Adquisición, Procesamiento e Interpretación de Datos Sísmicos de Reflexión Somera en las Salinas de Upín (Municipio de Restrepo-Meta) como un Aporte al Modelo Estructural de Tectónica Salina para el Piedemonte Llanero

Víctor Josué Gallo Carreño

Saúl Schneider Rincón Payares

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de Geólogo

Director

Jorge Eduardo Pinto

Geologo Magister en Geología

Codirector

German Yury Ojeda

Geologo Doctor en Geofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2017

Dedicatoria

A mi abuela que desde el cielo me acompaña en todo momento.

Saúl Schneider Rincón Payares

A mi padre por construir las bases de mi vida

Víctor Josué Gallo Carreño

Agradecimientos

A Dios por las bendiciones recibidas, por darme la fuerza, valentía y sabiduría para seguir adelante, superando los obstáculos que se presentaron en esta etapa.

A la universidad industrial de Santander por ser parte de mi preparación como Profesional y a la vicerrectoría de investigación y extensión por financiar esta investigación.

Al profesor y director de esta investigación Jorge Eduardo Pinto por creer en nosotros y guiarnos en el transcurso de este proyecto.

A la empresa Subsuelo 3D y a su gerente y codirector German Yury Ojeda por su por la disposición y colaboración en el desarrollo de la investigación.

A mi familia y amigos que siempre estuvieron ahí cuando más lo necesité.

A mi novia, por sus valiosos consejos y su amor incondicional durante toda mi carrera profesional.

Saúl Schneider Rincón Payares

A la Universidad Industrial de Santander por formarme como profesional para afrontar el resto de mi vida de la mejor manera.

A la vicerrectoría de investigación y extensión por financiar este trabajo.

A nuestro director de tesis Jorge Eduardo pinto Valderrama por compartir su sabiduría con nosotros durante el proceso de realización del proyecto.

A la empresa Subsuelo 3D y su gerente German Yury Ojeda por el prestamos de los equipos utilizados durante la fase de adquisición además de sus concejos constantes.

A mi madre por el apoyo moral y económico durante toda la carrera.

A mi hermana por ayudarme a tomar las mejores decisiones siempre.

A mi novia por brindarme su amor y apoyo cuando más lo necesité.

A mi familia y amigos en general por sus palabras de ánimo, en especial a Jairo Torres por su ayuda incondicional.

Víctor Josué Gallo Carreño

Tabla de contenido

Introducción……16
1. Aspectos Preliminares 18
1.1. Objetivo General 18
1.2. Objetivos Específicos 18
1.3. Metodología 18
1.3.1. Fase 1. Planeación. 18
1.3.2. Fase 2. Campaña de campo. 19
1.3.3. Fase 3. Procesamiento. 19
1.3.4. Fase 4. Interpretación. 19
1.3.5. Fase 5. Resultados. 19
1.4. Justificación 20
2. Fundamento Teórico 22
2.1. Ubicación 22
2.2. Geología 23
2.2.1. Geología Regional. 23
2.2.1.1. Estratigrafía. 26
2.2.1.2. Estructural. 33
2.2.2. Geología Local. 35
2.3. Geofísica 38
2.3.1. Sísmica de reflexión somera. 38
3. Adquisición – Campaña De Campo 44
3.1. Sísmica De Reflexión. 44
3.1.1. Generalidades. 44
3.1.2. Geometría de adquisición. 45
3.2. Sísmica De Refracción. 47
3.3. Tomografía Eléctrica 48
3.3.1. Generalidades. 48
3.3.2. Geometría de adquisición. 49
4. Procesamiento 50
4.1. Procesamiento Sísmico De Reflexión 50
4.1.1. Grabación de la información y conversión de los formatos. 51
4.1.2. Organización de los datos en el software SEISMIC UNIX 51
4.1.3. Filtrado 53

4.1.4. Normalización de la amplitud. 57
4.1.5. Adición de cabera CDP y ordenamiento por CMP. 58
4.1.6. Análisis de velocidades y corrección NMO (Normal Move Out)..... 60
4.1.8. Aplicación de corrección de estáticas..... 62
4.1.9. Apilado (stacking) y migración. 63
5. Resultados..... 66
5.1. Analisis De Resultados 67
5.2. Conclusiones..... 73
5.3. Observaciones..... 74
5.4. Recomendaciones..... 75
Referencias bibliograficas 77
Apéndices..... 82

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio resaltando la cercanía con el municipio de Restrepo- Meta y la localización de la mina de sal. Tomado y modificado de ArcGIS Earth. P22.

Figura 2. Fotografía aérea de la ubicación de la línea sísmica en relación con la Mina de sal de Upin Resaltando los pozos y puntos de ubicación claves. Tomado y modificado de Google Earth. los puntos correspondiente a D1, D2 y D3 son ubicaciones estrategicas desde donde se referenciaban los pozos perforados. P23.

Figura 3. Modelo secuencial de la evolución tectónica regional de la cordillera Oriental y las cuencas Magdalena y LLanos. Tomado y modificado de Cooper et al. (1995). P25.

Figura 4. Corte morfoestructural esquemático de la localización regional del área de estudio. Tomado y Modificado de GALVIS (1984). P26.

Figura 5. Columna estratigráfica correlacionando las formaciones de la cordillera Oriental, el piedemonte llanero y la cuenca llanos. Tomado y Modificado de Mora et al. (2006). P27.

Figura 6. Bloque diagrama de las principales fallas del Sector Central del Piedemonte Llanero. CR: Cratón. FA: Falla de Acacías. FC: Falla Colonia. FCU: Falla Cumaral. FG: Falla de Guaicaramo. FGR: Falla Guayuriba-Restrepo. FL: Falla Lengupá. FS: Falla Servitá. FSP: Falla de San Pedro-Yopal. FT: Falla Tesalia. FVC: Falla Colepato. Área de estudio Tomada y modificada de Taboada, C. et al. (1998). P33.

Figura 7. Mapa geológico modificado 1:100 000 de la zona de estudio resaltando la ubicación de la línea sísmica. Tomado y Modificado de INGEOMINAS. (2011). P36.

Figura 8. Modelo de evolución estructural local de la zona de estudio evidenciando la influencia de la tectónica salina en el desarrollo estructural del piedemonte llanero. Tomado y Modificado de Parravano et al (2015). P37.

Figura 9. Diagrama de una trayectoria reflejada en el punto B, partiendo de A y detectada en C. Tomada y modificada de: Canales (2010). P39.

Figura 10. Reflexiones ilustrando puntos de reflejo común (CDP). Tomada y modificada de: Canales (2010). P39.

Figura 11. Modelo que ilustra el concepto de continuidad sísmica. Tomada y modificada de: Mitchum et al (1977). P42.

Figura 12. Modelo que ilustra el concepto de Amplitud sísmica. Tomada y modificada de: Mitchum et al (1977). P43.

Figura 13. Modelo que ilustra el concepto de Frecuencia sísmica. Tomada y modificada de: Mitchum et al (1977). P43.

Figura 14. Ubicación de la línea sísmica y la tomografía eléctrica en relación con la Mina de sal de Upín. Tomado y Modificado de ArcGis Earth. P44.

Figura 15. Equipo SeisMex16 utilizado en la investigación. P45.

Figura 16. Especificaciones técnicas equipo SeisMex16 utilizado en la investigación. P45.

Figura 17. Geometría de adquisición para la línea de reflexión resaltando las características de la misma. P46.

Figura 18. Geometría de adquisición relacionando los conceptos de “tanda” y “línea”. P47.

Figura 19. Representación gráfica del Fold esperado con el tipo de adquisición realizada. P47.

Figura 20. Geometría de adquisición para la línea de refracción resaltando las características de la misma. P48.

Figura 21. Equipo Geoeléctrica utilizado para las tomografías eléctricas. P48.

Figura 22. Geometría de adquisición para la tomografía eléctrica. P49.

Figura 23. Dato sísmico mostrando algunos de los 405 disparos realizados en la fase de adquisición, en este punto el dato sísmico se encuentra sin tratamiento. P52.

Figura 24. Fichero con las cabeceras que muestran la información de los parámetros de adquisición definidos en la fase de planeación. Tracl & Tracr: Numero de trazas del dato, Fldr: Numero de disparos, Tracf: Numero de receptores activos por disparo, Offset: Distancia entre la fuente y cada receptor, Gelev: Elevación del receptor (Geófono), Selev: Elevación de la fuente, Sx: Coordenada en la horizontal de la fuente, Gx: Coordenadas en la horizontal de los receptores, Ns: Numero de muestras por intervalo, Dt: intervalo de muestreo en tiempo (mseg). P53.

Figura 25. Información sísmica en el dominio de la frecuencia. Los colores mostrados en la imagen indican los valores de amplitud para todo el dato, azul: Valores positivos, Rojo: Valores negativos. P54.

Figura 26. Comparación entre el dato con frecuencias bajas (A) y el dato sin frecuencias bajas (b) después de aplicar filtro Pasa-Alta. P55.

Figura 27. Dato sísmico en el dominio de la frecuencia luego de aplicar filtro Pasa-Alta. P55.

Figura 28. Comparación entre el dato con frecuencias altas (A) y el dato sin frecuencias altas (b) después de aplicar filtro Pasa-Alta. P56.

Figura 29. Dato sísmico en el dominio de la frecuencia luego de aplicar filtro Pasa-Baja. P56.

Figura 30. Dato sísmico mostrando la disipación de la energía hacia sus costados debido a la distancia entre la fuente y el receptor. P57.

Figura 31. Dato sísmico mostrando la disipación de la energía hacia sus costados debido a la distancia entre la fuente y el receptor. P58.

Figura 32. Fichero con la cabecera CDP sin agregar (Izquierda) y fichero con la cabecera CDP ya definida (Derecha). P59.

Figura 33. Imagen sísmica con la información ordenada por CMP’s. P59.

Figura 34. Cubrimiento sísmico determinado por el número máximo de trazas sísmicas en cada CMP. P60.

Figura 35. Imagen valores de semblanza para realizar el debido picado de velocidades (Izquierda) y función de velocidad construida posterior al picado de las velocidades (Derecha). P61.

Figura 36. Trazas sin corrección NMO (Izquierda) y trazas horizontalizadas posterior a la corrección NMO. P61.

Figura 37. Dato sísmico con la ubicación real en el eje z de las trazas, posterior a la corrección de estáticas. P63.

Figura 38. Comparación entre la Imagen sísmica con la corrección de estáticas aplicada (A) y posterior al proceso de apilamiento. P64.

Figura 39. Picado del primero arribo realizado a la información sísmica de refracción (Superior) y Tomografía sísmica de refracción obtenida posterior al picado (Inferior). P65.

Figura 40. Imagen sísmica resultado del procesamiento explicado en el capítulo anterior. P66.

Figura 41. Tomografía eléctrica procesada, con los valores reales de resistividad.P67.

Figura 42. Interpretación primaria donde se identifican los reflectores continuos en cualquier dirección. P68.

Figura 43. Integración de datos geológicos y estructurales que corroboran la naturaleza de los reflectores. P69.

Figura 44. interpretación de sondeos eléctricos realizados por la firma Geoinvestigaciones para la mina de sal de Upín evidenciando la sal entre 60 a 150m de profundidad. Tomado y modificado de Geoinvestigaciones (2015). P70.

Figura 45. Imagen resultado del procesamiento de la tomografía eléctrica (superior) y su Interpretación litológica (inferior). P71.

Figura 46. Interpolación de la imagen sísmica y la tomografía eléctrica interpretada. P71.

Figura 47. imagen sísmica interpolada al modelo estructural propuesto por Parravano et al. (2015) tomado y modificado de: Parravano et al (2015). P72.

Lista de Apéndices

Apéndice A. Conversión de de SGY a SU 80
Apendice B. Adición de cabeceras a los disparos sísmicos 80
Apéndice C. Análisis de velocidad 81

RESUMEN

Título: Adquisición, procesamiento e interpretación de datos sísmicos de reflexión somera en las salinas de Upín (municipio de Restrepo-Meta) como un aporte al modelo estructural de tectónica salina para el piedemonte llanero. [1]

Autores: Gallo Carreño, Víctor Josué; Rincón Payares, Saúl Schneider [2]

Palabras Claves: tectónica salina, diapirismo salino, tomografía eléctrica.

Resumen

Las deformaciones tectónicas de la corteza terrestre producidas por movimientos de sal determinados por la gravedad y la diferencia de densidades son estilos estructurales únicos y de gran importancia en la evolución geológica de cualquier terreno e implicaciones en la exploración de hidrocarburos. Dentro de los modelos estructurales que se han propuesto para el frente de deformación del piedemonte llanero solo uno, documenta un patrón no reconocido de principios de interacción salina deducido de geometrías estructurales pocos comunes y ocurrencias de sal cercanas y lo asocian a un antiguo diapirismo salino; esto abre las puertas a el desarrollo de una influencia salina a lo largo del piedemonte llanero, cabe resaltar que ningún otro documento ha incluido la tectónica salina como fenómenos de deformación en la evolución del piedemonte llanero.

Con esta investigación se quiso validar un modelo estructural basándonos en la propuesta del modelo anteriormente mencionado, mediante la adquisición, procesamiento, e interpretación de datos sísmicos someros (Near Surface), con un diseño de adquisición propio, un flujo de procesamiento adaptado para sísmica de reflexión somera en *Seismic Unix* respaldado por los modelos de velocidades resultados del procesamiento de líneas de refracción en *SeisImager,*

Finalizada la fase del procesamiento, la interpretación e integración de los datos geofísicos, la imagen sísmica obtenida no evidencia un evento que se pueda correlacionar con el tope de la estructura salina, por lo que se concluye que dicha estructura está localizada a mayor profundidad y que los depósitos evaporíticos de la mina de Upín, las capas de sal de la mina La Campana, el volcán de azufre Miralindo y numerosos manantiales de agua salada son la evidencia en superficie de que las deformaciones estructurales de difícil explicación en un modelo compresivo, y presentes en el piedemonte llanero, pueden ocasionarse en la tectónica salina.

---

[1] Trabajo de grado

[2] Escuela de Geología. Facultad de ingenierías Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Director: Jorge Eduardo Pinto. Codirector: German Yury Ojeda

ABSTRACT

Tittle: Acquisition, processing and interpretation of the seismic reflection shallow data in the Upín salt mine (Restrepo-Meta-Colombia) as a contribution to the structural model of salt tectonics for the llanos foothills. [1]

Authors: Gallo Carreño, Víctor Josué; Rincón Payares, Saúl Schneider [2]

Keywords: Near Surface, evaporitic deposits, electrical tomography.

Abstract

The tectonic deformations of the earth's crust generated by salt movements because of the gravity and density variations, are unique structural styles beside very important for the geological evolution of a determinate area and this fact has implications on the hydrocarbons exploration. Among all the structural models that the authors have proposed showing the deformation front of the Llanos foothills, only one of those talks about unrecognized patters that involved salt interaction, these patters have been deduced by noting uncommon structural geometries and nearby salt signs related to salt tectonic. This is a good start to research about salt tectonic all along the Llanos foothills and by the way no other paper has included structural deformation by salt tectonic for its geological evolution.

This research wanted to corroborate the structural model previously mentioned, with the model made by us, this would be possible by acquisition, processing and interpretation of shallow seismic reflection data, making our own acquisition design beside a processing flow adapted for shallow seismic reflection made on *seismic unix software,* also including velocity models from seismic refraction data processed on *Seisimager software*.

When the phases of processing, interpretation and overall geophysics data gathering were done, there were no clues on the seismic image of salt signs to be correlated to the top of any structure probably created by sal movements. From all of this we can conclude that the structure we were looking for is located deeper than the seismic reach of this investigation and the evaporitic deposits of the "Upin" mine, the salt layers of the "La Campa" mine, the "Miralindo" sulfur volcano and many salt water springs along the llanos foothills are evidences that can be seen on surface and are part of structures created by involving salt tectonic and these structures would be within a classical compressive model.

---

[1] Thesis

[2] Escuela de Geología. Facultad de ingenierías Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Director: Jorge Eduardo Pinto. Codirector: German Yury Ojeda

Introducción.

En el piedemonte llanero de Colombia se han descrito los tipos de trampas más comunes para hidrocarburos (Ecopetrol & Beicip, 1995), pero hasta el momento no se ha explorado siguiendo modelos que involucren actividad halocinética (sales y evaporitas). En octubre de 2015 los autores *Parravano, Teixell y Mora* (op. cit.) describen el desarrollo de un modelo estructural para el área de Guaitiquía, con influencia salina ofreciendo el soporte científico necesario para el planteamiento de esta propuesta. La reinterpretación de los modelos propuestos a la luz de los hallazgos recientemente publicados se hace más relevante ahora, que el país se encuentra cerca de culminar la etapa productiva de sus yacimientos de hidrocarburos, y la oportunidad de estudiar una estructura con presencia en superficie mediante un diseño, toma, procesamiento e interpretación de la información sísmica, permite confirmar esta nueva versión de la historia geológica en el frente del piedemonte llanero.

El primer capítulo del documento abarca los objetivos propuestos al inicio de la investigación, la formulación de la hipótesis para nuestro problema, una descripción detallada de la metodología y el flujo de trabajo que se utilizó para realizar esta propuesta de investigación, y se finaliza con la justificación del problema explicando la situación actual integral de todos los temas que se abarcan en la tesis.

En la segunda sección de este estudio se expone el fundamento teórico tanto de la parte geológica de la zona de estudio, como de la sísmica de reflexión somera y todo lo que abarca este método, además una explicación de la base teórica necesaria para comprender el funcionamiento de una tomografía eléctrica como método geofísico.

Para el tercer capítulo se expone todo lo relacionado con la campaña de campo, la definición de la geometría de adquisición, y la ejecución de la adquisición en sí, tanto de las líneas sísmicas como de las tomografías que se realizaron en la zona.

En la cuarta parte del documento se presenta una síntesis de todo lo que conlleva el procesamiento tanto de las líneas sísmicas, como de las tomografías eléctricas, haciendo énfasis en la adaptación necesaria del proceso para la sísmica de reflexión somera (near Surface).

El quinto y último capítulo de esta tesis expone la interpretación de los resultados obtenidos en el procesamiento, el análisis de la misma, una respuesta a la hipótesis planteada al inicio de la investigación y las observaciones y recomendaciones propuestas.

1. Aspectos Preliminares

1.1. Objetivo General

Complementar el nuevo modelo estructural propuesto por *Parravano et al (2015)* estudiando la influencia de la tectónica salina, en la evolución del piedemonte llanero, mediante la adquisición, procesamiento e interpretación de datos sísmicos de reflexión somera y tomografías eléctricas en las salinas de Upín (municipio de Restrepo-Meta).

1.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un diseño de adquisición que se adapte al tipo de campaña sísmica que se desarrollará en el área de estudio.

- Adaptar el flujo de procesamiento a los datos de sísmica de reflexión somera para su posterior interpretación.

- Describir mediante un modelo geológico, resultado de la interpretación sísmica, la influencia de la tectónica salina en la evolución del piedemonte llanero.

1.3. Metodología

Se planea usar una metodología de investigación científica, la cual podemos dividir en 5 fases como se muestra a continuación:

1.3.1. Fase 1. Planeación. Esta primera fase inicia con una búsqueda y recolección bibliográfica de todo el material teórico que se considere relevante y que aporte a la investigación, luego se redacta el plan de trabajo, en donde se ve reflejado el

problema, la justificación del mismo, los objetivos de la investigación, el alcance de esta y finalmente su plan de ejecución.

1.3.2. Fase 2. Campaña de campo. Después de tener lista toda la logística de la fase del viaje y los equipos geofísicos, la campaña de campo inicia con un corto periodo de observación de todos los indicios que evidencian la presencia de sal bajo el subsuelo y la localización de las zonas por donde se trazarán las líneas sísmicas y las tomografías eléctricas; a continuación, se pone en marcha el plan de ejecución y se finaliza la campaña de campo sin contratiempos mayores.

1.3.3. Fase 3. Procesamiento. En esta fase se buscarán los mejores métodos de procesamiento para el tipo de datos adquiridos en campo, la gestión de las licencias de varios softwares privados de procesamiento, y la finalmente se efectuará el mejor flujo adaptado al tipo de adquisición en la búsqueda de una mejor imagen.

1.3.4. Fase 4. Interpretación. La cuarta fase empieza con la interpretación de las líneas de refracción sísmica, cuyo resultado será un insumo importante en el proceso de migración sísmica de las líneas de reflexión somera, para su posterior interpretación y verificación con las tomografías eléctricas realizadas.

1.3.5. Fase 5. Resultados. Concluimos la investigación con la fase de resultados donde se redacta el informe final de la investigación, con la respuesta a la pregunta problema, la discusión, y las conclusiones de la misma.

