realizó para hacer el reconocimiento del área de estudio y definir las rutas de campo que permitieran un acceso fácil a la toma de datos evitando quebradas, zonas densamente boscosas y predios que no otorguen permiso de ingreso. También, se verificó que las unidades geológicas aflorantes tuvieran coherencia con la expresión topográfica. La segunda salida de campo incluyó la toma de datos estructurales para las fallas de Chusma y Upar, colectando evidencias directas en superficie que permitieran reconocer evidencias directas de las fallas tipo *thrust*. Los datos estructurales que se colectaron fueron rumbos y buzamientos en planos de falla o posibles fracturas. Los datos colectados se midieron en las formaciones Saldaña, Caballos, Villeta y

Monserrate; con el objeto de establecer un ángulo promedio de buzamiento de las fallas Chusma y Upar.

**Etapa 2:** En esta etapa, se colectó la información bibliográfica correspondiente con los estudios geológicos realizados en el área de estudio y los métodos utilizados, la cartografía geológica disponible, artículos científicos. Se tomó el mapa geológico mostrado en el trabajo de (Aparicio, 2019) que es coherente con el área de estudio de este trabajo, un archivo de elevación digital del terreno (DEM-Digital Elevation Model), una imagen sísmica en profundidad y la información de velocidades para el área de estudio reportada en (Chajín, Duarte, Beltrán, Díaz, & Agudelo, 2019).

**Etapa 3:** En esta etapa, Se cargó la imagen sísmica en profundidad en 2D Move, la topografía del terreno y los datos de rumbo y buzamientos de las fallas tomados en la etapa de campo. Se interpretaron dos modelos que se ajustaron de acuerdo con el mapa geológico disponible, los buzamientos de las fallas y los estilos estructurales reportados para esta zona de la Subcuenca de Neiva.

**Etapa 4:** Se generaron los modelos de velocidad para cada uno de los modelos geológico-estructurales, generando bloques con velocidades asignadas, teniendo en cuenta que en la definición estratigráfica del área de estudio. Estos modelos se crearon usando Madagascar y se exportaron como un archivo SGY de velocidades. En los modelos de velocidad se emplearon las velocidades descritas según la Figura 14.



las adquisiciones simuladas por el método basado en el campo de onda para cada uno de los modelos geofísicos construidos, con el objetivo de iluminar todas las posibles zonas afectadas por la configuración del estilo estructural del área de estudio definido en cada uno de los modelos geológicos propuestos. Para optimizar los tiempos computacionales en Madagascar en la herramienta construida para este objeto se cortaron los modelos geofísicos en profundidad desde 7Km hasta 5Km, teniendo en cuenta que las estructuras subthrust no fueran cortadas y que la definición de las zonas de sombra de falla no se pierda.

## 6. Resultados de la Investigación

### 6.1 Interpretación sísmica

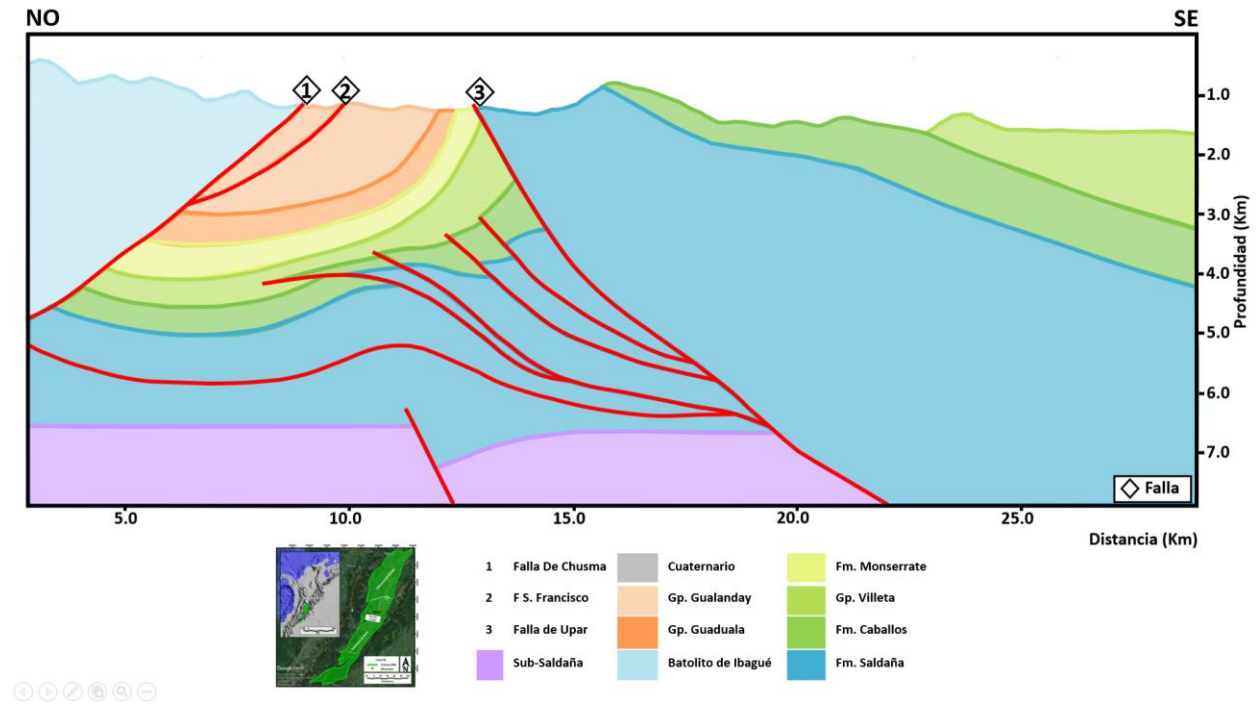
De la interpretación sísmica se obtuvieron dos modelos geológicos-estructurales que se amarraron con la información estructural colectada en campo para la definición de los ángulos de buzamiento de las fallas y con la información de buzamientos reportada por (Aparicio, 2019).