1.4. Justificación

Desde que se descubrió el Campo petrolífero de Cusiana en la década de los 90, el piedemonte llanero colombiano ha sido objeto de múltiples investigaciones geológicas, entre ellas, algunas que buscan determinar el desarrollo estructural de esta parte del territorio, antes de eso Galvis (1984) acuñó el término "cinturón plegado del piedemonte llanero" sentando un precedente en la evolución estructural que se desarrolla en el área; autores como (Dengo y Covey, 1993, Cazier et al., 1995, Rowan y Linares, 2000, Toro et al. , 2004, Martínez, 2006, Mora et al, 2006, 2010, 2013, Tesón et al., 2013, Teixell et al., 2015) ilustraron mediante evolución de modelos estructurales, sin embargo todos ellos hacen énfasis en la inversión tectónica de las fallas extensionales producto de procesos compresionales.

Todo esto hasta el 2015, cuando los autores *Parravano, Teixell y Mora* (op. cit.) describen el desarrollo de un modelo estructural para el àrea de Guaitiquía en el piedemonte llanero con influencia salina ofreciendo el soporte científico necesario para el planteamiento de esta propuesta, que explica que en la cuenca proto-oceanica del cretácico se depositaron una serie de sedimentos evaporiticos que por sus características físicas hacen parte importante de esta región de las estribaciones de la cordillera oriental, lo cual abre la posibilidad de encontrar trampas asociadas a estructuras salinas para los posibles yacimientos en el área.

Se define la zona de estudio por encontrarse sobre la mina de Upín y por tener el espacio en línea recta necesario para alcanzar la dimensión de la línea necesaria; además la evidencia salina es concreta, ya que se ha estado extrayendo desde los años 70 y los distintos pozos exploratorios realizados por Geoexploraciones ubican una geoforma salina entre los 60 y 120 metros de profundidad dependiendo del área perforada, por lo que bastaría con una línea

sísmica de 700 metros para obtener una profundidad acorde para delimitar el cuerpo salino y asociarlo al modelo estructural propósito de esta investigación.

La discusión entre esta investigación y otras anteriormente mencionadas no es excluyente, es decir que el modelo propuesto no desmiente los anteriores modelos propuestos, solo adiciona que las evaporitas depositadas en el cretácico sufrieron una deformación conjunta mientras ascendían y se daban los procesos extensivos y compresivos característicos de esta zona del país.

2. Fundamento Teórico

2.1. Ubicación

La zona de estudio está ubicada en el piedemonte llanero, flanco Sureste de la cordillera Oriental, más exactamente a 2,3 km de la cabecera municipal de Restrepo – Meta, en dirección Noroeste, área privada bajo la jurisdicción de la mina de sal de Upín. (ver figura 1)

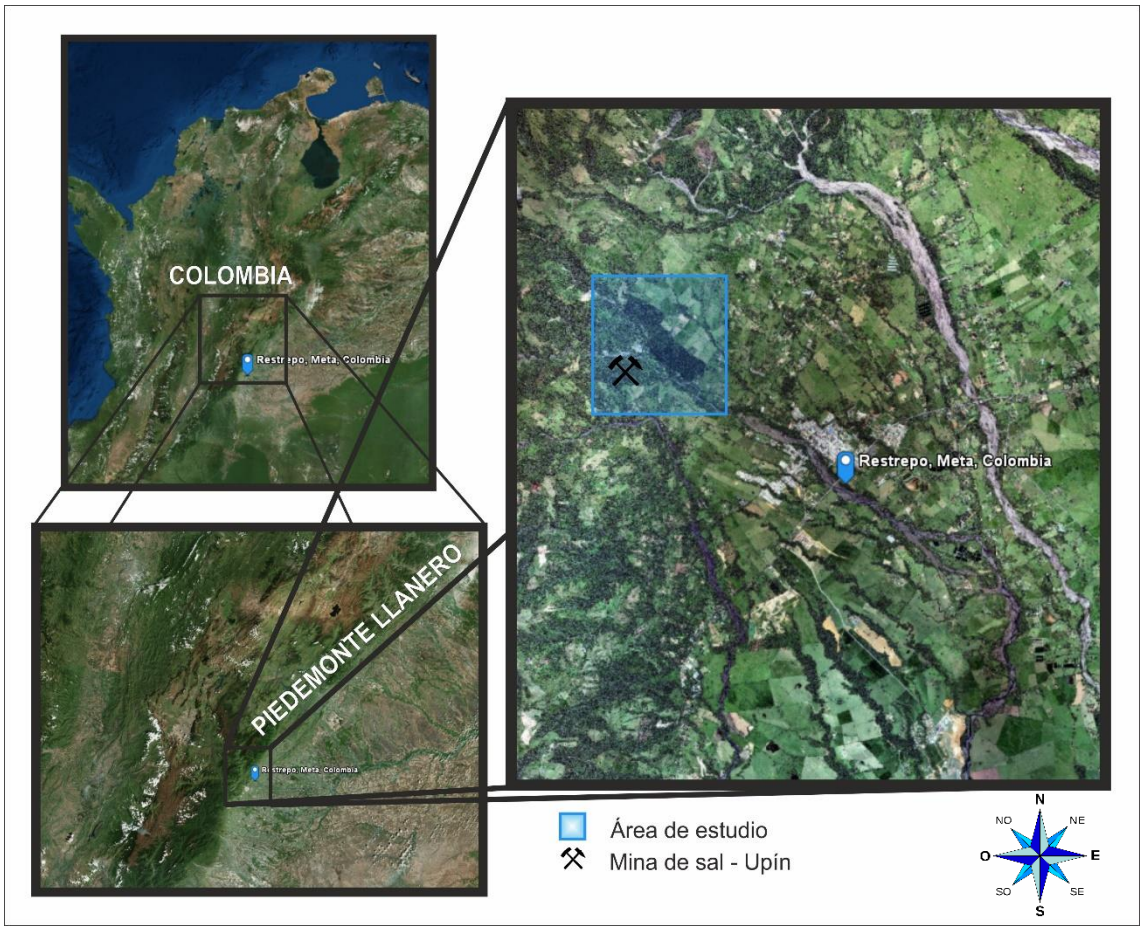


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio resaltando la cercanía con el municipio de Restrepo- Meta y la localización de la mina de sal. Tomado y modificado de ArcGIS Earth.

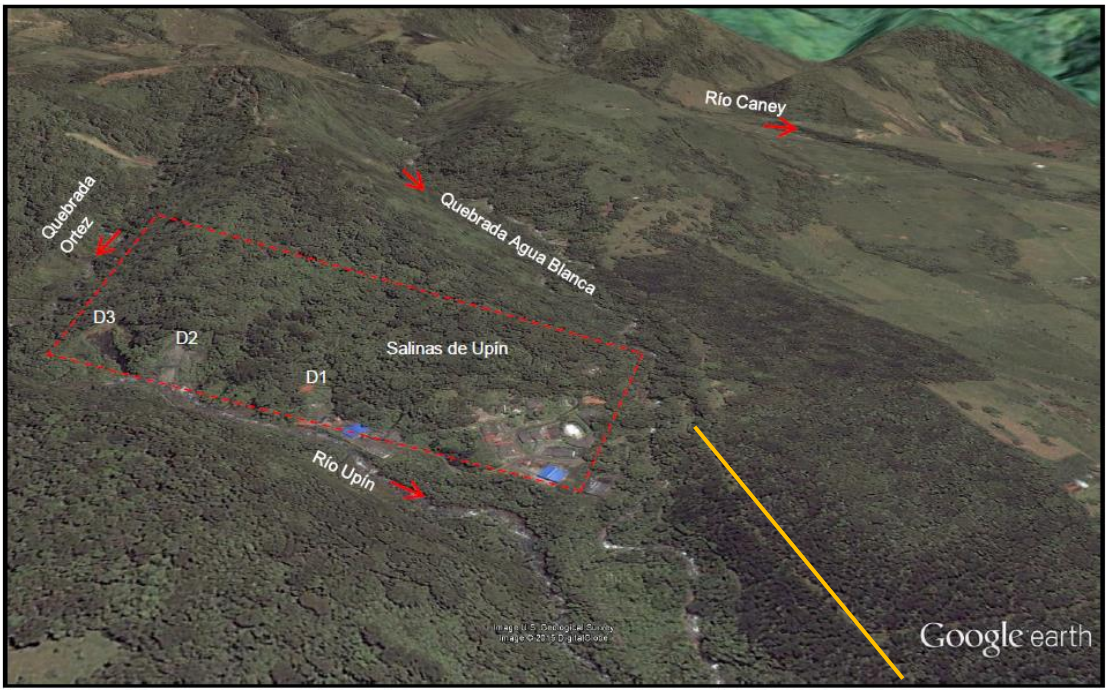


Figura 2. Fotografía aérea de la ubicación de la línea sísmica en relación con la Mina de sal de Upín Resaltando los pozos y puntos de ubicación claves. Tomado y modificado de Google Earth. los puntos correspondiente a D1, D2 y D3 son ubicaciones estrategicas desde donde se referenciaban los pozos perforados.

2.2. Geología

2.2.1. Geología Regional. La parte más al norte de la cadena montañosa de los Andes se divide en tres al iniciar el territorio colombiano, el piedemonte llanero se encuentra en el flanco Sureste de la Cordillera Oriental, misma que según Cortes *et al* (2006) presenta una fuerte complejidad que se asocia a la interacción entre las placas Nazca, Caribe y Suramérica. En la génesis de la cuenca que da origen a lo que hoy es la está cordillera se han definido principalmente dos eventos; el primero de acuerdo con Sarmiento *et al* (2006) es una acumulación de sedimentos propio de un ambiente extensional "synrift" en el desarrollo de la cuenca de tipo back-arc (retro arco) que tuvo lugar entre el Triásico superior – Jurásico inferior hasta parte del cretácico inferior; y el segundo, una reactivación de las fallas mayores en dirección contraria (inversión tectónica) reflejadas en las secuencias depositadas durante el Cenozoico mencionada por Cooper *et al* (1995).

A lo largo del cretácico la formación de fallas normales como la de Guaicaramo debido a un amiente tectónico extensional determinan la evolución de la cuenca, una subsidencia pasiva y posteriormente una etapa de subsidencia termal son responsables de la depositación de una gran secuencia de material marino y transicional sobre la roca consolidada que data del paleozoico, Acosta (2002) lo define el evento como una gran transgresión del mar sobre el continente. Entre el final del cretácico y el inicio del Paleógeno como lo documenta Etayo y Serna (1983) finaliza la acreción de la masa rocosa de la cordillera Occidental, lo que a su vez genera el levantamiento y posterior erosión de la cordillera central, dando así paso a la cuenca antepaís donde se depositaron las secuencias sedimentarias que corresponden a una regresión marina.

Debido al aumento de la convergencia entre las placas tectónicas de Suramérica y Nazca a mediados del Eoceno se produce una inversión tectónica. Posteriormente el régimen tectónico cambia, se producen fallas normales y una constate subsidencia que tiene lugar hasta el Oligoceno en respuesta al movimiento de las cordilleras Central y Occidental; este espacio de acomodación de sedimentos se ve afectado por una transgresión marina, por lo que Sarmiento (2001) la clasifica como una cuenca "foreland".

Durante el Mioceno se registra la elevación máxima de la cordillera Oriental, su posterior erosión deposita sedimentos sobre la cuenca antepaís en el piedemonte llanero, sin embargo, un evento de colisión entre bloque Baudo-Panama con el margen de la placa suramericana, lo que resulta en un cinturón de plegamiento y cabalgamiento según Cooper *et al*. (1995).

Para finalizar Dengo y Covey (1993) aclaran que las últimas fases compresivas causan el levantamiento regional de toda la cadena montañosa en el Plioceno-Pleistoceno, donde las antiguas fallas normales se reactivan en dirección contraria y desarrollan nuevas estructuras.

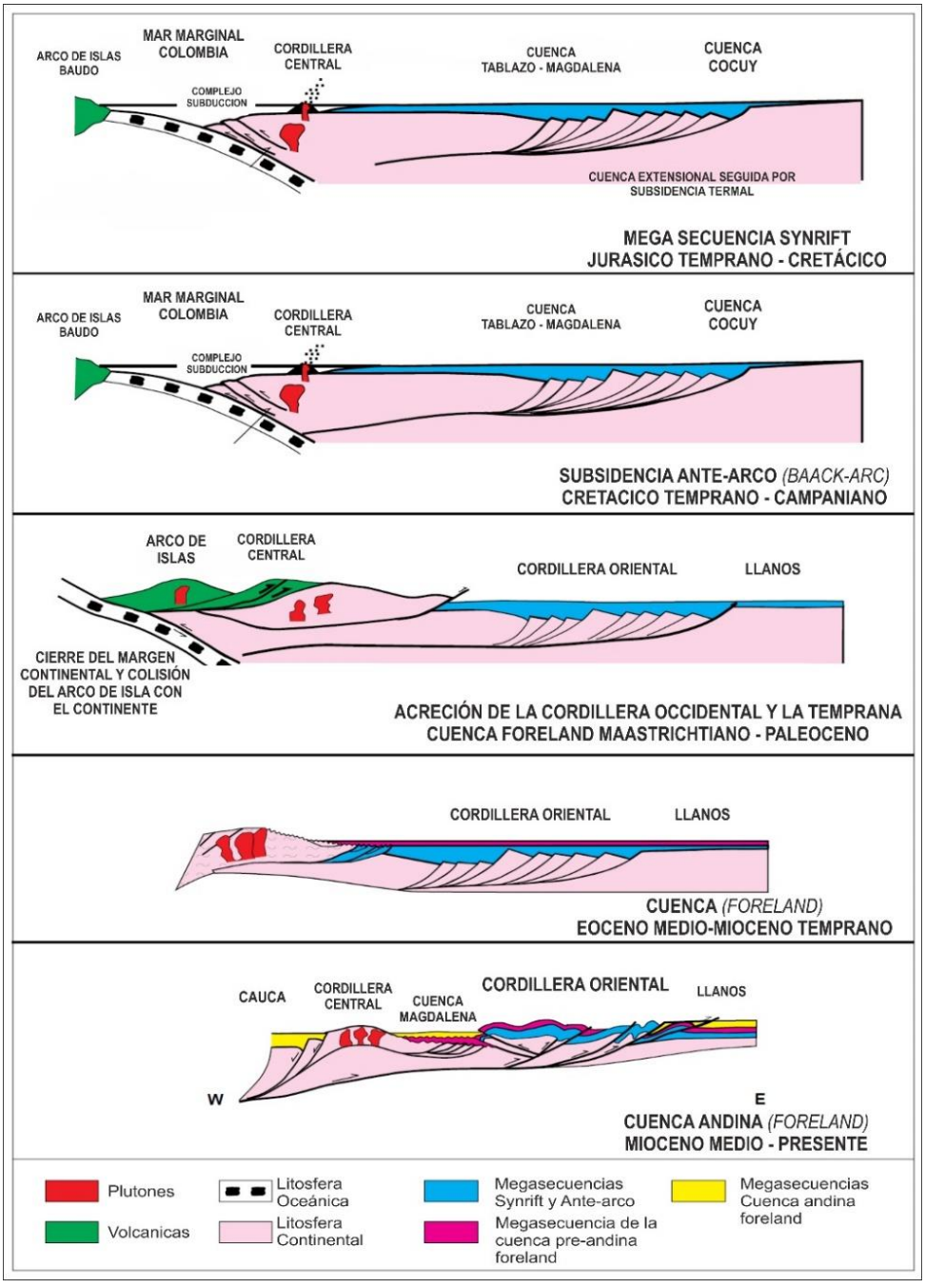


Figura 3. Modelo secuencial de la evolución tectónica regional de la cordillera Oriental y las cuencas Magdalena y LLanos. Tomado y modificado de Cooper et al. (1995).

Geológicamente el área de estudio se encuentra localizada sobre el piedemonte llanero, estructuralmente Ingeominas (2004) lo define como el "cinturón deformado del piedemonte llanero", sin embargo, el primer término en acuñarse para esta gran estructura fue "cinturón plegado" y lo hizo Galvis en 1984. El intenso fallamiento y plegamiento que presenta esta parte del territorio colombiano es resultado de los diferentes eventos extensionales y compresionales a lo largo de la historia geológica de la estructura. (ver figura 4)

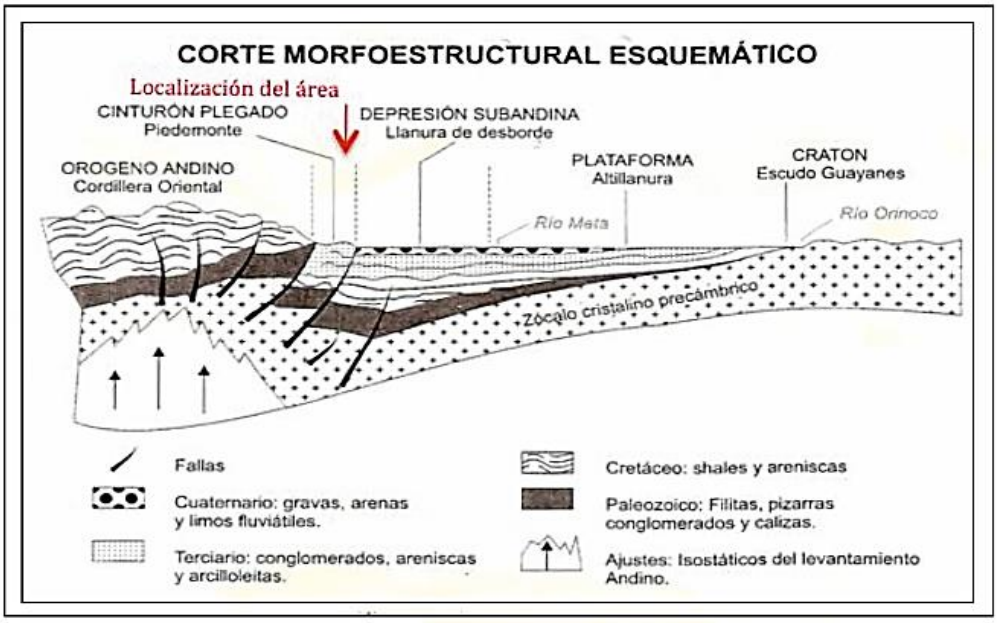


Figura 4. Corte morfoestructural esquemático de la localización regional del área de estudio. Tomado y Modificado de GALVIS (1984).

2.2.1.1.Estratigrafía. Múltiples eventos de extensión, compresión, subsidencia, entre otros han controlado la depositación de sedimentos en esta área del territorio colombiano, Mora *et al.* (2006) ilustran en la siguiente columna estratigráfica la correlación entre las formaciones de la Cuenca llanos, el piedemonte llanero y la cordillera Oriental.

A continuación, se describe brevemente las características de cada una de las formaciones más importantes de la más antigua a la más reciente y se representan gráficamente en una columna estratigráfica correlacionando las formaciones de la cordillera Oriental, el piedemonte llanero y la cuenca llanos.

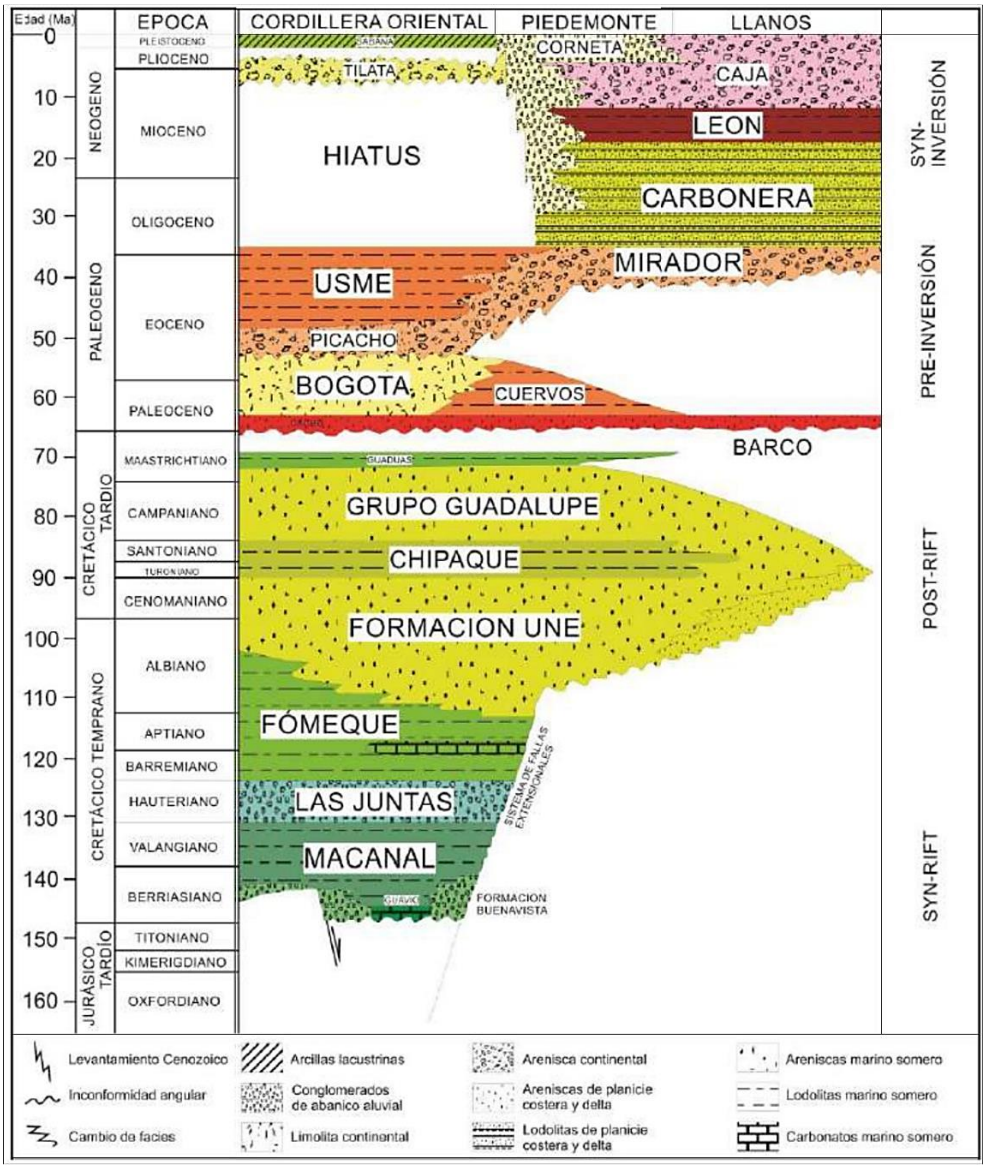


Figura 5. Columna estratigráfica correlacionando las formaciones de la cordillera Oriental, el piedemonte llanero y la cuenca llanos. Tomado y Modificado de Mora et al. (2006).

- **Formación Buenavista:** Formación del Cretácico inferior la cual Dorado (1984) documenta que estaría dividida en tres grupos, inicialmente en su parte más inferior compuesta por conglomerados que alcanzan tamaños de guijos, cantos y bloques, constituidos por fragmentos de rocas sedimentarias y metamórficas; el grupo de la mitad consta de una alternancia de brechas-conglomerados y el segmento más joven lo constituiría una alternancia de areniscas de grano grueso a fino y lodolitas; Sin embargo, en un estudio más detallado de Dorado (1990), aclara que la alternancia de grano fino y lodolitas son de la formación Lutitas de Macanal.

- **Lutitas de Macanal:** En la memoria explicativa del mapa geológico del cuadrángulo K-12 Guateque le asignan el nombre de formación Macanal y la describen como un conjunto homogéneo de lutinas negras con eventuales intercalaciones de calizas, areniscas y bolsones de yeso; según Ulloa y Rodríguez (1976) su sección tipo se encuentra en el cañón que forma a su paso el rio Batá. A pesar que autores como Hubach (1957), Renzoni (1968), y Dorado (1990) consideran que las Lutitas de Macanal no son una formación como tal, y la unen ya sea a la formación buena vista o dentro del grupo Cáqueza, Báez (2016) en su tesis de grado recomienda que se use el nombre formación Macanal, pero no como parte del grupo Cáqueza, debido a que "puede reconocerse independientemente de las formaciones infra y suprayacentes".

- **Formación las Juntas:** Ulloa y Rodríguez (1976) describen esta formación en la memoria explicativa de la cartografía del Cuadrángulo K-12 Guataque,

las identifican como dos niveles arenosos que están separados por un nivel de lutitas del Hauteriano y su sección tipo se estableció en el rio Batá, sin embargo, Báez (2016) menciona que la sección tipo se encuentra cubierta actualmente por el embalse la esperanza, por lo que Muñoz, Sarmiento y Montoya (1993) recomiendan usar la sección descrita por Aguirre y Candia (1998) en un previo privado o la sección tipo de la carretera Gachalá-Ubalá como sección de referencia primordial.

- **Formación Fómeque:** Hubach (1957) lo describe inicialmente como Conjunto Fómeque, para Terraza *et al*. (2013) esta formación consta de arcillolitas negras a gris oscuras, con poco carbón e intercalaciones de Wackstone, Grainstone (en menor cantidad), Mudstone terrígeno y lodolitas, su morfología es relativamente suave, sin dejar de lado algunas crestas, y sus dataciones van del Barreniano al Albiano.

- **Formación Une:** Hubach (1957) establece ese nombre y descubre su sección tipo en la carretera Bogota-villavicencio, justo entre los municipios de Chipaque y Caqueza, según Rodriguez (2000), esta formación está representado por escarpes muy pronunciados, incluso con estratificación casi vertical lo que Terraza et al. (2013) lo nombra como las cuchillas de Calichana. La formación consta en su mayoría de areniscas, cuarzosas, grises claras a blanco amarillentas, de grano muy fino a fino y con intercalaciones de lutitas oscuras Ulloa (1976).

- **Formación Chipaque:** Como la mayoría de las formaciones su nombre fue empleado en un inicio por Hubach (1957), la sección tipo que describe se encuentra en la población que lleva el mismo nombre de la formación, sobre la carretera que de Bogotá conduce a Villavicencio, por su parte Guerrero y Sarmiento (1996) levantan una sección de esta formación sobre el piedemonte llanero en la quebrada San Antonio, a 5 kilómetros del municipio de San Luis de Gaceno, en dirección Noroeste. Según Terrazas *et al.* (2013) esta formación se compone de lutitas negras con una que otra intercalación de calizas hacia la parte basal, ya en la parte superior las intercalaciones son de areniscas cuarzosas, grises claras a oscuras y de grano fino.

- **Grupo Guadalupe:** Nombre originalmente propuesto por Hetner (1882), sin embargo, solo la consideraba como un piso de una secuencia mayor; Sützer (1926) es el primero en determinarla como formación, posteriormente Hubach (1931) lo divide en un conjunto inferior arcilloso y uno superior arenoso; fue Renzoni (1962) quien elevó al rango de grupo Guadalupe, constituido por las formaciones: Arenisca dura, plaeners, labor y tierna. Luego de esto varios autores definen varias secciones tipo al Este de Bogotá, en el páramo de El rajadero, e incluso en el piedemonte llanero en la quebrada San Antonio. Según Guerrero y Sarmiento (1996) tiene un espesor aproximado de 565m (medido en el piedemonte llanero) y Perez y Salazar (1978) mencionan que consta de areniscas intercaladas secuencialmente con limolitas, arcillolitas, lodolitas, con laminaciones plana paralelas.

- **Formación Guaduas:** Debe su nombre al valle del rio Guaduas, y fue propuesto por primera vez por Hetner (1982); la describe con unos estratos de lodolita con intercalaciones carbonosas que están por encima del grupo Guadalupe, Baez (2016) recomienda que no sea asociada como parte del grupo Palmichal o guadalupe, ya que esta formación tiene características diferentes.

- **Formación Barco:** Datada del paleoceno inferior como muestra la figura.; Ulloa y Rodriguez (1979) la incluyen como la formación más joven del grupo Guadalupe, Ramirez (2011) la describe como una formación constituida por areniscas de grano medio a grueso, con estratificación cruzada; en la parte inferior con intercalaciones de arcillas grises.

- **Formación Cuervo:** Depositada en el periodo que va desde el Paleoceno medio hasta parte del Eoceno temprano, con un espesor aproximado de 150m según Ulloa y Rodriguez (1976); para ECOPETROL (1999) en la base de la secuencia son areniscas con intraclastos, restos de materia orgánica y carbonosa; luego siguen dos grupos, el segmento inferior se caracteriza por material arcilloso a lodoso rico en materia orgánica y el superior compuesto por areniscas y lodolitas interpuestas.

- **Formación Mirador:** De edad Eoceno superior, con espesor de 200m en su sección tipo descrita cerca del caserío El limbo según Hubach (1957); predominantemente cuarzoarenitas blancas, con laminación plana paralela, inclinadas y en artesa. Para el área de Medina-Cusiana esta formación está constituida por 3 segmentos; tanto el inferior como el superior constan de

areniscas con intercalaciones menores de lodolitas, y separados por el nivel medio constituido por lodolitas masivas con presencia de delgadas capas de carbón y restos de materia orgánica (raíces y plantas) ECOPETROL (1999).

- **Formación Carbonera:** Redefinida para Colombia en la quebrada que lleva su mismo nombre, de edad Oligoceno y con un espesor aproximado de 1000m según Ulloa y Rodriguez (1979). Esta formación comprende alternancia de areniscas, arcillolitas grises, limolitas y carbones, los carbones se encuentran en la parte inferior y en la parte superior predominan las capas de areniscas con espesores entre uno y 30 metros.

- **Formación León:** Datada en el Mioceno y con un espesor aproximado de 400m según Ulloa y Rodriguez (1979); Constituida principalmente por capas gruesas de lutitas grisaseas intercaladas con lutitas, limolitas y esporádicamente areniscas de grano fino granodecreciente, bioturbación y con abundante materia orgánica.

- **Formación Guayabo:** Datada entre el mioceno superior y el Plioceno Parra (2008), para INGEOMINAS denominada como la formación Caja, nombre dado por Van der Hammen (1960) por su sección tipo, localizada en el rio Caja, al oeste del municipio de Tauramena, donde se registra un espesor aproximado de 3000m.

- **Cuaternarios:**

- **Aluviales (Qal):** Depósitos que se localizan en las márgenes de los drenajes, su morfología es plana, clastos redondeados a subredondeados.
- **Coluviales (Qc):** Depósitos de talud y derrubios; están compuestos por acumulaciones de materiales de composición heterogenea y de tamaños diferentes.

2.2.1.2. Estructural. Para la parte central del piedemonte llanero, en donde se localiza el área de estudio, la geología estructural está definida por un sistema de fallas y plegamientos activos, que limitan el cratón con el flanco de la cordillera Oriental. Las fallas son en su mayoría inversas, en dirección NE y con vergencia hacia los llanos como se evidencia en el siguiente bloque diagrama.

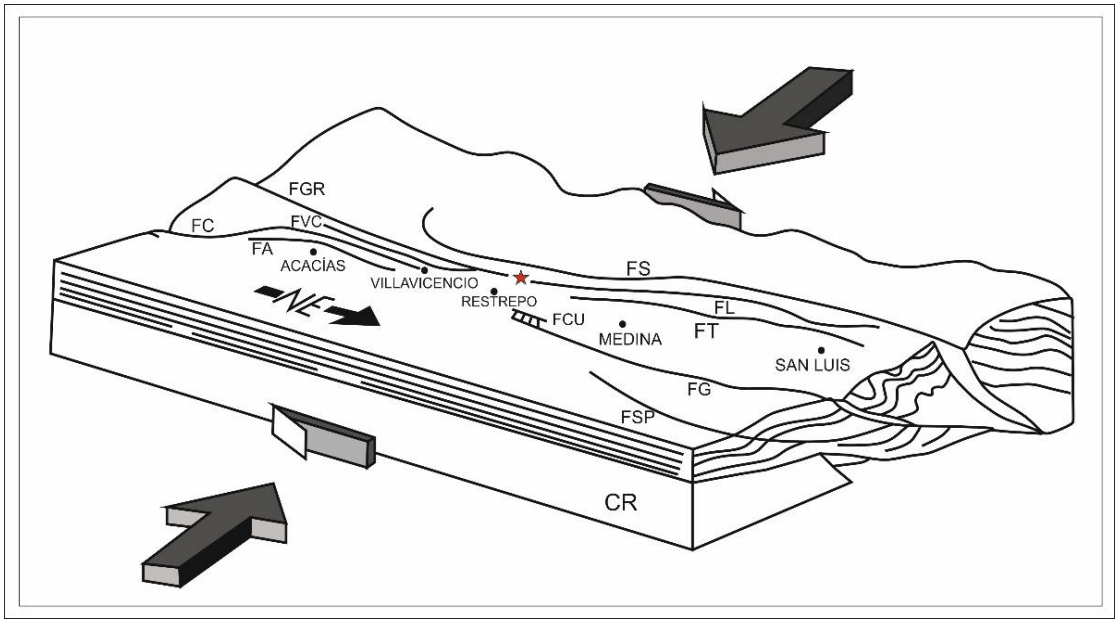


Figura 6. Bloque diagrama de las principales fallas del Sector Central del Piedemonte Llanero. CR: Cratón. FA: Falla de Acacías. FC: Falla Colonia. FCU: Falla Cumaral. FG: Falla de Guaicaramo. FGR: Falla Guayuriba-Restrepo. FL: Falla Lengupá. FS: Falla Servitá. FSP: Falla de San Pedro-Yopal. FT: Falla Tesalia. FVC: Falla Colepato. Área de estudio Tomada y modificada de Taboada, C. et al. (1998).

A continuación, se describen las estructuras más importantes de la zona central del piedemonte llanero y las más cercanas a la zona de estudio.

- **Falla de Servitá:** Es una falla inversa que se extiende por 60km, orientada N45°E, buzando al NW, y con un componente de rumbo dextral. Tiene una zona de falla amplia de unos 200 m, que origina terrenos muy inestables siendo causante de movimientos de remoción en masa muy importantes en la parte alta del curso del río Upín. Restrepo *et al.* (2015).

- **Falla Guayuriba-Restrepo:** Es una falla inversa, de 12 km de longitud, con una orientación N45°E, con buzamiento al NW. Esta falla afecta el abanico aluvial de Restrepo, con dos escarpes de 25 m aproximadamente. Robertson (1989).

- **Falla mirador:** Esta es una falla inversa orientada N35°E y buzando al NW, con un componente de rumbo dextral, se extiende por alrededor de 60 km, según Lobo y Guerrero (1988) en la zona de la quebrada el Susumuco la falla tiene una apertura de 60m en lo que denominan el deslizamiento de El mirador.

- **Falla Colepato:** La falla Colepato es inversa con una orientación N50°E, con un buzamiento aproximado de 30°W y cuenta con 40 km de extensión. Según INGEOMINAS (1996) la falla muestra una actividad reciente en un tramo de 15 km.

- **Falla de Cumaral:** Es una falla de cabalgamiento de 60km de longitud, con rumbo N45°E, buzando al W, Robertson (1989) menciona que cerca de Cumaral, se distinguen cuatro niveles de terrazas atravesados por un escarpe de falla con salto vertical de 35m.

- **Sinclinal de Servitá:** Es una estructura que conserva la dirección de la mayoría de estructuras del piedemonte llanero. Está limitado por la falla que lleva su mismo nombre y por la falla quebrada negra, y está ligeramente afectada por la falla La campana, según Restrepo *et al* (2015) El eje del sinclinal marca, al sur del Guacavía, el curso de la quebrada Agua Blanca y se prolonga luego hacia el suroeste dentro de la Plancha 266 Villavicencio, hasta quedar cortado su flanco noroccidental por la Falla de Servitá y terminando muy posiblemente sobre la gran falla transversal de Palermo, sobre el curso del río Guayuriba.

2.2.2. Geología Local. El área de estudio donde se realizó la adquisición de las líneas sísmicas y las tomografías eléctricas se encuentra sobre la formación lutitas de Macanal, y muy cerca de un cuaternario aluvial como se muestra a continuación en la figura7.

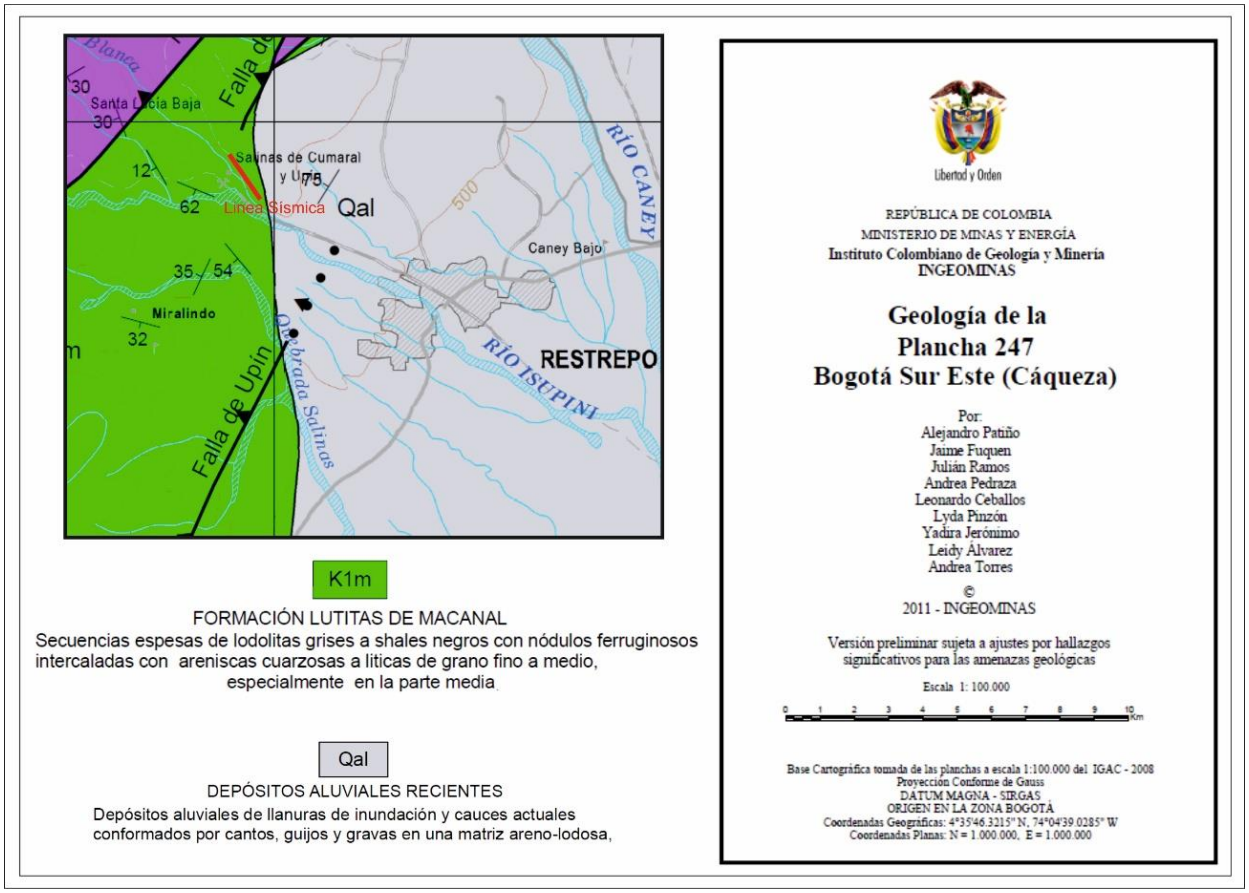
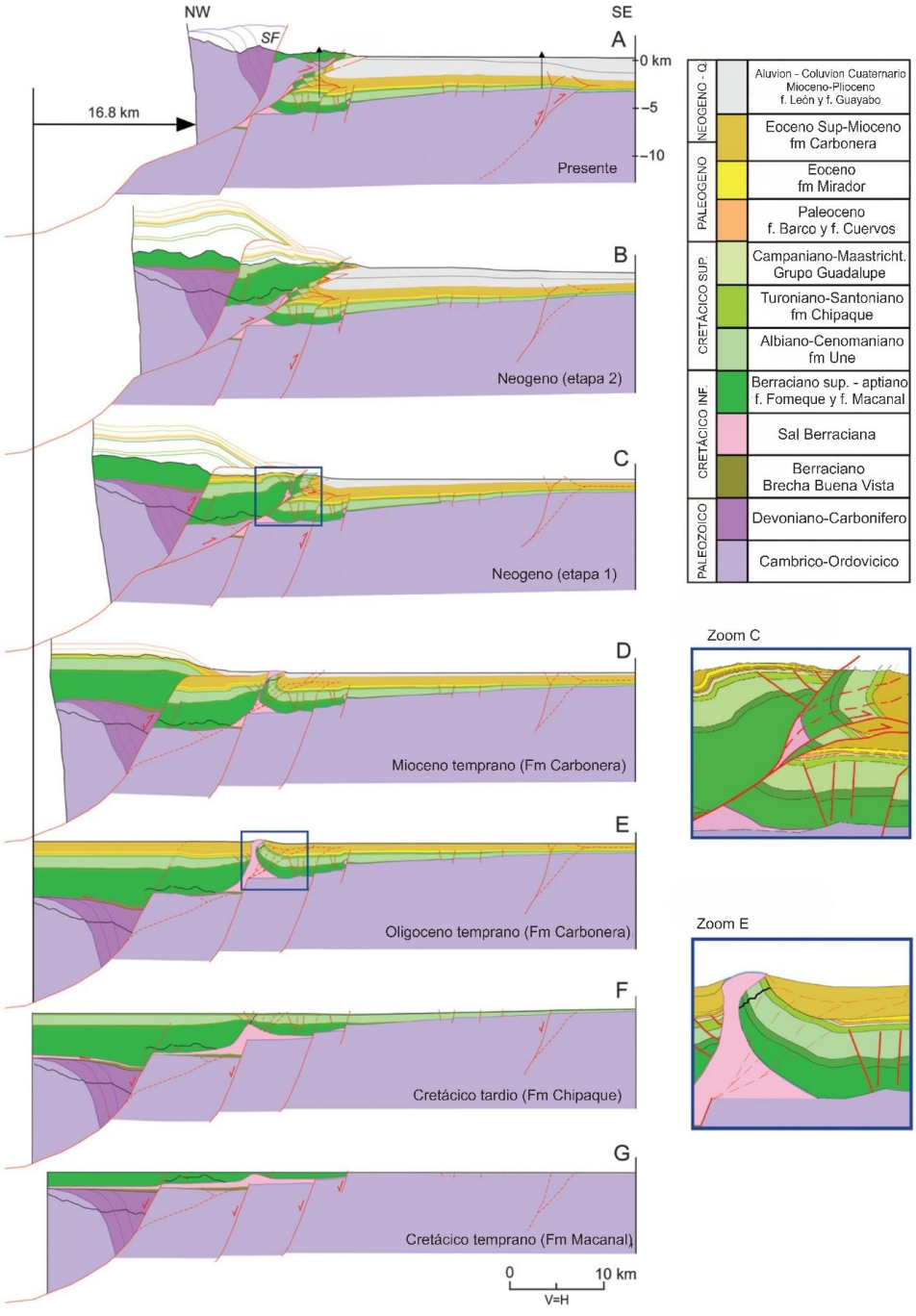


Figura 7. Mapa geológico modificado 1:100 000 de la zona de estudio resaltando la ubicación de la línea sísmica. Tomado y Modificado de INGEOMINAS. (2011).