#### 6.1.1 Modelo geológico 1

Se describe según la Figura 15, presentando un modelo de zona triangular formada entre las fallas tipo *thrust* de Chusma, San Francisco con vergencia hacia el este y Upar con vergencia hacia el oeste. La Falla de Upar forma un abanico imbricado como un arreglo de fallas ciegas de atajo que deforman las formaciones Saldaña, Caballos y Villeta.

En la Figura 15, se observan las formaciones sedimentarias localizadas en zonas *subthrust* que se presentan debajo de la falla de Chusma y San Francisco que colocan en contraste las rocas ígneas del Batolito de Ibagué con las rocas sedimentarias de las formaciones Caballos, Villeta y Monserrate considerando en este punto una primera zona de sombra de falla. En la zona debajo de la Falla de Upar, se localiza una segunda zona de sombra de falla, poniendo en contacto las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Saldaña con las rocas sedimentarias de las formaciones Caballos, Villeta y Monserrate.

Figura 15. Modelo geológico 1



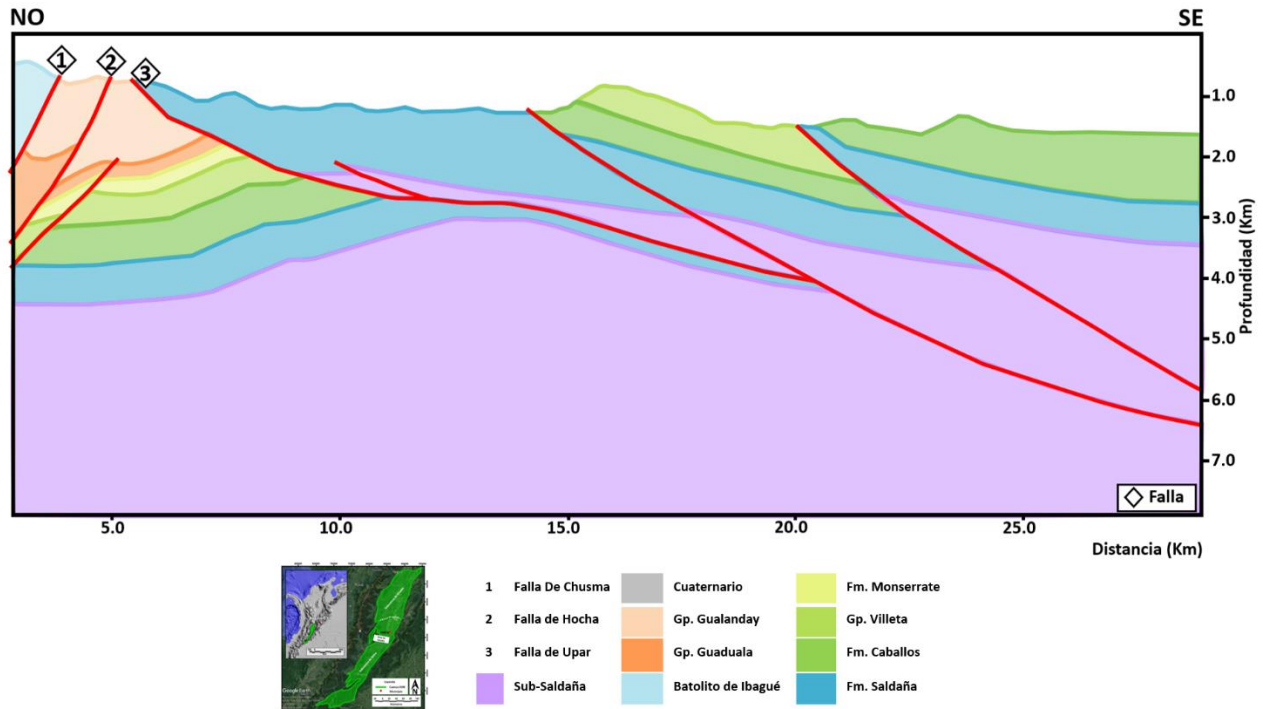
### 6.1.2 Modelo geológico 2

Se describe según la Figura 16, presentando un modelo de rampa despegue rampa ocasionada por un pliegue por flexión de falla. La Falla de Upar tiene vergencia hacia el oeste y se comporta como una falla de atajo de fallas más profundas que vergen hacia el este, conservando un buzamiento suave en profundidad y se verticaliza hacia la superficie, pero con un ángulo menor que las Fallas de Chusma y San Francisco. Las fallas de Chusma y San Francisco, presentan buzamientos elevados y vergencia hacia el este.