Como se explicó en la geología regional la formación lutitas de Macanal está conformada por secuencias de lodolitas grises a shales negros, intercaladas con areniscas cuarzosas que van desde grano fino a medio que se ven afectadas por encontrarse en la zona de falla de Upin, sin embargo un estudio realizado por la firma Geoinvestigaciones para delimitar el domo del yacimiento de sal gema de Upín mencionan que en la formación lutitas de Macanal se emplazan una serie de estructuras salinas, las cuales antes de Parravano y Mora (2015) no se tenía evidencia en el ámbito regional al desarrollar la evolución del piedemonte llanero. Para Parravano et al (2015) en el cretácico inferior se da una depositación de sedimentos marinos entre las cuales se encuentran evaporitas que pese a lo que otros autores omitan, condicionan el desarrollo estructural del piedemonte llanero, además una serie de sondeos eléctricos (SEV) a

nivel de detalle realizados por Geoinvestigaciones (2014) fueron interpretados y se desarrollaron dos modelos geológicos del subsuelo donde queda constatado la presencia de sal en esta zona del piedemonte. (ver figura 8)

Figura 8. Modelo de evolución estructural local de la zona de estudio evidenciando la influencia de la tectónica salina en el desarrollo estructural del piedemonte llanero. Tomado y Modificado de Parravano et al (2015).



2.3. Geofísica

Para conocer la información del subsuelo en la campaña de campo se utilizaron técnicas como sísmica de reflexión, sísmica de refracción y tomografías eléctricas, las dos primeras se basan en la el desarrollo e interpretación de ondas acústicas en el subsuelo y la última trabaja con las propiedades eléctricas del subsuelo.

2.3.1. Sísmica de reflexión somera. Los principios de la sísmica de reflexión somera son los mismos que la sísmica de reflexión usada para la exploración petrolera, y aunque es una técnica relativamente nueva comparada con la que se utiliza en la industria de hidrocarburos, si se realiza correctamente puede ofrecer información valiosa del subsuelo.

La reflexión utiliza todas las ondas que se han reflejado en los estratos del subsuelo que presenten contrastes de propiedades elásticas y acústicas, detectándose en cada punto de la superficie las reflexiones generadas en todas las interfaces del paquete geológico, lo que permite obtener una imagen casi completa del subsuelo, sin embargo, por la calidad de los datos se decidió tomar velocidades a partir del modelo de refracción.

El método sísmico de reflexión se deriva principalmente de dos principios, el de Huygens que considera un frente de onda que incide sobre una interface plana y la ley de Snell que proporciona información sobre las trayectorias de los rayos, los tiempos de llegada y la posición de los reflectores, sin referir información sobre las amplitudes de las ondas y establece que el seno del ángulo de la onda incidente será igual al seno del ángulo de la onda reflejada:

$$Sen\ i = Sen\ r$$

Por su parte, el frente de onda al llegar al límite entre dos niveles cuyas velocidades son diferentes, una parte de la energía se refleja (propagándose por el medio incidente) y el tiempo total de la trayectoria es definido por el tiempo transcurrido para recorrer la distancia de la fuente (punto A) a la capa reflectora (punto B) y la distancia del mismo punto al receptor (punto C), con una velocidad promedio de propagación entre la superficie y la capa de reflexión. (Ver figura 9)

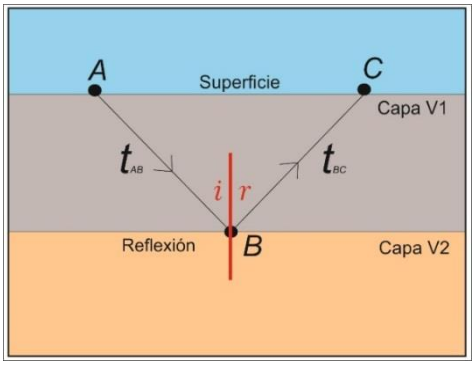


Figura 9. Diagrama de una trayectoria reflejada en el punto B, partiendo de A y detectada en C. Tomada y modificada de: Canales (2010).

Todas las señales que se obtienen en los receptores o geófonos, se conocen como trazas sísmicas, y para una correcta interpretación deben procesarse y ordenar las trazas por CDP (Common Depth Point), para concentrar toda la información de un reflector; al agrupar y tener todas las trazas se le denomina sección sísmica. (Ver figura 10)

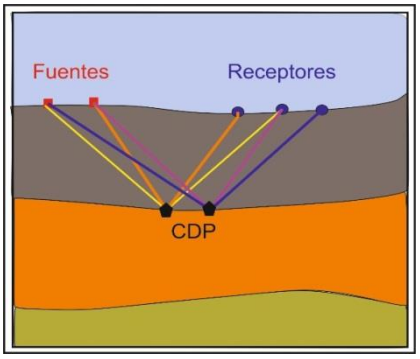


Figura 10. Reflexiones ilustrando puntos de reflejo común (CDP). Tomada y modificada de: Canales (2010).

En el procesamiento de los datos de sísmica de reflexión somera hay ciertos conceptos que se deben tener en cuenta para conocer el flujo de trabajo del mismo, a continuación, se explican cada uno de ellos en el orden en el que se realizaron en esta investigación.

- Offset: Distancia entre la fuente y el receptor.

- Fold: Cubrimiento o número máximo de trazas en un CDP, depende en su totalidad de la geometría de adquisición, y se debe tener cuidado porque con un fold demasiado alto, puede que se genere ruido que sea difícil de borrar, y con un fold bajo puede que no se resalten bien los reflectores.

- Filtrado: Elimina las frecuencias altas o bajas que se consideran ruido aplicando filtros Pasa-Alta y Pasa-Baja respectivamente.

- Normalización Amp: Es un proceso que normaliza las amplitudes asemejando los valores obtenidos en los menores offset a los de mayores offset y así marcar eventos en trazas con menos energía.

- Análisis De Velocidad: El proceso de cálculo de la velocidad sísmica, generalmente mediante la utilización de datos de punto medio común, con el fin de procesar mejor los datos sísmicos. El éxito del apilamiento, la migración en tiempo y la migración en profundidad requiere información de velocidad adecuada. (Schlumberger Oilfield Glossary).

- Corrección Nmo: Es el procedimiento del procesamiento sísmico que implica la compensación por los efectos de la separación entre las fuentes sísmicas y los receptores en el caso de un reflector horizontal. (Schlumberger Oilfield Glossary).

- Correcciones Estaticas: Denominada a menudo corrección estática, se trata de una migración volumétrica de una traza sísmica en el tiempo durante el procesamiento sísmico. Una corrección estática común es la corrección por intemperismo (meteorización), que produce una compensación por el efecto de una capa de material de baja velocidad sísmica cerca de la superficie terrestre. Existen otras correcciones proveen compensaciones por las diferencias existentes en términos de topografía y de elevaciones de fuentes y receptores. (Schlumberger Oilfield Glossary).

- Semblanza: Una medida cuantitativa de la coherencia de los datos sísmicos provenientes de múltiples canales, que es igual a la energía de una traza apilada dividida por la energía de todas las trazas que componen el apilamiento. Si los datos de todos los canales son perfectamente coherentes, o muestran continuidad entre una traza y otra, la semejanza es igual a la unidad. (Schlumberger Oilfield Glossary).

- Stack: Apilado de los datos donde se suman todas las trazas para minimizar los ruidos y resaltar los reflectores de un mismo CDP.

- Migración: Un paso del procesamiento sísmico en el que las reflexiones en los datos sísmicos se desplazan a sus localizaciones correctas en el espacio x, y,

tiempo de los datos sísmicos, incluido el tiempo de viaje doble (ida y vuelta) y la posición respecto de los puntos de tiro.

La interpretación sísmica es una herramienta de la geofísica que nos ayuda a definir la estructura del subsuelo, Herron (2011), menciona que la interpretación sísmica permite definir horizontes que se asocian a líneas de tiempo continuas, debido a que los reflectores representan la diferencia de impedancia acústica de cada medio (cambios de litología). Mitchum et al (1977) define tres factores importantes en la interpretación de una sección sísmica y lo ejemplifica con un modelo análogo.

- Continuidad: Parámetro por el cual un evento sísmico es definido y reconocido en trazas sucesivas, creando alineaciones que intuyen una continuidad lateral, lo que se asocia, a una homogeneidad de los estratos o niveles. (ver figura 11)

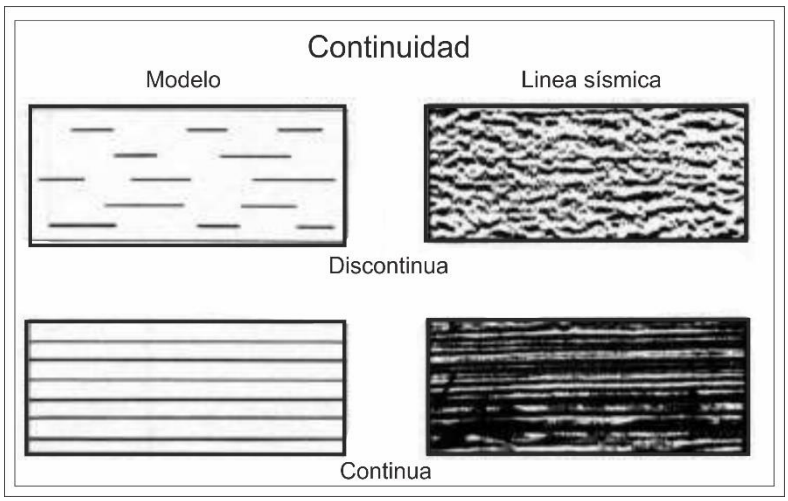


Figura 11. Modelo que ilustra el concepto de continuidad sísmica. Tomada y modificada de: Mitchum et al (1977).

- Amplitud: Es una función de los contrastes de impedancia acústica del medio o del espacio entre interfaces, varia con los cambios de impedancia acústica, sin

embargo, no se le puede definir una amplitud o un rango de amplitudes a una litología como en geoeléctrica. (ver figura 12)

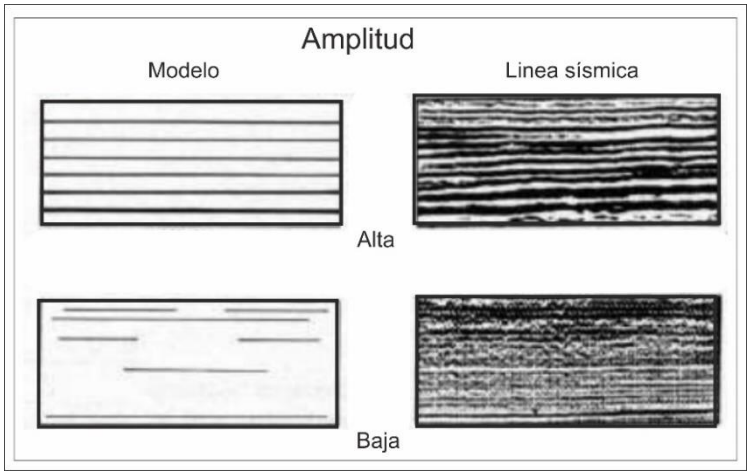


Figura 12. Modelo que ilustra el concepto de Amplitud sísmica. Tomada y modificada de: Mitchum et al (1977).

- Frecuencia: Está estrechamente relacionada con factores geológicos, por ejemplo: espaciamiento entre reflectores, cambios laterales de velocidad y la presencia de fluidos. (ver figura 13)

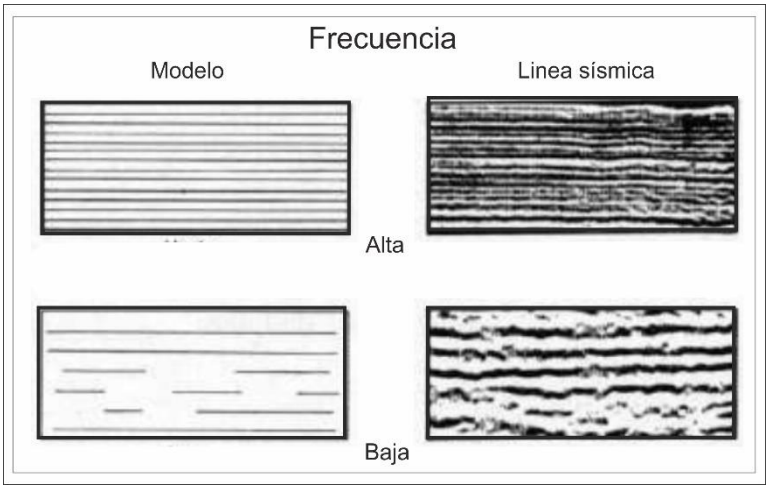


Figura 13. Modelo que ilustra el concepto de Frecuencia sísmica. Tomada y modificada de: Mitchum et al (1977).

3. Adquisición – Campaña De Campo

La campaña de campo realizada en el piedemonte llanero, flanco Sureste de la cordillera Oriental, más exactamente a 2,3 km de la cabecera municipal de Restrepo – Meta, en dirección Noroeste, área privada bajo la jurisdicción de la mina de sal de Upín se realizó durante 20 días calendario, donde se realizó una línea sísmica de reflexión por segmentos y dos tomografías eléctricas sobre la misma ubicación de la línea de reflexión. De los datos registrados para la línea de reflexión se extrajeron cinco disparos para procesar líneas de refracción con el fin de desarrollar un modelo de velocidades para posteriormente hacer la conversión de tiempo a profundidad. (Ver figura 14)

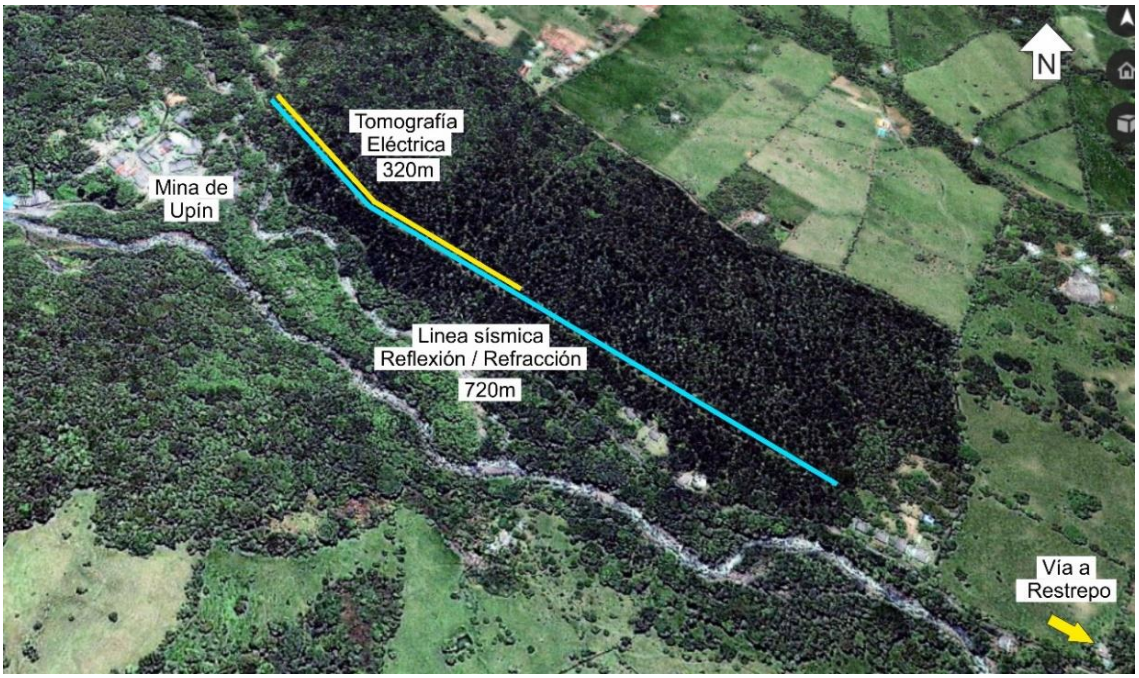


Figura 14. Ubicación de la línea sísmica y la tomografía eléctrica en relación con la Mina de sal de Upín. Tomado y Modificado de ArcGis Earth. Linea amarilla: Linea de tomografía eléctrica, Linea Azul: Lineas de sísmica de reflexión.

3.1. Sísmica De Reflexión.

3.1.1. Generalidades. Se definió realizar la línea de reflexión en dirección SE-NW perpendicular al tren estructural del piedemonte llanero por un sendero abierto en

medio de un bosque al Este de la mina de Upín como se observó en la figura 15 Con un equipo SeismeX16 proporcionado por la empresa SUBSUELO 3D a continuación descrito.



Figura 15. Equipo SeisMex16 utilizado en la investigación.

Sismógrafo SeisMex 16 canales
Fabricado por SUBSUELO 3D
Geófonos GeoSpace de 10 Hz
Cable sísmico (Amarillo) / Geófono Trigger (Azul)
Fuente: Martillo 18 Lb

Figura 16. Especificaciones técnicas equipo SeisMex16 utilizado en la investigación.

3.1.2. Geometría de adquisición. Debido a que la fuente no emite la energía necesaria para alcanzar mayores profundidades se debe organizar un modelo de adquisición el

cual permita tener la mayor profundidad posible con un buen *fold* (cubrimiento) (de más de 40 trazas por cdp) que se evidencie en la calidad de la imagen al final del procesamiento.

Se diseñó una geometría de adquisición (ver figura 17) donde se colocaban los geófonos espaciados 8m uno del otro, y se realizaban 9 disparos con una diferencia entre ellos de 16m empezando 12m atrás del primer geófono, a esto se le llamó “tanda”, al finalizar se corría todo el tendido 8m a la derecha y se volvía a hacer lo mismo hasta completar 9 tandas, formando lo que denominamos “línea”; al estar en la última tanda de la línea 1, solo se movían los primeros 8 geófonos al final del tendido para comenzar con la línea 2 y repetir el proceso (ver figura 18) , así hasta la línea 5 donde finalmente alcanzamos los 720 metros aproximadamente.