En la Figura 16, se observan dos zonas de sombra de falla que presentan de forma clara las posibles zonas prospectivas *subthrust*. En este modelo, la Falla de Chusma pone en contacto las rocas ígneas del Batolito de Ibagué con las rocas del Paleógeno, y a su vez la Falla de San Francisco

pone en contacto las rocas del Paleógeno sobre las rocas de las formaciones Monserrate y Villeta. La Falla de Upar, pone a las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Saldaña por encima de las rocas cretácicas y paleógenas ocasionando una inversión de la secuencia estratigráfica.

Figura 16. Modelo geológico 2



## 6.2 Modelos geofísicos

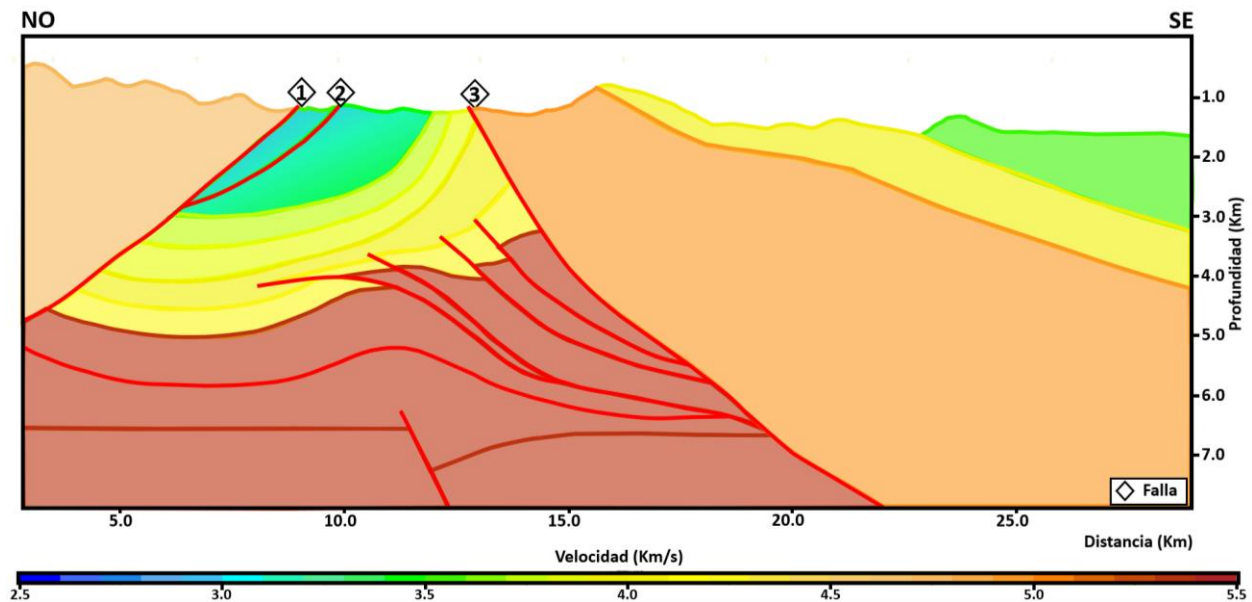
De la asignación de las velocidades a las unidades de roca se obtuvieron dos modelos geofísicos que se describen en las Figuras 17 y 18.

### 6.2.1 Modelo geofísico 1

En este modelo existe un contraste alto de velocidades en la zona debajo de la Falla de Chusma, ya que las rocas ígneas del Batolito de Ibagué presentan alta velocidad del orden de los

4800 m/s y las rocas sedimentarias de las formaciones Caballos, Villeta, Monserrate y grupos Guaduala y Gualanday con velocidades menores que van desde los 2600 m/s hasta los 4200 m/s, y posteriormente las altas velocidades de la Formación Saldaña de 5400 m/s. En la zona bajo la Falla de Upar, se encuentra el contraste de velocidades de la Formación Saldaña de 4900 m/s suprayaciendo a las rocas de las formaciones Caballos, Villeta y Monserrate con velocidades entre 4200 m/s a 3500 m/s, generándose también un alto contraste en las velocidades.

Figura 17. Modelo geofísico 1 asociado al modelo geológico 1.