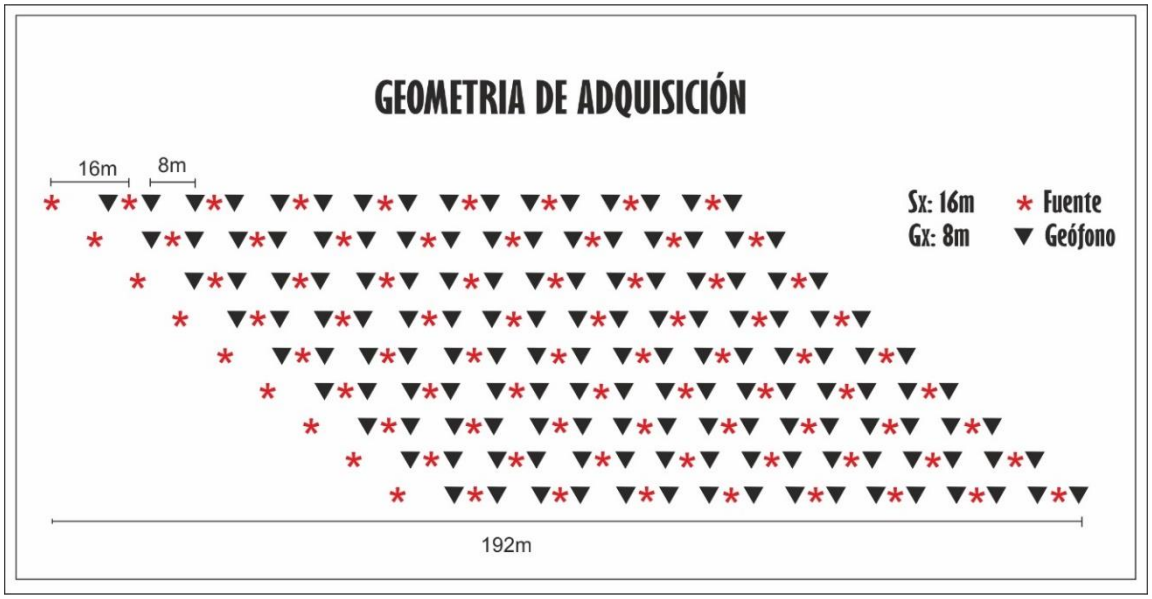


Figura 17. Geometría de adquisición para la línea de reflexión resaltando las características de la misma.

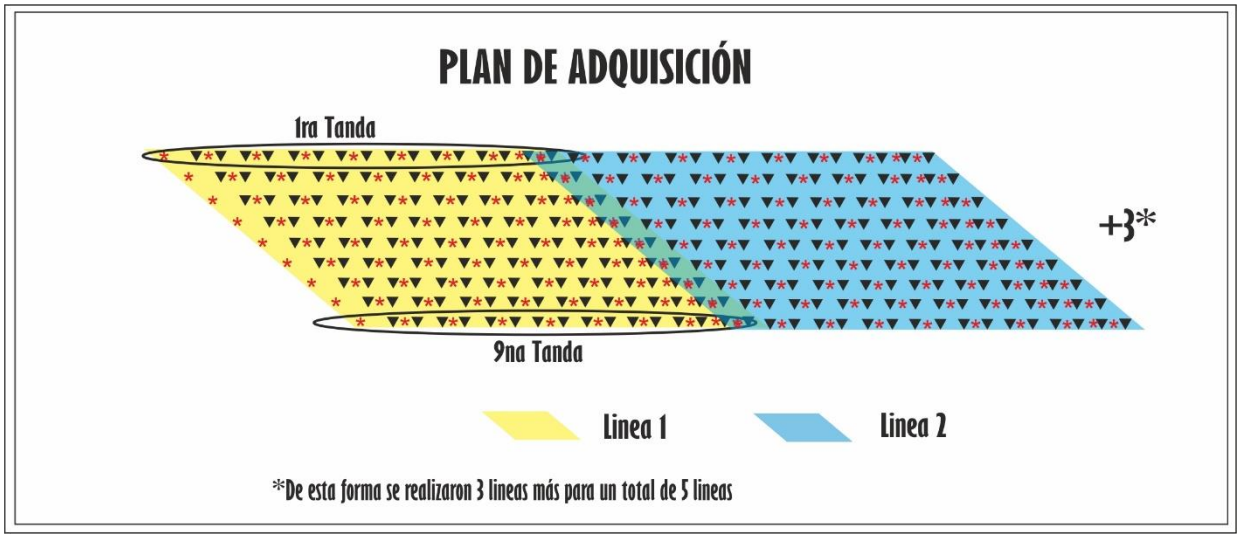


Figura 18. Geometría de adquisición relacionando los conceptos de "tanda" y "línea".

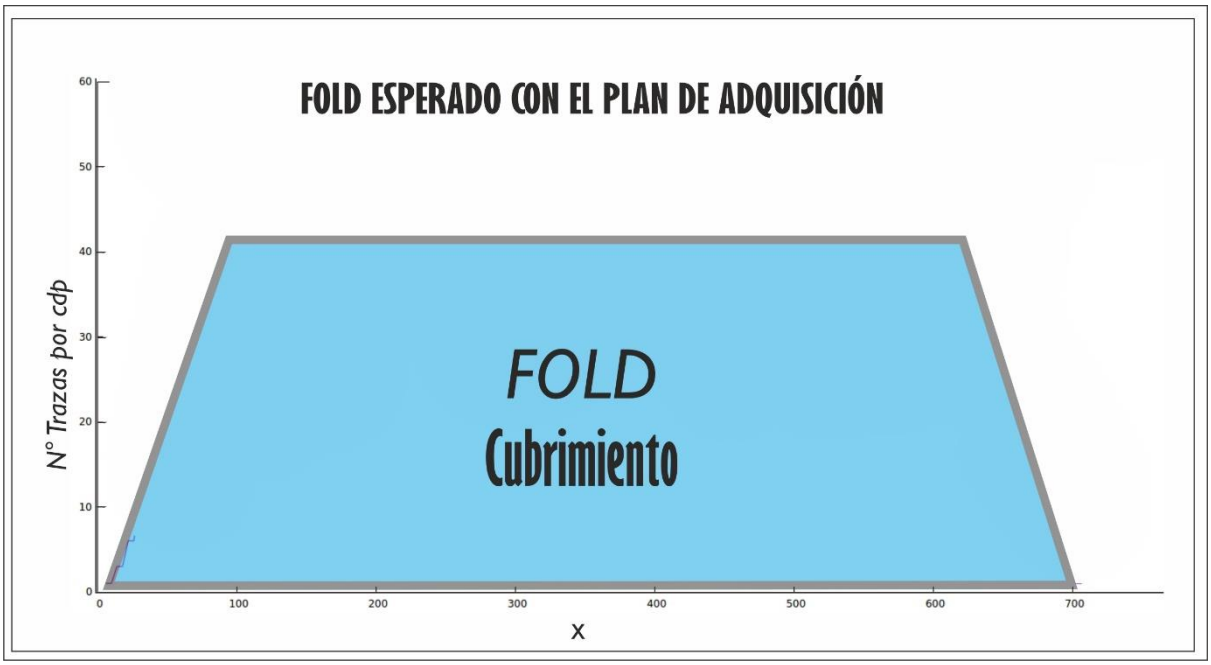


Figura 19. Representación gráfica del Fold esperado con el tipo de adquisición realizada.

3.2. Sísmica De Refracción.

De los datos obtenidos para la sísmica de reflexión se tomaron los disparos 1 (perfil), 3, 5, 7 y 9 de la primera tanda de cada una de las 5 líneas para procesarlos y obtener modelos de capas de velocidades para migrar la sísmica de tiempo a profundidad.



Figura 20. Geometría de adquisición para la línea de refracción resaltando las características de la misma.

3.3. Tomografía Eléctrica

3.3.1. Generalidades. Se definió realizar la tomografía eléctrica sobre la ubicación de la línea sísmica para correlacionar los resultados después del procesamiento, la tomografía se realizó con un equipo de Geoeléctrica a continuación fotografiado en la figura 21 de 32 electrodos facilitado por la compañía SUBSUELO 3D distanciados a 10 metros uno de otro, dando un total de 320 metros, un poco menos de la mitad de la línea de reflexión.



Figura 21. Equipo Geoeléctrica utilizado para las tomografías eléctricas.

3.3.2. Geometría de adquisición. La geometría de adquisición que se usó fue el tipo schlumberger y la distribución de los electrodos es como se muestra a continuación en la figura 22.

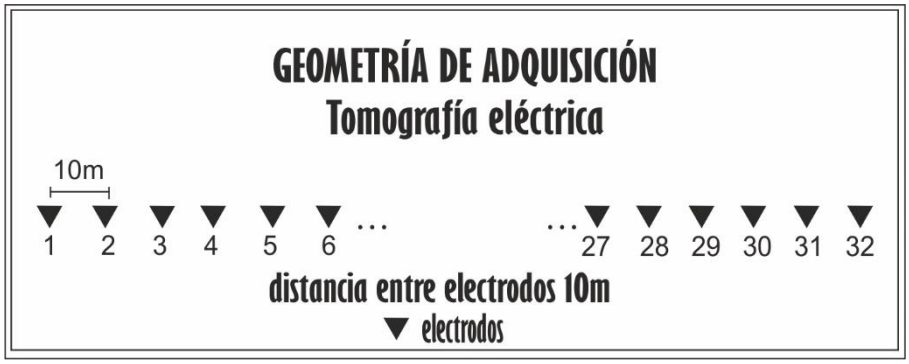


Figura 22. Geometría de adquisición para la tomografía eléctrica.

4. Procesamiento

La fase de procesamiento se ha dividido en tres etapas principalmente: La primera etapa consiste en el procesamiento de la sísmica de refracción para obtener el modelo de velocidades, esta etapa no se explicara ya que no hace parte del trabajo de investigación, la segunda etapa y con más relevancia en el desarrollo de este trabajo consiste en el procesamiento de la sísmica de reflexión y finalmente para obtener datos corroborativos en profundidad se realiza el procesamiento de datos de tomografía eléctrica, en esta etapa se muestra solo se muestra la imagen ya procesada.

4.1. Procesamiento Sísmico De Reflexión

Para realizar el procesamiento de datos de reflexión somera es común utilizar los mismos programas que se utilizan para procesar los datos de reflexión profunda, es decir, los algoritmos con los que estos programas trabajan funcionan para el procesamiento en ambos casos. En este caso en particular se utilizó **SEISMIC UNIX**; un paquete de software libre creado por Center for Wave Phenomena (**CWP**) de Colorado School Of Mines (**CSM**) en los estados unidos y que ha sido utilizado ampliamente por la industria petrolera y la academia. Las rutinas de este software se ejecutan bajo el terminal sobre plataformas Unix, es decir, no posee una interfaz gráfica como los softwares de procesamiento comunes.

El objetivo principal del procesamiento de la información adquirida se basa fundamentalmente en el aprovechamiento de los eventos de reflexión que allí se registran para realizar una interpolación de eventos y poder determinar la geometría del subsuelo del área de interés, pero como los receptores además de registrar eventos de reflexión también pueden registrar otros eventos sísmicos que se superponen a las reflexiones y que se consideran ruido (Onda de superficie conocida como Ground Roll, Onda aérea, Ruido

coherente como frecuencias de redes eléctricas, ondas generadas por el paso de vehículos o por pastoreo de animales, etc.) se debe realizar un minucioso tratamiento de los datos donde se aplican una serie de filtros seguido de los pasos comunes del procesamiento para así eliminar este ruido que no es relevante para obtener una imagen sísmica aproximada del subsuelo, de igual forma, debemos ser extremadamente cuidadosos y utilizar los filtros adecuados para evitar eliminar frecuencias que hacen parte de los eventos de reflexión.

Fases básicas del procesamiento realizado

4.1.1. Grabación de la información y conversión de los formatos. La información de los disparos fue grabada en formato **SEGY**; este formato es el utilizado globalmente para la grabación de información sísmica de reflexión en la exploración de hidrocarburos debido a la creación y estandarización de este realizado por la Society of Exploration Geophysicists (**SEG**). Posteriormente para poder trabajar con la información adquirida en el software **SEISMIC UNIX** se debió hacer la conversión a su propio formato **SU** con la rutina ***segyread*** (Ver apéndice A).

4.1.2. Organización de los datos en el software SEISMIC UNIX. Ya que cada disparo realizado en campo es un archivo **SEGY y se tenían aproximadamente 400 archivos individuales**, se tuvo que organizar cada uno estos de manera que quedaran ubicados espacialmente de la forma correcta en la geometría diseñada para la línea sísmica, esto se logró concatenando y/o sumando cada archivo utilizando las rutinas ***cat*** y ***susum*** respectivamente por medio de un ***Script*** creado previamente para optimizar el tiempo requerido para este paso (ver apéndice B), de esta forma podríamos visualizar las trazas contenidas en cada disparo según su ubicación (Ver figura 23), de igual forma se verificaron las cabeceras dentro del fichero del archivo final general (rutina ***surange***)

con el fin de corroborar los parámetros de adquisición ya definidos y llevar a cabo el proceso sin inconvenientes (Ver figura 24).

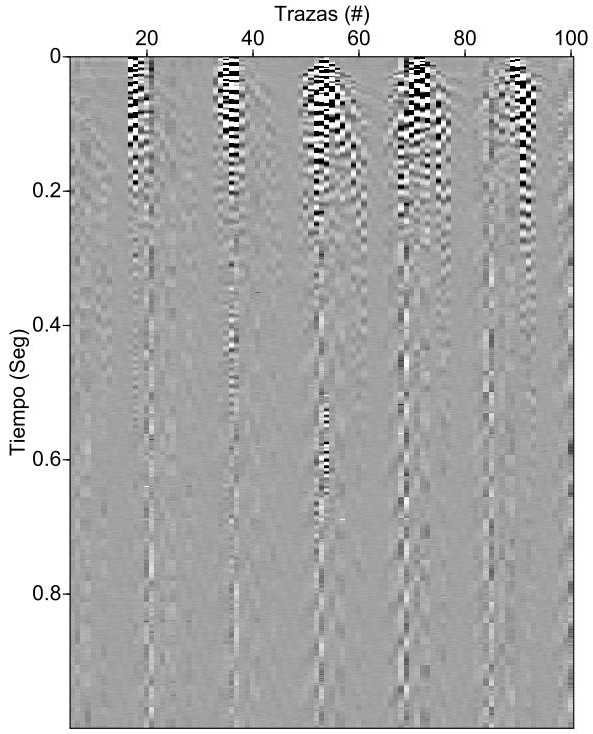


Figura 23. Dato sísmico mostrando algunos de los 405 disparos realizados en la fase de adquisición, en este punto el dato sísmico se encuentra sin tratamiento.

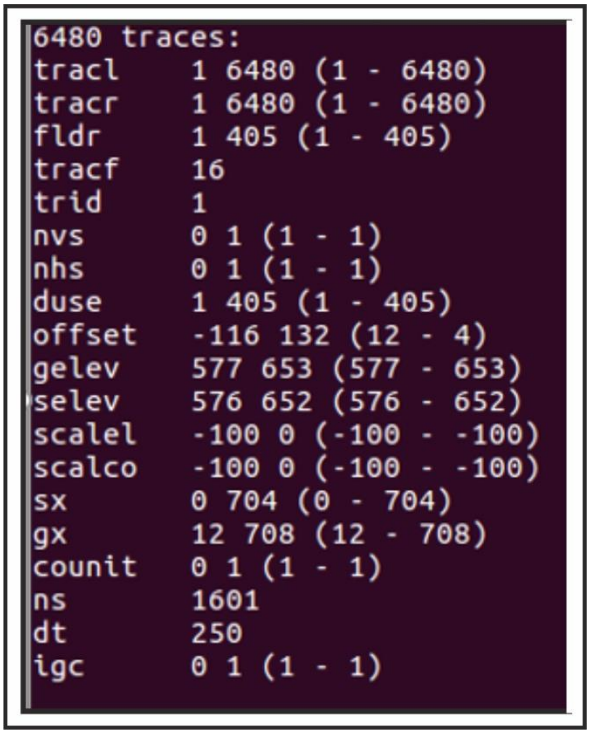


Figura 24. Fichero con las cabeceras que muestran la información de los parámetros de adquisición definidos en la fase de planeación. Tracl & Tracr: Numero de trazas del dato, Fldr: Numero de disparos, Tracf: Numero de receptores activos por disparo, Offset: Distancia entre la fuente y cada receptor, Gelev: Elevación del receptor (Geófono), Selev: Elevación de la fuente, Sx: Coordenada en la horizontal de la fuente, Gx: Coordenadas en la horizontal de los receptores, Ns: Numero de muestras por intervalo, Dt: intervalo de muestreo en tiempo (mseg).

4.1.3. Filtrado. Durante el proceso de adquisición los receptores graban información considerada como ruido, este ruido es grabado bajo valores de frecuencias, estas frecuencias pueden ser de cualquier valor y nos pueden representar serios problemas para la interpretación posterior al procesamiento si no son eliminadas correctamente. Ya que la información grabada se encuentra en el dominio del tiempo, se debe realizar una operación matemática para pasar esta información al dominio de la frecuencia y poder determinar cuáles frecuencias son las que deben ser eliminadas, esto se realizada mediante la Transformada de Fourier donde el algoritmo que la realizada se encuentra ya incluido dentro del software utilizado y se ejecuta mediante la rutina ***suspecfx*** en el terminal. En la figura 25 se observa la información en el dominio de la frecuencia.

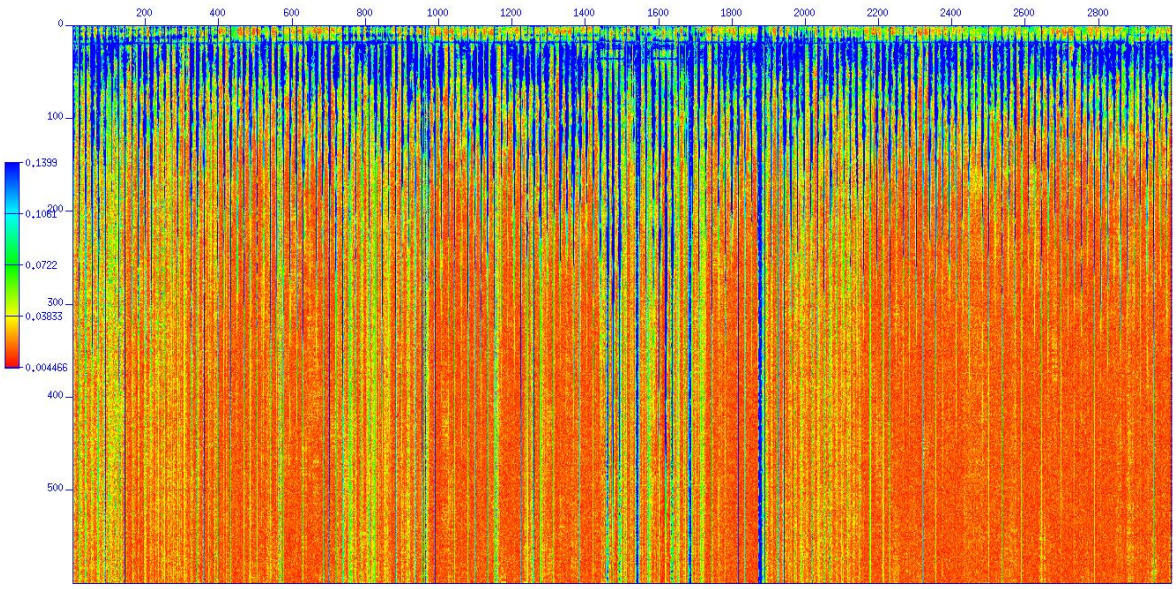


Figura 25. Información sísmica en el dominio de la frecuencia. Los colores mostrados en la imagen indican los valores de amplitud para todo el dato, azul: Valores positivos, Rojo: Valores negativos.

Se decidió suprimir las frecuencias por debajo de **15 Hz** ya que por encima de estas se empiezan a obtener eventos marcados correspondientes a posibles reflexiones y por ende esta información sería útil. Para suprimir este primer grupo de bajas frecuencias se aplicó un filtro denominado **PASA-ALTA** o encontrado en la literatura internacional como **HIGH-PASS FILTER**, como su mismo nombre lo indica este filtro permite eliminar frecuencias desde un valor determinado hacia valores que disminuyen con respecto a este y deja pasar sin modificaciones las frecuencias que se encuentran por encima o aumentando con respecto al valor determinado, el software multiplica por cero (0) los valores que se encuentran por debajo de dicho valor y por uno (1) los que se encuentran por encima, garantizando que los valores multiplicados por uno (1) se mantengan sin ninguna modificación (Ver figuras 26 y 27).