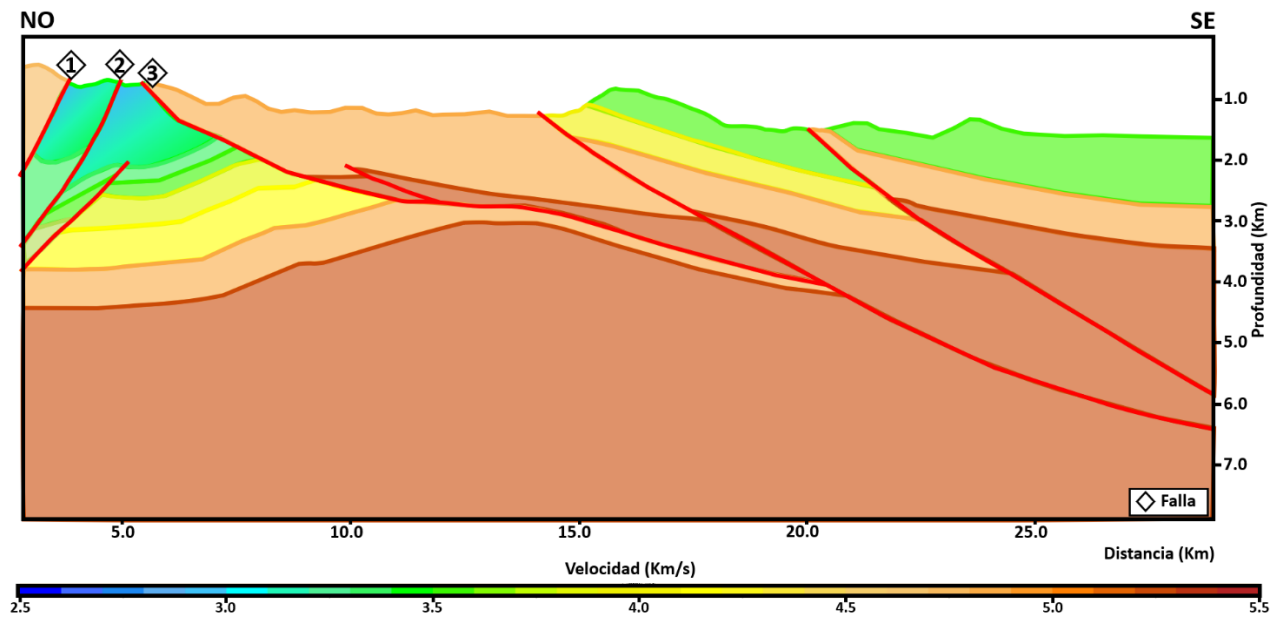


### 6.2.2 Modelo geofísico 2

Este modelo presenta altos contraste de velocidad, no sólo en las zonas afectadas por las fallas de Chusma, San Francisco y Upar en la configuración vertical de las zonas subthrust sino también en la horizontal, mostrando contrastes laterales en las velocidades de las rocas, que pueden aumentar o disminuir el efecto de las zonas de sombras de fallas sobre los posibles prospectos. En la zona debajo de las fallas de Chusma y San Francisco, el contraste de velocidades

lateral es más fuerte y se presenta entre las rocas de los grupos Guaduala y Gualanday (2600 m/s hasta 3400 m/s) y las rocas suprayacentes del Batolito de Ibagué (4800 m/s). Mientras que en la zona afectada por la Falla de Upar las rocas de la Formación Saldaña (4900 m/s y 5300 m/s) que suprayacen toda la secuencia sedimentaria cretácica-paleógena (2600 m/s hasta 4000 m/s) generan un fuerte contraste de velocidades lateral y vertical.

Figura 18. Modelo geofísico 2 asociado al modelo geológico 2.