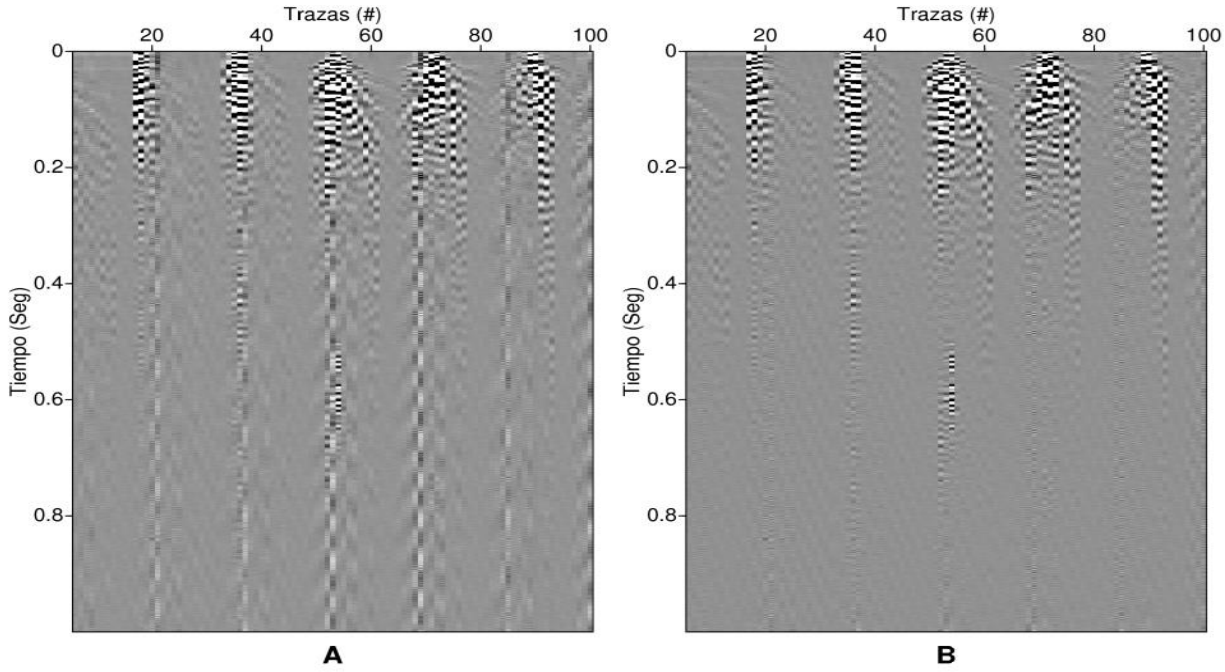


Figura 26. Comparación entre el dato con frecuencias bajas (A) y el dato sin frecuencias bajas (b) después de aplicar filtro Pasa-Alta.

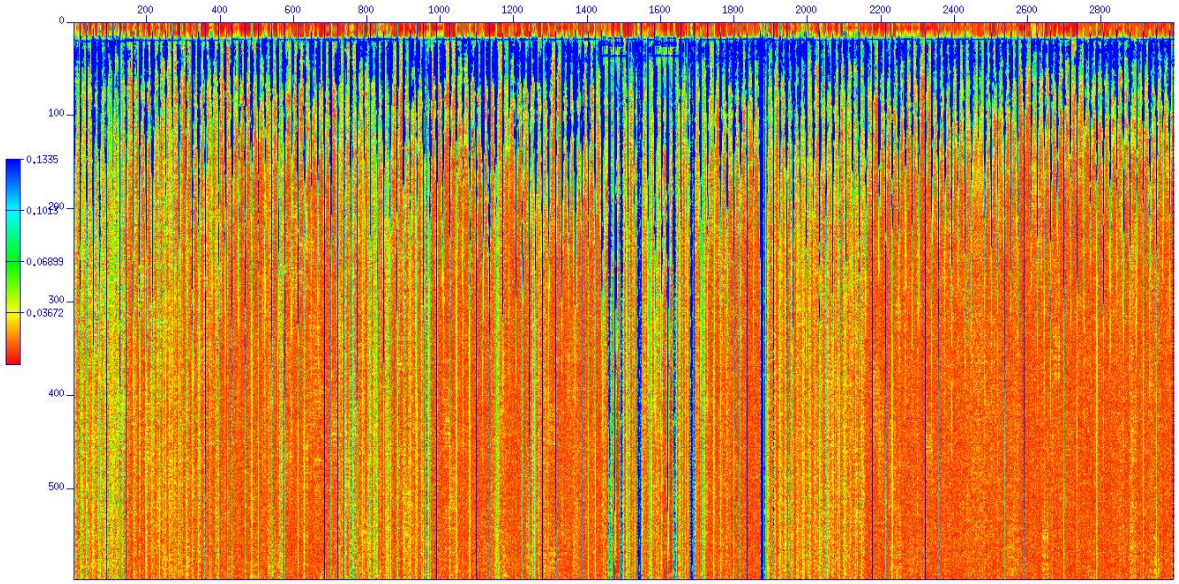


Figura 27. Dato sísmico en el dominio de la frecuencia luego de aplicar filtro Pasa-Alta.

Posteriormente se decidió eliminar las frecuencias por encima de **250 Hz** ya que estas se tornaban monótonas a medida que aumentaban su valor y por ende representarían ruido, para eliminar este ruido se aplicó otro filtro, este filtro es conocido como **PASA-BAJA** o **LOW PASS** encontrado en la literatura internacional. Este filtro

funciona con el mismo principio que el anterior explicado, pero en este caso los valores por encima del valor determinado son multiplicados por cero (0) para poder ser eliminados y los valores por debajo se multiplican por uno (1) para poder mantenerlos (Ver figuras 28 y 29).

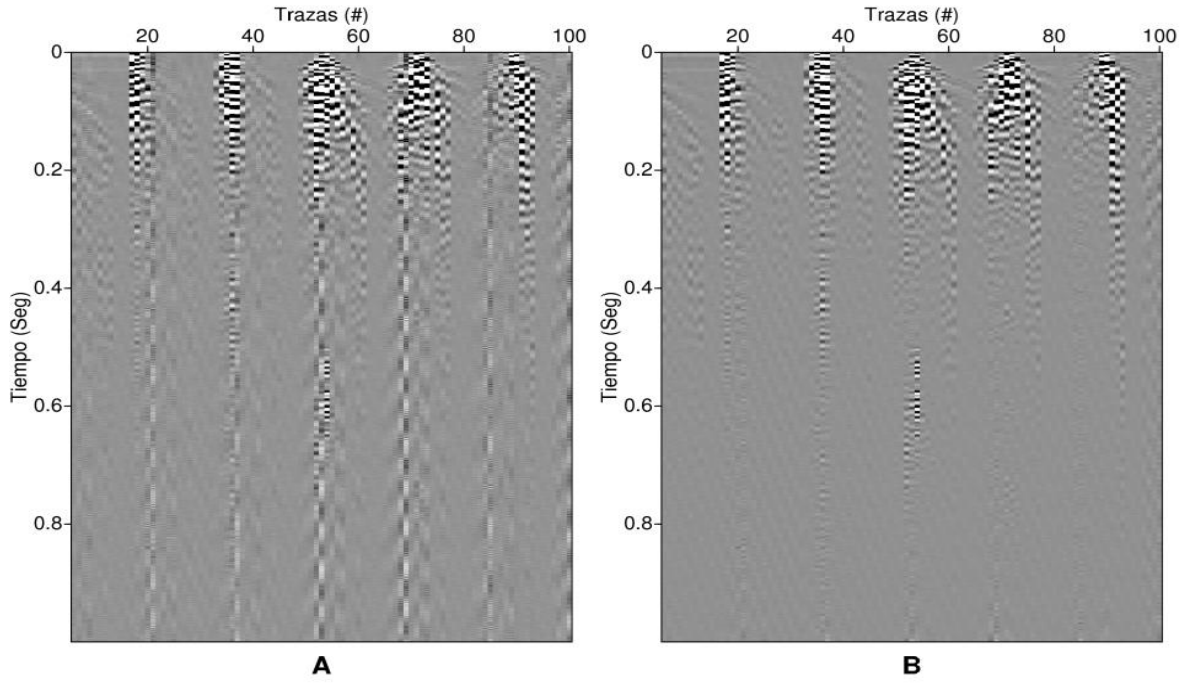


Figura 28. Comparación entre el dato con frecuencias altas (A) y el dato sin frecuencias altas (b) después de aplicar filtro Pasa-Alta.

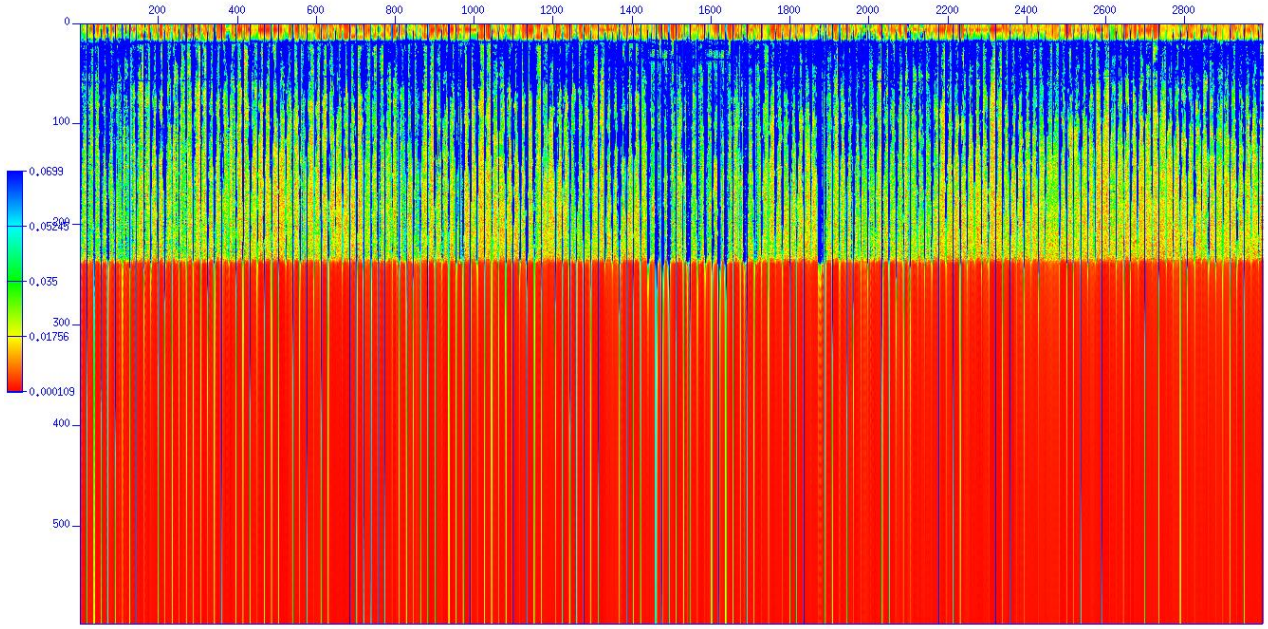


Figura 29. Dato sísmico en el dominio de la frecuencia luego de aplicar filtro Pasa-Baja

Para la eliminación de las frecuencias que me representan ruido se utiliza la misma rutina ***sufilter*** en el terminal, solo se deben modificar los valores de 1 y 0 dependiendo del grupo frecuencias que se quieran eliminar y conservar.

4.1.4. Normalización de la amplitud. Dentro de toda la información sísmica obtenida algunas trazas quedan grabadas con muy poca energía a medida que el offset aumenta.

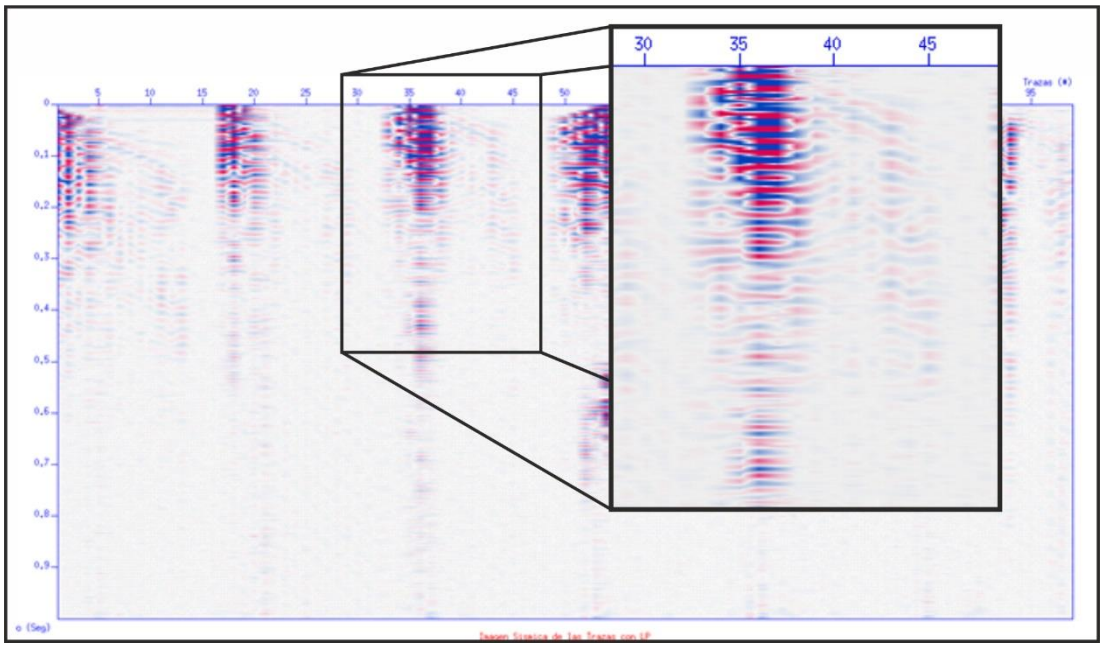


Figura 30. Dato sísmico mostrando la disipación de la energía hacia sus costados debido a la distancia entre la fuente y el receptor.

Esto es causado por una serie de fenómenos como disipación de la energía de la onda ya sea cuando esta atraviesa los medios, la larga distancia entre fuente y receptor o la mezcla de estos dos casos, entre otros. Es por esta razón que se realizó normalización de las amplitudes con la rutina ***sunormalize***, con el fin de asemejar valores de amplitudes obtenidos en offsets cortos a los que se encuentran con mayor longitud y de esta manera poder ver los eventos mejor marcados en trazas donde se tenía baja energía (Ver figura 31).

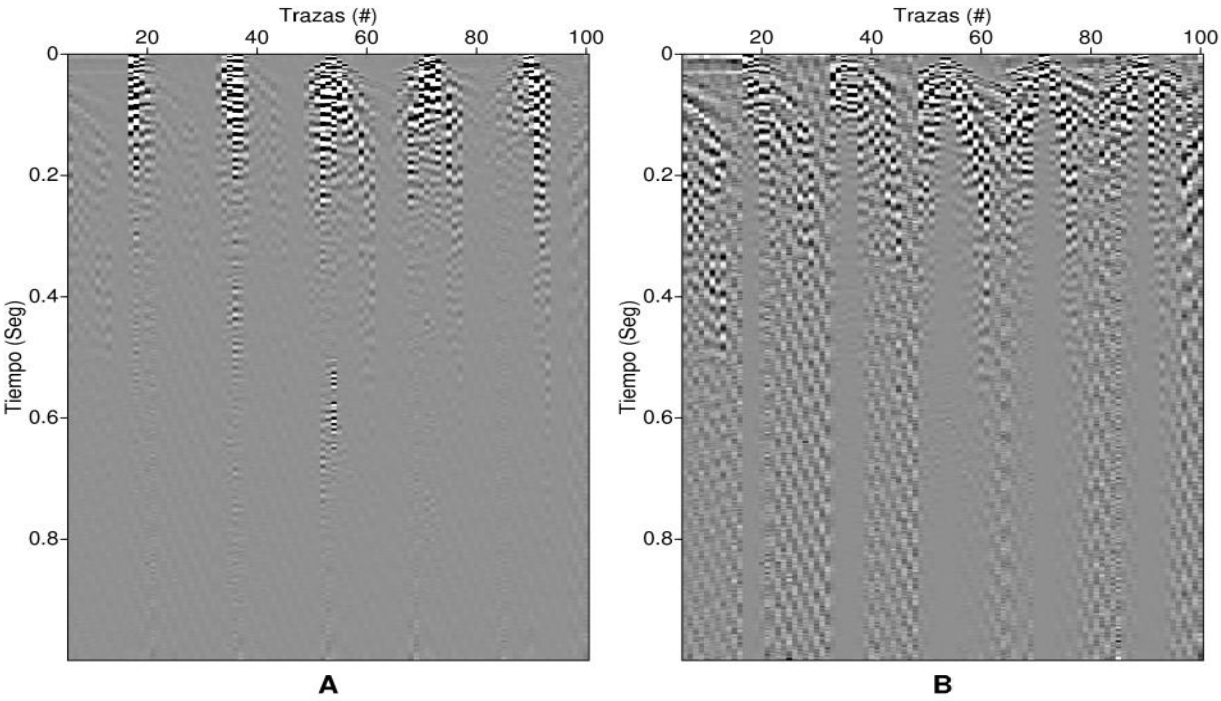


Figura 31. Dato sísmico mostrando la disipación de la energía hacia sus costados debido a la distancia entre la fuente y el receptor.

4.1.5. Adición de cabera CDP y ordenamiento por CMP. Algunas cabeceras pueden ser creadas antes de comenzar el procesamiento o en pasos posteriores dentro de este mediante el comando ***suaddhead***, de igual forma se pueden crear cabeceras a partir de valores establecidos en cabeceras ya creadas, la cabecera ***cdp*** (Punto común en profundidad) se crea de esta forma como punto medio común **CMP** (Punto medio común) utilizando los valores de las cabeceras ***sx*** (posiciones de la fuente) y los valores de ***gx*** (posición de los receptores), esto se realiza con la rutina ***sushw*** donde el comando tiene la opción de hacer variar los valores en la nueva cabecera y así relacionarlos con los datos originales (Ver figura 32).

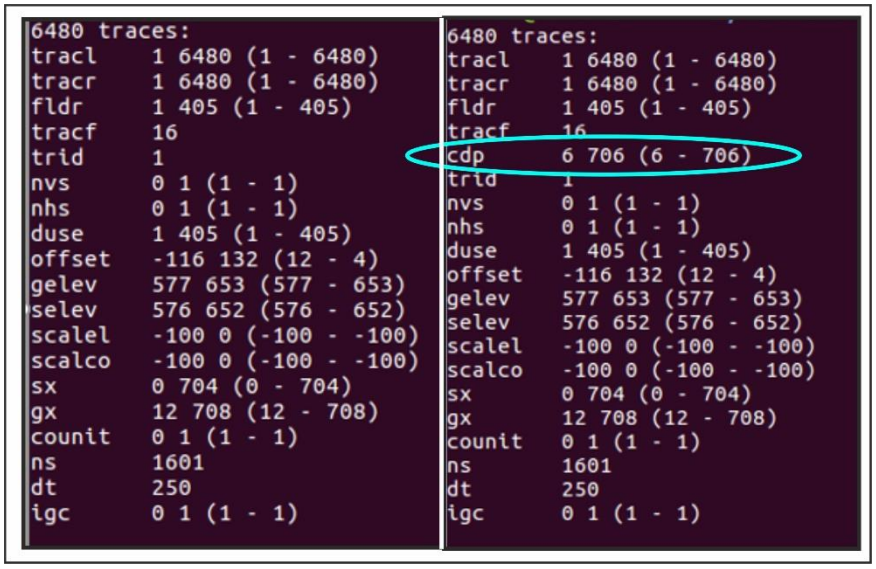


Figura 32. Fichero con la cabecera CDP sin agregar (Izquierda) y fichero con la cabecera CDP ya definida (Derecha).

Todas las trazas contenidas en el archivo sísmico obtenido originalmente fueron ordenadas según el valor de la cabecera ***cdp*** creada recientemente y el ***offset***, esto se logró mediante el comando ***susort,*** de tal manera que se puedan extraer todas las trazas que corresponden a un mismo punto medio en común y así poder realizar el análisis de velocidades (Ver figura 33).

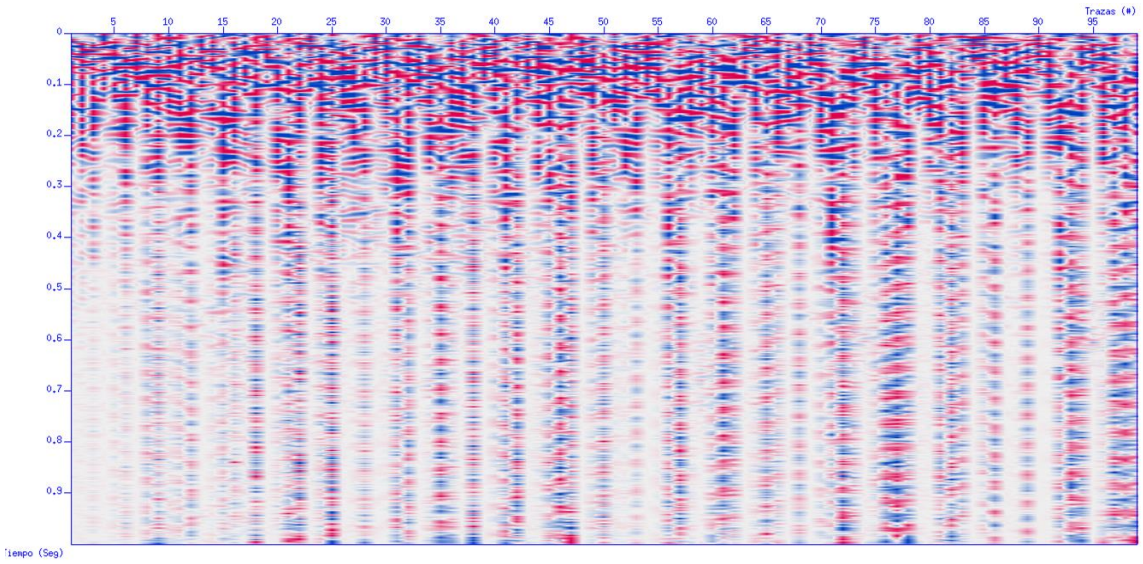


Figura 33. Imagen sísmica con la información ordenada por CMP’s.

4.1.6. Análisis de velocidades y corrección NMO (Normal Move Out). El análisis de velocidades se realizó por medio del ***Script*** presentado en Forel (2005) y como en los demás Scripts utilizados, estos requieren un dato de entrada que en este caso sería en archivo sísmico ya ordenado para poder realizarse el análisis de velocidades (Ver apéndice C).

Antes de entrar a realizar el análisis de velocidades, se verificó la cantidad de trazas que pertenecen a cada uno de los **CMPs** del archivo sísmico, esto se realiza con la rutina ***sukeycount***, posteriormente se realiza la gráfica de cubrimiento mejor conocido como **Fold** (Ver figura 34).

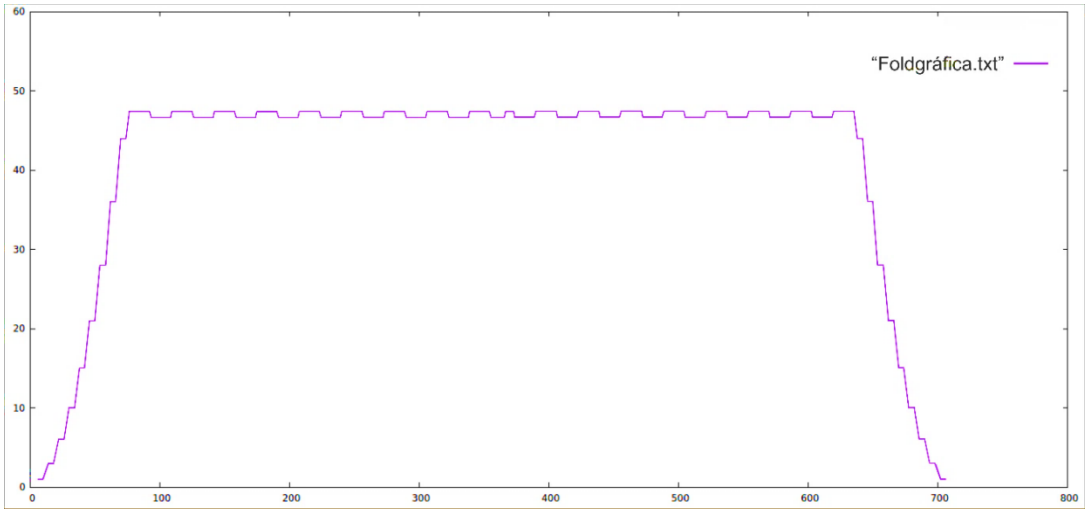


Figura 34. Cubrimiento sísmico determinado por el número máximo de trazas sísmicas en cada CMP.

Para realizar este análisis de velocidades con mayor precisión de escogieron los valores de CMPs que contenían el mayor número de trazas.

Este análisis de velocidades se realiza mediante la técnica de análisis de semblanza, implementada en el módulo de análisis de velocidades ***suvelan*** (Su Velocity Analysis***)*** en Stockwell y Cohen (2008). En la ventana que el software se visualiza el espectro de velocidades se deben escoger aquellas donde los valores de semblanza son los más

cercanos a 1 (Picado), esto me indica que las velocidades de apilado son las más adecuadas para cada uno de los eventos registrados dentro del **CMP** analizado (Ver figura 35).

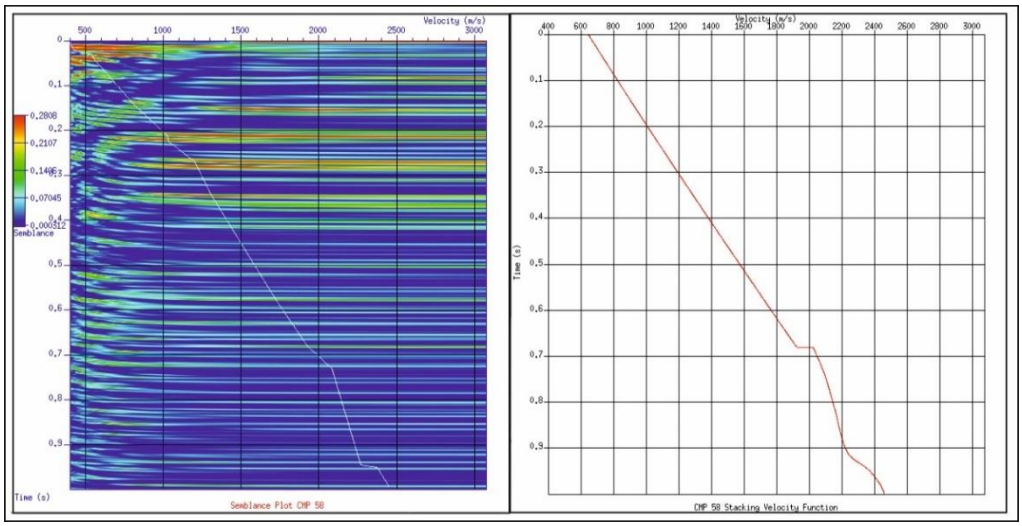


Figura 35. Imagen valores de semblanza para realizar el debido picado de velocidades (Izquierda) y función de velocidad construida posterior al picado de las velocidades (Derecha).

Cuando se termina de realizar el "picado" en cada uno de los **CMPs** con mayor número de trazas, el software genera un archivo de texto con valores de velocidades con un respectivo valor de tiempo, este archivo es utilizado posteriormente para aplicar la corrección **NMO** al archivo sísmico ordenado por **CMP** (Ver figura 36)

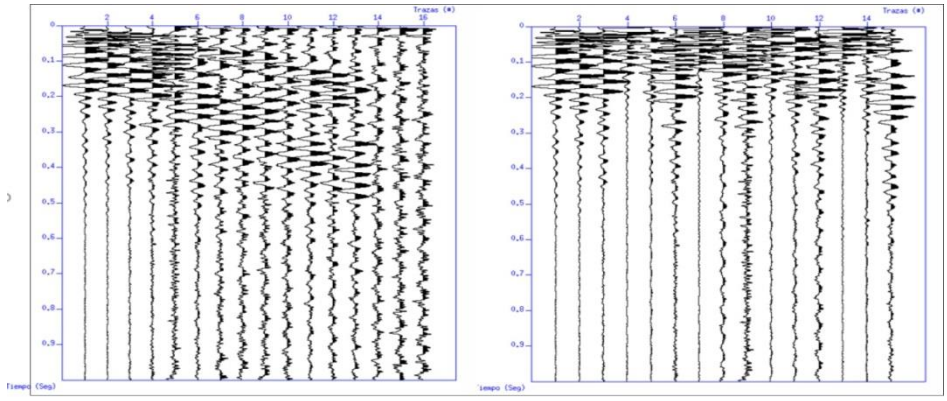


Figura 36. Trazas sin corrección NMO (Izquierda) y trazas horizontalizadas posterior a la corrección NMO.

4.1.8. Aplicación de corrección de estáticas. Se consideró realizar corrección de estáticas al dato sísmico ya que aunque el tendido fue relativamente corto, la topografía variaba en elevación constantemente conforme nos movíamos por este tendido, de igual forma la corrección de estáticas se considera importante en el procesamiento de los datos sísmicos porque al poner cada traza en su elevación real evitaría interpretaciones erróneas cuando observamos saltos en la imagen sísmica sin corregir debido a que todas trazas se encuentran a la misma altura.

Para realizar la corrección de estáticas se debía conocer las alturas tanto de cada disparo como de cada receptor (incluidos en las cabeceras ***gelev*** y ***selev***, correspondiente a la elevación de los receptores y las fuentes respectivamente) este último asignaría las elevaciones a cada traza grabada, además se debía conocer el valor de la velocidad de reemplazamiento, es decir, la velocidad de la capa heterogénea meteorizada, esta velocidad fue obtenida a partir del modelo de refracción construido antes de realizar el procesamiento de la sísmica de reflexión. Ya teniendo la velocidad de reemplazamiento y el tiempo de la información sísmica, el software me podría calcular distancias y de esta forma corregir las elevaciones de cada traza (Ver figura 37). El proceso de correcciones de estáticas fue posibles gracias a la ejecución de la rutina ***sustatics*** sobre el terminal.

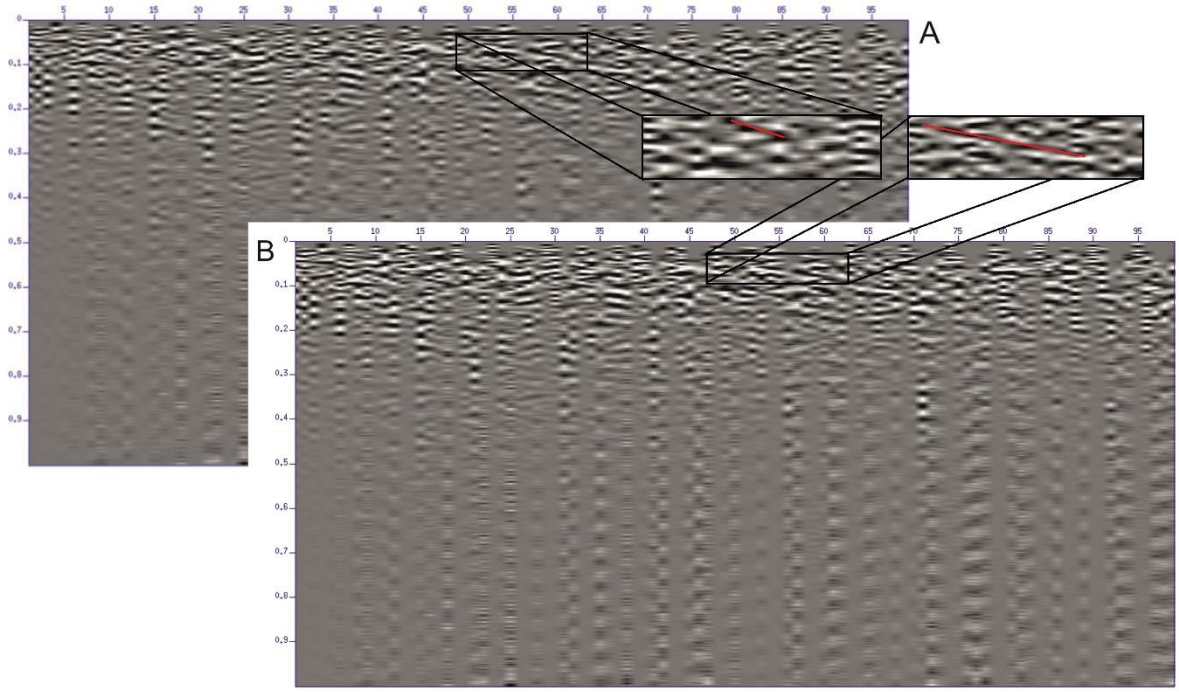


Figura 37. Dato sísmico con la ubicación real en el eje z de las trazas, posterior a la corrección de estáticas.

4.1.9. Apilado (stacking) y migración. Posterior a las correcciones y ajustes de la información sísmica adquirida se aplica el apilado (stacking) a todas las trazas dentro de la información (En este caso **6480** trazas), este proceso es posible gracias al módulo ***sustack*** que sería ejecutado de igual forma en el terminal, posterior al apilado obtendríamos la imagen sísmica apilado a cero offset, es decir, todas las trazas grabadas por disparo, se convertirían en una sola, de esta forma obtendríamos la imagen sísmica con valores de **CMP** en la horizontal (Ver figura 38)

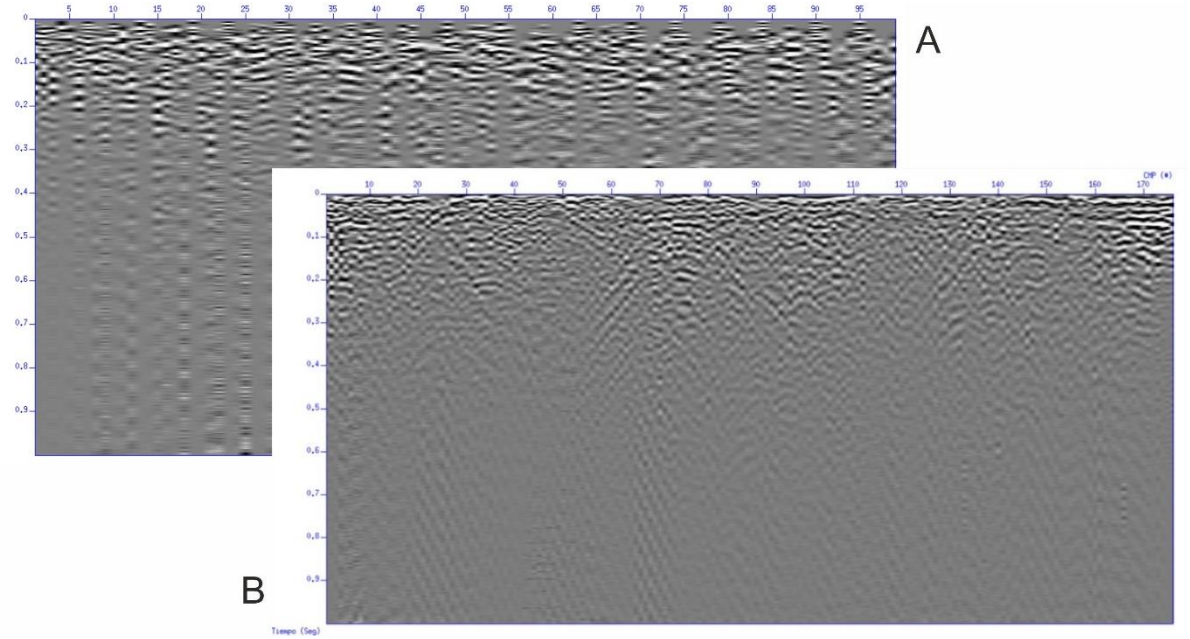


Figura 38. Comparación entre la Imagen sísmica con la corrección de estáticas aplicada (A) y posterior al proceso de apilamiento.

Finalmente, para corregir la posición de los posibles reflectores se realizó el proceso de migración propuesto por Jeno Gazdag por corrimiento de fase que tiene en cuenta las variaciones laterales de velocidad implementada en la rutina **sumigpspi** (SU Gazdag's Phase-Shift Plus interpolation Migration) (Stockwel y Cohen, 2008). Para ejecutar el comando se debe ingresar el dato de la sección sísmica apilada en tiempo y el modelo de velocidad de intervalo como función de la profundidad, de esta forma se obtiene la imagen sísmica final en profundidad (Ver figura 40). El modelo de velocidades utilizadofue el extraído del procesamiento de los datos de refracción, datos que a continuación se ilustran en la figura 39.

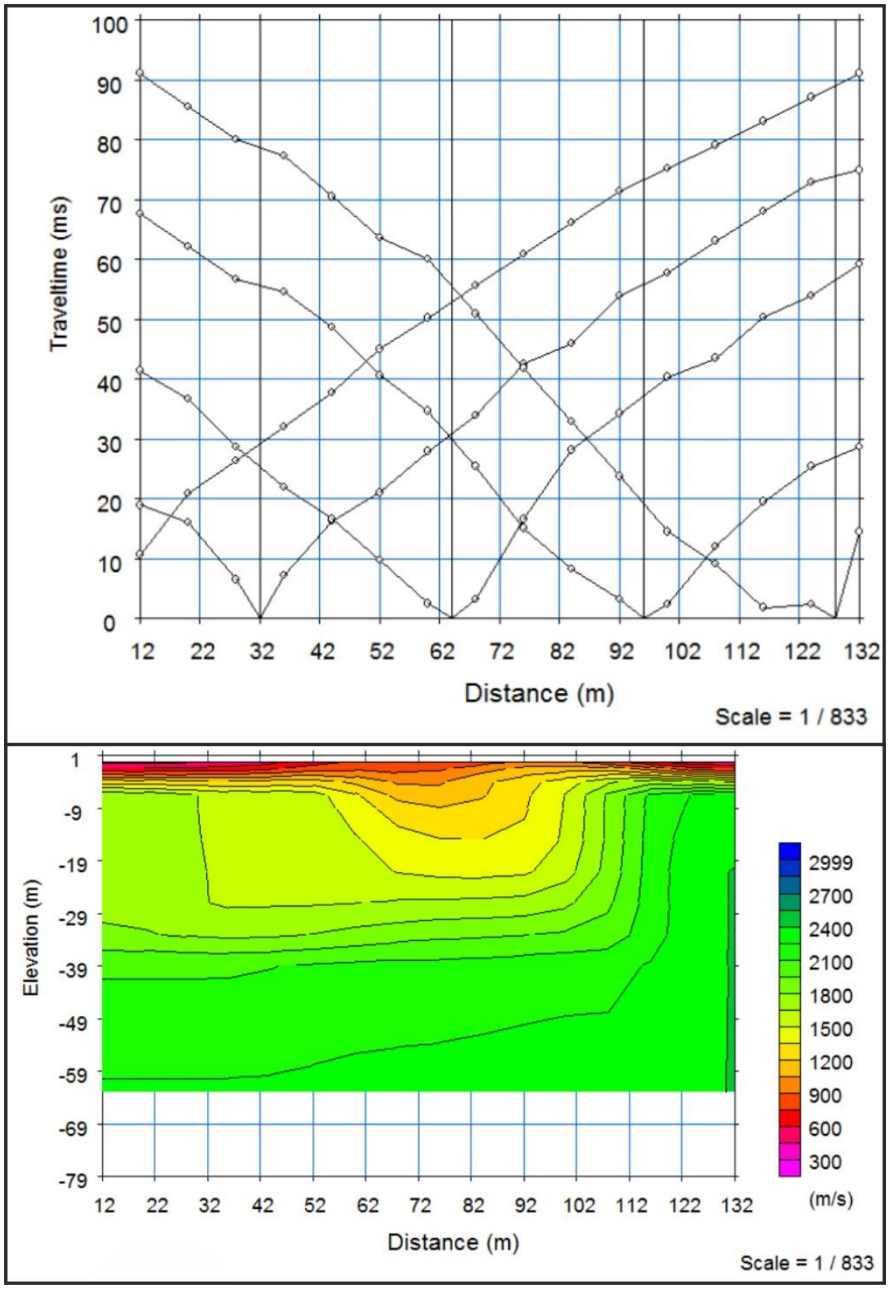


Figura 39. Picado del primero arribo realizado a la información sísmica de refracción (Superior) y Tomografía sísmica de refracción obtenida posterior al picado (Inferior).

5. Resultados

Al finalizar la fase de procesamiento de todos los datos obtenidos en campo, inicia la fase de interpretación de los resultados, donde se compila toda la información tratada y se realiza un análisis geológico y estructural completo de la imagen sísmica y geoeléctrica resultante. (Ver figura 40)

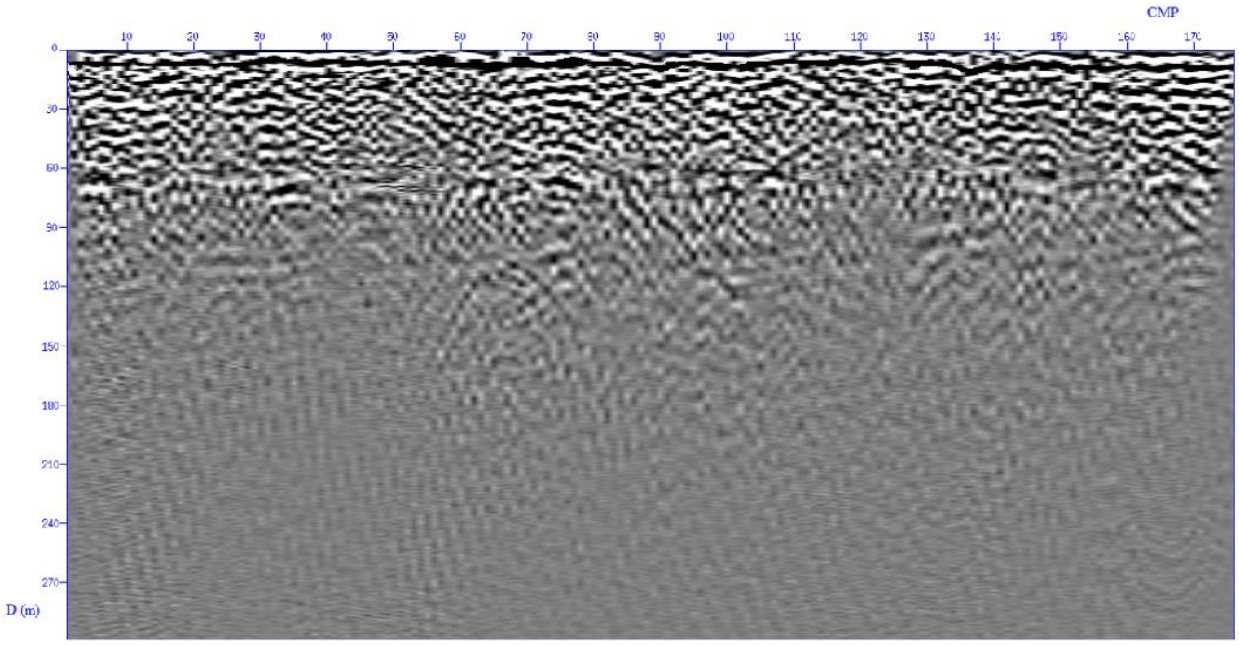


Figura 40. Imagen sísmica final migrada en tiempo, posterior a la etapa de procesamiento.