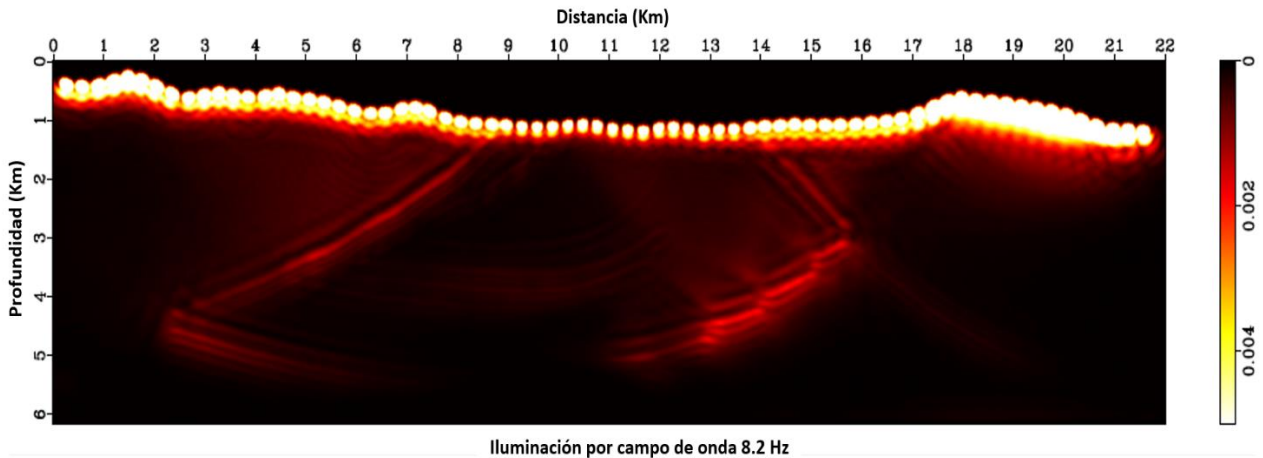


### 6.3 Simulación de adquisición para iluminación por campo de onda

Se corrieron los dos modelos geofísicos en la herramienta de simulación por campo de onda elaborada en Madagascar con los parámetros correspondientes al diseño original de la línea sísmica cuya imagen se utilizó para interpretar los modelos geológico-estructurales propuestos para este estudio.

Las imágenes obtenidas muestran que la técnica de iluminación sísmica por campo de onda permite observar los fenómenos completos de propagación de la energía y su interacción con las superficies estructurales interpretadas para un área estructuralmente compleja.

Figura 19. Modelo simulado para el modelo geofísico 1.

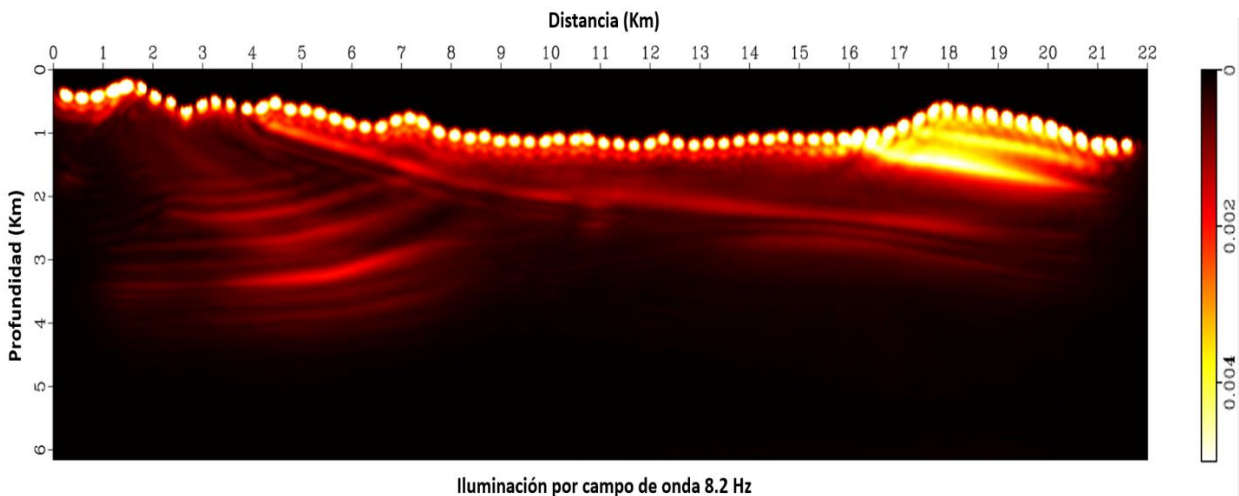


En la Figura 19, se muestra la simulación corrida sobre el modelo geofísico 1, para la estructura de doble zona de sombra de falla en una zona triangular con abanicos imbricados y terminaciones de fallas ciegas, indica que la estructura interpretada presenta zonas que en definitivo no se iluminan, esto se atribuye a que la geología de superficie que determina los buzamientos altos de las fallas de Chusma y San Francisco en la interpretación, debe refinarse para generar un modelo geológico-estructural que se ajuste no sólo al estilo estructural de esta zona en la Subcuenca de Neiva, sino que también, se ajuste a la topografía y a la definición de los contactos entre las formaciones geológicas aflorantes, sumado a una información de subsuelo más cercana al tramo de la transecta. La iluminación para este modelo sigue manejando alta incertidumbre para la zona de sombra debajo de las fallas Chusma y San Francisco. Sin embargo, en la zona de sombra bajo la Falla de Upar, la iluminación de las estructuras muestra un mejor ajuste al modelo geofísico.

El bloque localizado entre la Falla Upar y el extremo este de la sección que corresponde a la Formación Saldaña, se muestra no iluminado en su mayoría, lo que se atribuye a las propiedades de las rocas, en este caso se aplicaron velocidades altas que no hacen contraste con la Formación Saldaña que infrayace a la zona estructural correspondiente con el abanico imbricado que termina en fallas ciegas en la Formación Villeta. Este fenómeno se ajusta con lo reportado por (De Freitas, 2000).

La iluminación por campo de onda en este modelo requiere ajustes con geología y propiedades de las rocas, para poder hacer reducción de incertidumbre en las zonas *subtrust*.

Figura 20. Modelo simulado para el modelo geofísico 2.



La simulación corrida sobre el modelo geofísico 2, indica que la estructura interpretada presenta que la sección se ilumina en su mayoría. Esto se atribuye a que la geología de superficie que determina los buzamientos altos de las fallas de Chusma y San Francisco en la interpretación, se encuentra refinada, en este modelo los buzamientos de las fallas de Chusma y Upar se ajustaron de acuerdo con el trabajo de (Aparicio, 2019) para generar un modelo geológico-estructural ajustado al estilo estructural de esta zona en la Subcuenca de Neiva, a la topografía y a la definición

de los contactos entre las formaciones geológicas aflorantes, sumado a una información de subsuelo más cercana al tramo de la transecta. La iluminación para este modelo entrega menor incertidumbre para la zona de sombra debajo de las fallas Chusma, San Francisco y Upar; sin embargo, se mantiene una zona no iluminada bajo las Fallas Chusma y San Francisco. Pero, en resumen, la iluminación de las estructuras en este modelo muestra un mejor ajuste al modelo geofísico.

En este modelo la iluminación por campo de onda permite que se tenga una mejor delimitación en el tope del Basamento pre-Jurásico, porque permite encontrar la zona de contraste de impedancias que determinan topes y bases de las zonas de interés. Si se tuvieran zonas prospectivas por debajo de estas fallas tipo *thrust* en estas zonas, este sería el modelo ideal para planificar una campaña exploratoria.

## 7. Conclusiones

De la simulación de la iluminación por campo de onda se obtuvo que: el modelo 1 simulado, presenta zonas no iluminadas en las posibles áreas prospectivas de tipo *subthrust*, que abren la necesidad de hacer ajustes con la geología de superficie y en el modelo geofísico donde se incluyen las propiedades de las rocas, para poder considerar que se puede reducir la incertidumbre en caso de ser un objetivo exploratorio.

De la simulación de la iluminación por campo de onda se obtuvo que: el modelo 2 simulado, presenta que la sección se ilumina en su mayoría, en las posibles áreas prospectivas de tipo *subthrust*. Este modelo presentó un mejor ajuste con la geología de superficie en la determinación de los buzamientos altos de las fallas de Chusma y San Francisco, y la interpretación fue refinada con los buzamientos de las fallas de Chusma y Upar determinados por (Aparicio, 2019).

Al comparar los resultados de las secciones simuladas con iluminación por campo de onda de los modelos 1 y 2, se obtuvo que el modelo ideal para disminuir la incertidumbre en la planificación de una campaña exploratorio es el modelo 2, porque se observó una mejor delimitación en el tope de la Formación Saldaña y Basamento pre-Jurásico, observando las zonas de contraste de impedancias que determinan topes y bases de las zonas de interés prospectivo. La profundidad de las estructuras que pueden ser plays exploratorios es menor, y esto reduce costos de perforación y menor volumen de roca por penetrar.

Los modelos geológicos propuestos permitieron evidenciar que en las zonas *subthrust* en definitivo se presentan zonas de iluminación y no iluminación en respuesta a un contraste de velocidades entre basamento pre-Cretácico (Fm Saldaña) y rocas sedimentarias de la CVSM que son puestas en contacto por las fallas de Chusma, San Francisco y Upar, las cuales tienen diferentes ángulos de buzamiento y vergencias opuestas.

En general, las zonas no iluminadas conocidas como zonas de sombra, se pueden iluminar utilizando este tipo de simulaciones, ya que, mediante el campo de onda, se conocen todos los caminos en los que se distribuye la energía. El método permite hacer acercamientos en las zonas de interés, sobre las que se pueden refinar los parámetros de adquisición de la simulación, incluyendo el modelo geofísico y los contrastes de velocidades, por ejemplo, en el caso de las compañías de la industria petrolera que cuentan con información de registros de velocidades de pozos, sísmica y pruebas de laboratorio en donde se conocen los parámetros de las rocas de forma directa.

Para futuros trabajos en la CVSM, se puede determinar un modelo con características más acertadas a la configuración real de los reflectores, convirtiendo así a los prospectos *subthrust* en las zonas debajo de las fallas Chusma y Upar, en viables económicamente, para considerar el avance en la exploración y nuevos descubrimientos.

La iluminación por campo de onda simulada, es un método complementario a los métodos convencionales de reducción de incertidumbre exploratorio, que permite ampliar el panorama de la exploración sísmica en zonas donde la calidad de la imagen es mala, principalmente, porque se

pueden modelar los parámetros de la adquisición sísmica original y contemplar futuros diseños de programas sísmicos (teniendo en cuenta que el modelo geológico interpretado se ajuste con el estilo estructural de la zona de estudio) simulando la calidad de la imagen que se va a obtener en las posibles zonas de sombra (ya sean ocasionadas por fallas o por contrastes de propiedades).

Este análisis, no sólo marca la influencia en resolución de la imagen para la zona de Fresnel, sino que también describe los fenómenos asociados a los caminos que toma la energía en cada reflector en coherencia con los topes de las unidades de roca, lo que puede usarse para complementar las interpretaciones estructurales que están influenciadas por los parámetros de adquisición del método sísmico tradicional.

Este estudio se vio limitado por: 1) los tiempos de cómputo para la herramienta de simulación en Madagascar son altos para cada modelo; 2) la confidencialidad de la información de pozos para la estimación de propiedades como la densidad de las rocas, que también se puede simular por campo de onda; 3) la emergencia sanitaria de la pandemia por COVID-19.

## Bibliografía

- Aparicio, A. (2019). *Modelado gravimétrico 2D del área comprendida entre las fallas de Chusma y Upar en el sector YAguará-Palermo, Valle Superior del Magdalena*. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martínez, J. (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. (A. N. ANH, Ed.) Bogotá, Colombia: ANH; B&M Exploration Ltda.
- Beltrán, N., & Gallo, J. (1968). The Geology of the Neiva subbasin, Upper Magdalena basin, southern portion. *IX Annual Field Conference, Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists*. Geological Field Trips Colombia 1959-1978.
- Beltrán, N., & Gallo, J. (1979). The geology of the Neiva subbasin, Upper Magdalena Basin, Southern Portion. *Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists* (págs. 257-275). Bogotá: Geological Field Trips Colombia.
- Blanco, M., & De Freitas, M. (2003). Geología Estructural de la Zona de Yaguará-Palermo, Piedemonte de la Cordillera Central con Valle Superior del Magdalena, Colombia. *VIII Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas*.
- Carrera, D. (2015). *Sección balaceada del flanco occidental de la Cordillera Oriental en la inmediaciones de los municipios Villarrica y Cunday en la subcuenca de Girardot, Valle Superior del Magdalena*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Chajín, P., Duarte, M., Beltrán, W., Díaz, O., & Agudelo, W. (2019). Velocity model influence in the position and geometry of a prospect area located in VSM Basin, by image ray tracing. *16th Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*. Rio de Janeiro.

- Corrigan, H. (1967). The Geology of the Upper Magdalena Basin, Northern Portion. *Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists* (págs. 221-251). Bogotá: Geological Field Trips Colombia 1959-1978.
- De Freitas, M. (2000). "The Saldaña Victims": Unsuccessful Subthrust Exploration in the Upper Magdalena Valley of Colombia - Reasons for Failures and the Way Ahead. *ACGGP*, (pág. 825).
- Etris, E., Crabtree, N., Dewar, J., & Pickford, S. (2001). True Depth Conversion: More Than A Pretty Picture. *CSEG Recorder*: 11 - 22. *CSEG Recorder*., 11-22.
- Galvis, J., & Támara, A. (1985). Algunas anotaciones sobre la Formación Gualanday. *Geología Colombiana*(14), 71-76.
- Google Earth. (2020). Image Landsat / Copernicus - Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO. US Dept of State Geographer. Obtenido de [www.google.com/intl/es/earth/](http://www.google.com/intl/es/earth/)
- Hubral, P., Hoecht, G., & Jaeger, R. (1999). Seismic Illumination. *The Leading Edge* 18, 1268-1271. doi:10.1190/1.1438196
- Iversen, E., & Tygel, M. (2008). Image-ray tracing for joint 3D seismic velocity estimation and time-to-depth conversion. *Geophysics* , 73(3), 99-114.
- Jiménez, G. (2008). *Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del Valle Superior del Magdalena (Anticlinal de La Hocha)*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Kairuz, E., F. P., & Solano, O. (2000). Provincia petrolífera del Valle Superior del Magdalena, Colombia. *VII Simposio Bolivariano ACGGP 1*, (págs. 533-536).
- Lecomte, I. (2008). Resolution and illumination analyses in PSDM: A ray-based approach. *The Leading Edge*(27), 650-663. doi:10.1190/1.2919584

- Liu, Y., D. L., Wang, Y., Zhu, J., & Ma, Z. (2009). Sensitivity kernels for seismic Fresnel volume tomography. *Geophysics*, 74, 35-46. doi:10.1190/1.3169600
- Lozano, E., & Zamora, N. (2014). *Anexo O: Compilación de la Cuenca Del Valle Superior del Magdalena*. Servicio Geológico Colombiano.
- Macellari, C., Amaral, J., Salel, J., & Osorio, M. (2003). Exploring Sub-Basement Traps in the Upper Magdalena Valley of Colombia. *VIII Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas*. doi:10.3997/2214-4609-pdb.33.Paper11
- Mojica, J. (2010). Cuencas Catatumbo, Cesar-Ranchería, Cordillera Oriental, Llanos Orientales, Valle Medio y Superior del Magdalena. *Open Round Colombia Agencia Nacional de Hidrocarburos- ANH*.
- Mojica, J., & Franco, R. (1990). Estructura y evolución tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena, Colombia. *Geología Colombiana*(17), 41-64.
- Núñez, A. (1986). Petrogénesis del Batolito de Ibagué. Ministerio de Minas y Energía - Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras. *Geología Colombiana*, 35-45.
- Rait, G., Dawes, I., England, T., & Paukert, G. (2003). Structural Style, Sequence And Timing In The Acevedo Block: Implications For Subthrust Exploration In The Upper Magdalena Valley. *VIII Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas*. doi:10.3997/2214-4609-pdb.33.Paper15
- Ramón, J., & Fajardo, A. (2004). Sedimentología y Estratigrafía Secuencial de la Formación Caballos, Subcuenca de Neiva, Valle Superior del Magdalena. *3ra Convención Técnica de la ACGGP*. Bogotá.

- Ramón, J., & Rosero, A. (2006). Multiphase structural evolution of the western margin of the Girardot subbasin, Upper Magdalena Valley, Colombia. *Journal of south American Earth Sciences* 21, 493-509.
- Renzoni, G. (1994). Yaví (Formación): Catálogo de las unidades estratigráficas de Colombia. *Ingeominas*, 1-18.
- Rickett, J., & Fomel, S. (2000). *A second-order fast marching Eikonal solver*. Report SERGEY, Stanford Exploration Project. Obtenido de [sepwww.stanford.edu/data/media/public/oldsep/sergey/sepsergey/fmsec.pdf](http://sepwww.stanford.edu/data/media/public/oldsep/sergey/sepsergey/fmsec.pdf)
- Roncancio, J., & Martínez, M. (2011). Upper Magdalena Basin . *Geology and Hydrocarbon Potential - Regional Geology of Colombia*, 14, 182.
- Schneider, W., & Winbow, G. (1999). Efficient and accurate modelling of 3-D seismic illumination. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, (págs. 633-636). doi:10.1190/1.1821102
- Sirgue, L., & Pratt, R. (2004). Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies. *Geophysics* 69, 231-248. doi:10.1190/1.1649391
- Tarantola, A. (1984). Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics* 49, 1259-1266. doi:10.1190/1.1441754
- Treister, E., & Haber, E. (2016). A fast marching algorithm for the factored eikonal equation. *Journal of Computational Physics* 324, 210-225. doi:10.1016/j.jcp.2016.08.012
- Trincheró, E. (2000). The fault shadow problem as an interpretation pitfall. *The Leading Edge* 19, 132-135. doi:10.1190/1.1438549
- Tucker, P., Yorston, H., & Hollister, J. (1973). Pitfalls in seismic interpretation. *Geophysical Monograph Series - SEG*. doi:10.1190/1.9781560802365

- Vargas, R., Palencia, L., & Chavarro, M. (2013). Correlación petrofísica en superficie con subsuelo de formaciones productoras, subcuenca de Neiva. *Ingeniería y Región*(10), 89-98.
- Velandia, F., Núñez, A., & Marquínez, G. (2001). *Mapa Geológico del Departamento del Huila, Escala 1:300.000*. Memoria Explicativa, Ingeominas, Bogotá. doi:10.13140/2.1.3373.0885
- Velandia, F., Núñez, A., & Marquínez, G. (2001). *Memoria Explicativa Mapa Geológico del Departamento del Huila*. Ingeominas. doi:10.13140/2.1.3373.0885.
- Veloza, G., Mora, A., De Freitas, M., & Mantilla, M. (Enero - Junio de 2008). Dislocación de facies en el tope de la secuencia cretácica de la Subcuenca de Neiva, Valle Superior del Magdalena y sus implicaciones en el modelo estratigráfico secuencial colombiano. *Boletín de Geología*, 30(1).
- Vesga, J., & Barrero, D. (1978). Edades K/Ar en rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera Central de Colombia y su implicación geológica. *II congreso Colombiano de Geología*. Resúmenes.
- Wong, T., & Leung, S. (2016). A fast sweeping method for Eikonal Equations on implicit surfaces. *Scientific Computing*, 67(3), 837–859. doi:10.1007/s10915-015-0105-5
- Xie, X., & Yang, H. (2008). A Full-wave Equation Based Seismic Illumination Analysis Method. *70th EAGE Conference & Exhibition - Rome Leveraging Technology*. Rome.
- Yan, Z., & Xie, X. (November-December de 2016). Full-wave seismic illumination and resolution analyses: A Poynting-vector-based method. *Geophysics*, 81(6), 447-458. doi:10.1190/GEO2016-0003.1
- Zhao, H. (2005). A fast sweeping method for Eikonal equations. *Mathematics of Computation - American Mathematical Society*, 74, 603-627. doi:10.1090/S0025-5718-04-01678-3