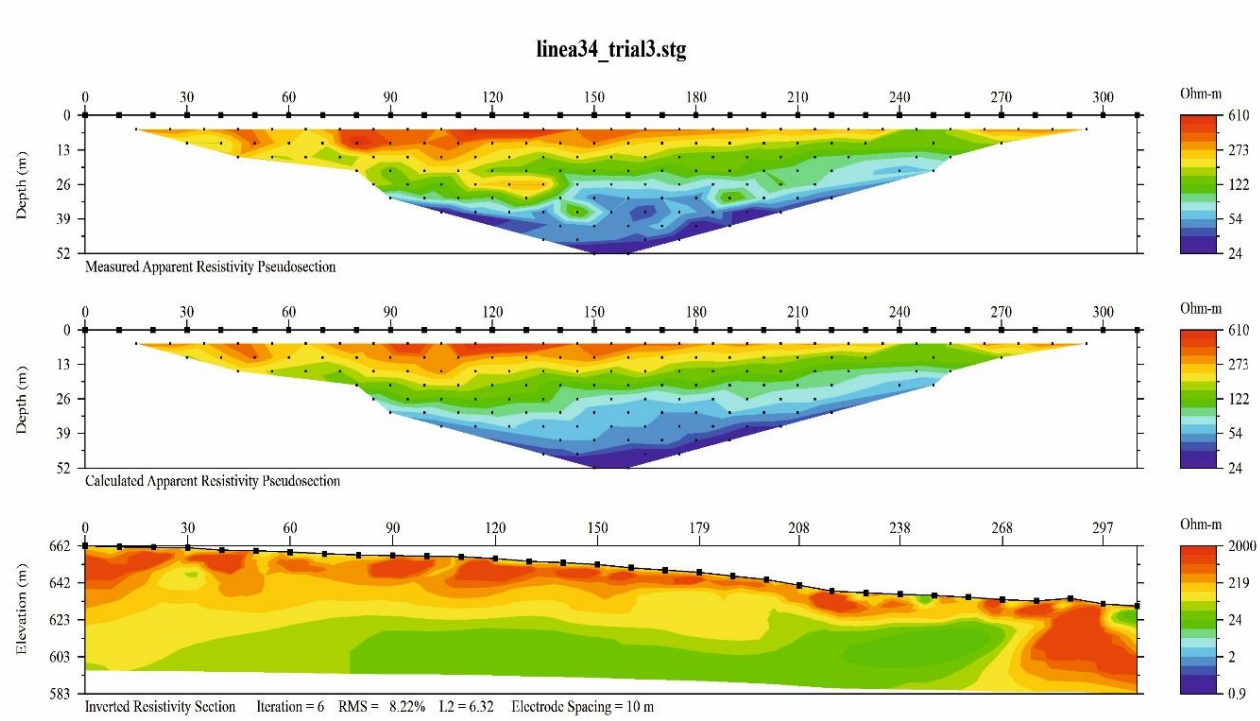


Figura 41. Tomografía eléctrica procesada, con los valores reales de resistividad.

5.1. Analisis De Resultados

Como lo menciona Herron (2011) la interpretación sísmica es la herramienta final del método sísmico para definir la estructura del subsuelo, aplicando los principios de continuidad, amplitud y frecuencia y teniendo en cuenta el estudio geológico realizado por la firma Geoinvestigaciones para la concesión de la mina de UPIN, se interpreta un reflector semi-horizontal a aproximadamente 5 - 6 metros de profundidad y lo que parecen estratos fuertemente inclinados (Ver figura 42).

Luego de interpretar los reflectores continuos se procede a comparar con la información bibliográfica de la zona y darle un significado geológico a lo anteriormente interpretado.

La plancha geológica de 247 de Cáqueza de INGEOMINAS reporta que las lutitas de Macanal en el sector están buzando hacia el NW describiendo una pendiente de 75°, y por su parte la firma GEOINVESTIGACIONES en su reporte geológico para la mina de sal de

Upin, fotografiaron la formación a lo largo de la quebrada salinas y se observa que las intercalaciones de areniscas y lutitas oscuras buzan hacía el NW también, sin embargo con una pendiente menor, lo que indica que a medida que el tren estructural avanza en dirección NE el grado de buzamiento aumenta; esto concuerda perfectamente con los reflectores interpretados en la imagen sísmica (ver figura 42).

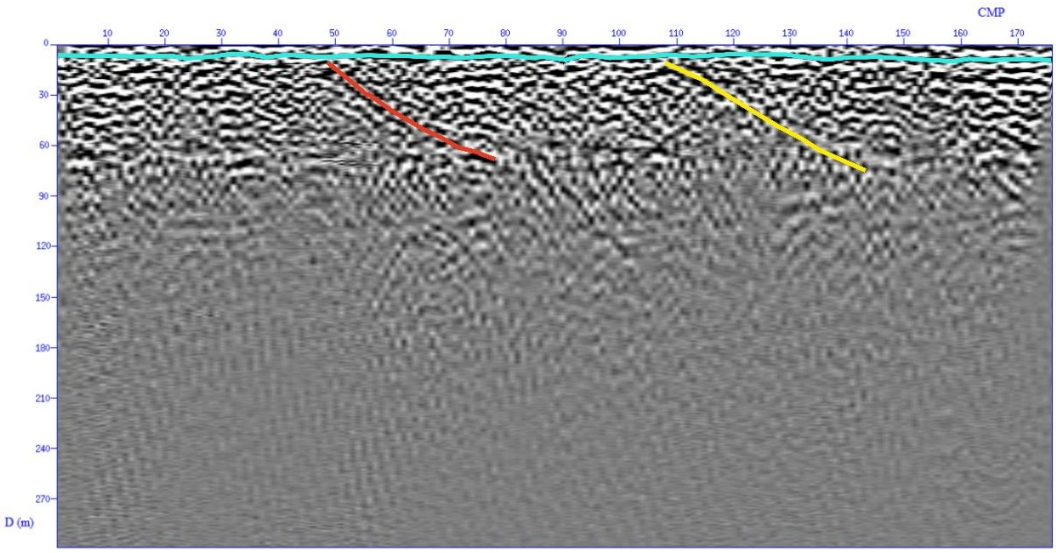


Figura 42. Interpretación primaria donde se identifican los reflectores continuos en cualquier dirección.

Cabe resaltar que en la toma de datos y posterior interpretación de la línea sísmica se hizo en dirección SE -NW por lo que la imagen sísmica a continuación presentada en la figura 43 se encuentra reflejada horizontalmente para que esté en el sentido real de la fotografía de ArcGis Earth, por ende, en la figura la línea va de A’ a.

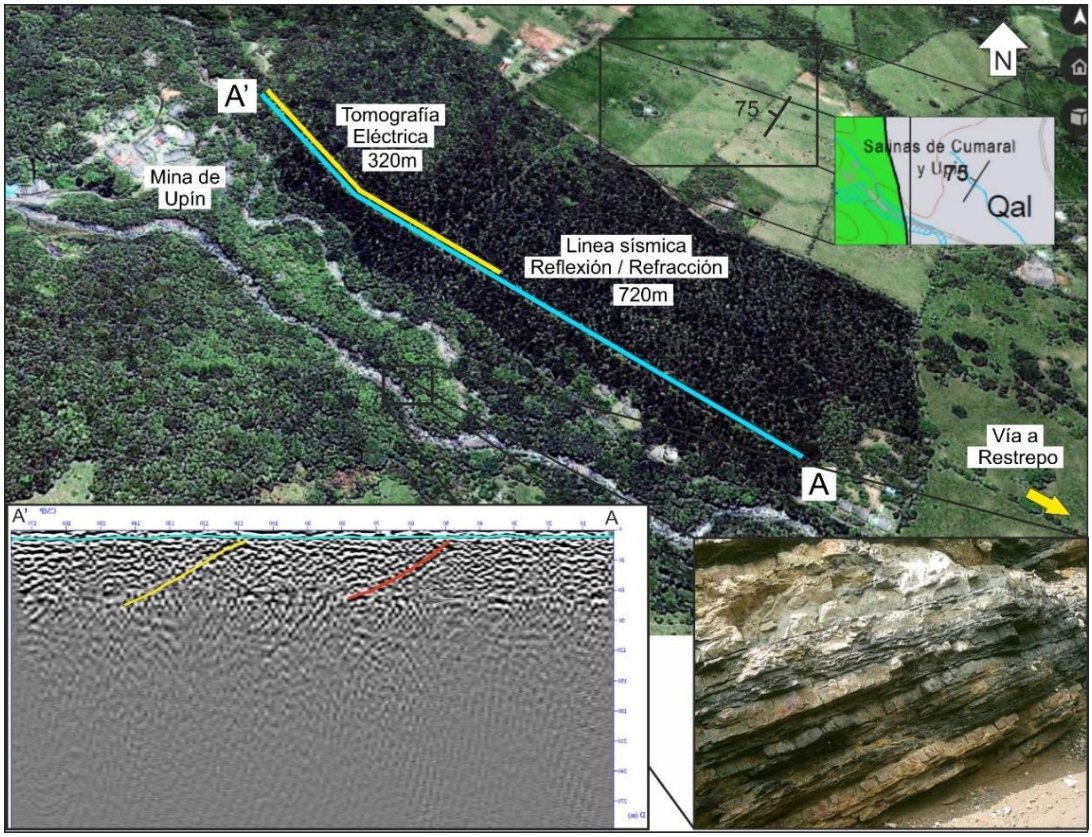


Figura 43. Integración de datos geológicos y estructurales que corroboran la naturaleza de los reflectores.

A pesar de que la firma GEOINVESTIGACIONES en los sondeos eléctricos realizados en el área de estudio señala que la sal gema se encuentra dentro del rango de profundidad que tiene nuestra línea sísmica, no se evidencia un reflector que se pueda asociar al tope de la estructura salina, (por temas de confidencialidad del documento no se revela la ubicación de los sondeos) (ver figura 44).

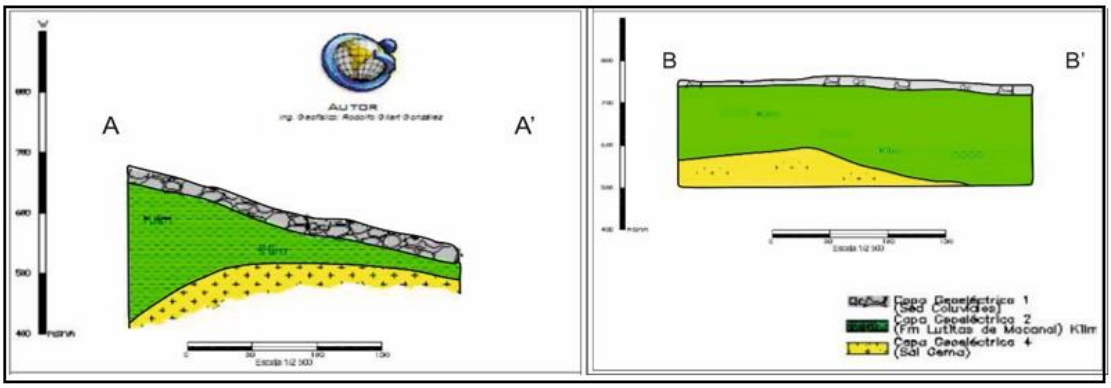


Figura 44. interpretación de sondeos eléctricos realizados por la firma Geoinvestigaciones para la mina de sal de Upín evidenciando la sal entre 60 a 150m de profundidad. Tomado y modificado de Geoinvestigaciones (2015).

Para corroborar la litología del área en profundidad la empresa SUBSUELO 3D facilito el uso de un equipo de geoeléctrica para hacer una tomografía del subsuelo con el propósito de identificar las propiedades resistivas del subsuelo y asociarlos a un tipo de litología.

Después del procesado de la tomografía eléctrica, los rangos de resistividades presentes en el área van desde menos de 24 hasta los 2000 h*m; se presenta una capa sub-horizontal de aproximadamente 10 m en promedio con resistividades entre 200 y 1500 h*m que se asocian a la capa de suelo no consolidado, otra zona por debajo de los 20 m hacia la parte NW en la que predominan resistividades menores que van desde los 20 y los 50 h*m que se asocian a intercalaciones entre lutitas y areniscas, predominando las lutitas y la última zona a la misma profundidad, pero en la parte más hacía el SE donde las resistividades vuelven a estar entre los 100 a 2000 lo que se puede interpretar como un estrato de areniscas secas con muy pocas capas intercaladas de lutitas, lo que encaja perfectamente en la descripción mencionada en el capítulo del fundamento teórico para la formación lutitas de Macanal. (Ver figura 45)

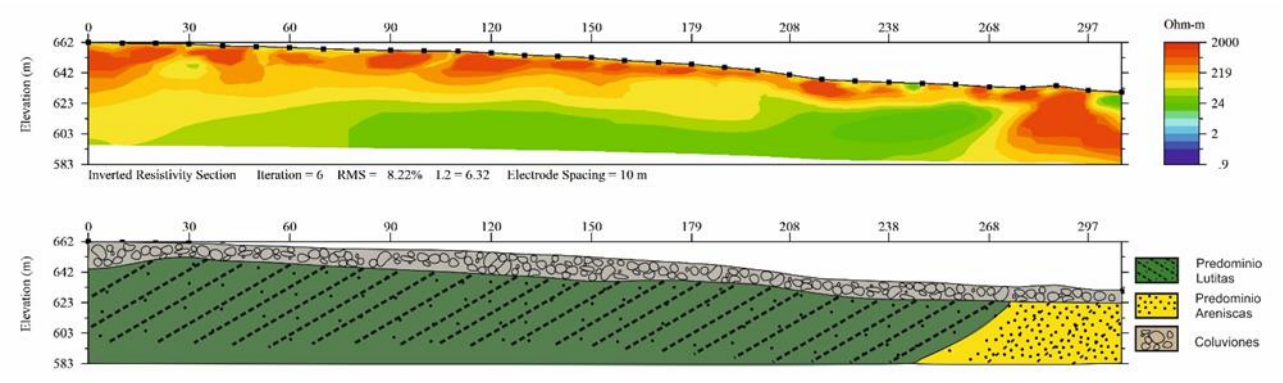


Figura 45. Imagen resultado del procesamiento de la tomografía eléctrica (superior) y su Interpretación litológica (inferior).

Ahora bien, si superponemos la interpretación litológica de la tomografía eléctrica y la imagen sísmica, encontramos que el reflector subhorizontal corresponde a la variación de impedancia acústica entre los depósitos no consolidados y la superficie erosionada de las capas inclinadas de la formación lutitas de Macanal, además, el reflector marcado en amarillo en la interpretación primaria, corresponde al margen entre las intercalaciones de dominio lutitico y arenitico como se evidencia en la figura 46.

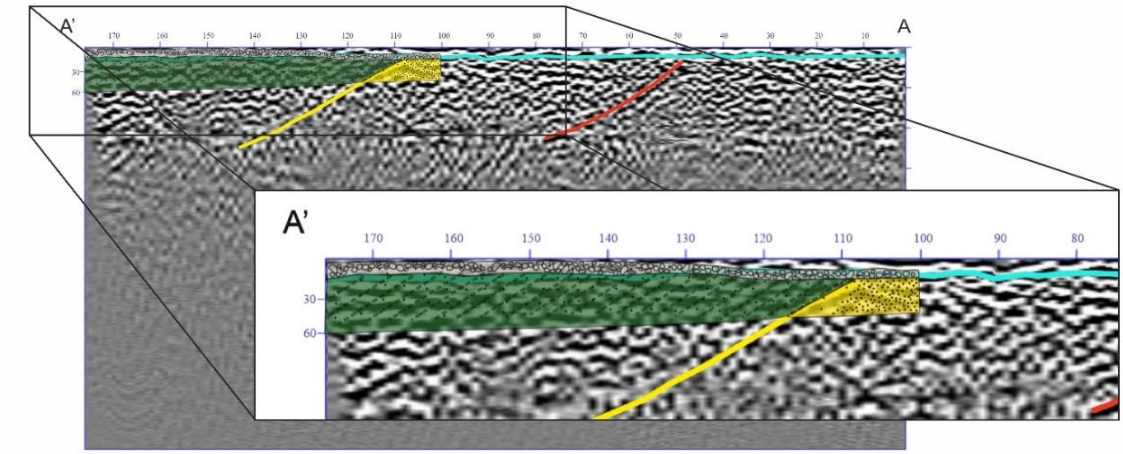


Figura 46. Interpolación de la imagen sísmica y la tomografía eléctrica interpretada

Con respecto al modelo estructural propuesto por Parravano et al. (2015) la interpretación de la imagen sísmica se interpola con el corte más próximo tomado en la misma dirección SE-NW (A-A’ en la imagen en planta) como se ve en la figura 47.

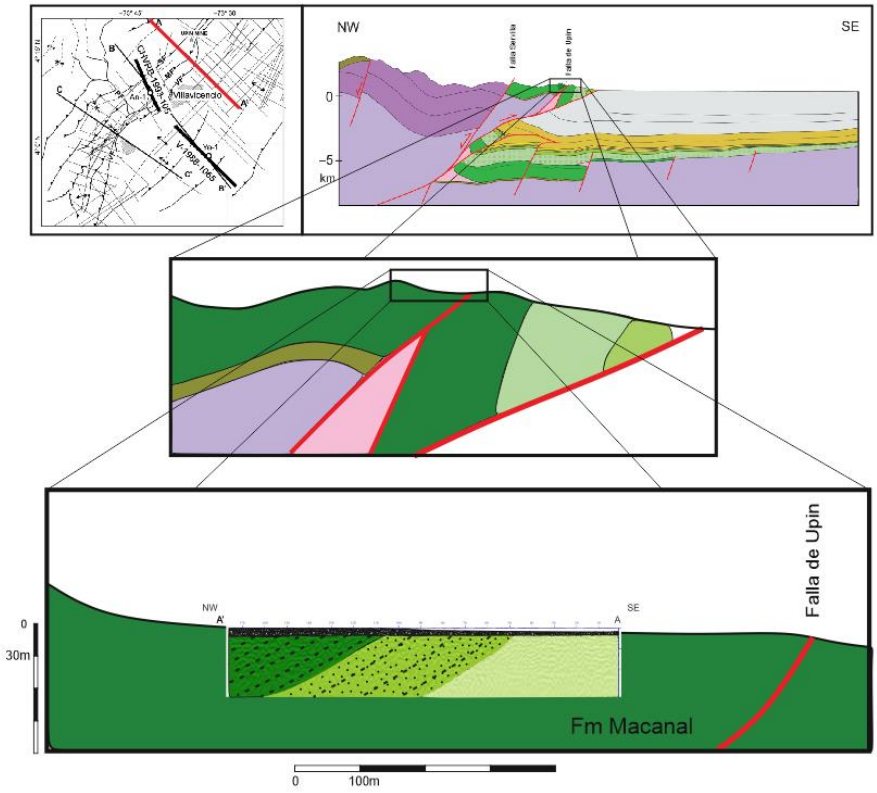


Figura 47. Imagen sísmica interpolada al modelo estructural propuesto por Parravano et al. (2015) tomado y modificado de: Parravano et al (2015).

5.2. Conclusiones

De la anterior investigación realizada se puede concluir que:

- El diseño de adquisición aunque fue el apropiado para obtener buena resolución en la imagen sísmica final por su la alta densidad de datos grabados, no logró aportarnos la profundidad suficiente para alcanzar el tope de la estructura salina.

- Realizar el proceso de corrección de estáticas al dato sísmico durante el procesamiento es esencial cuando se realiza un levantamiento sísmico donde la topografía es cambiante. con este proceso podremos corregir la continuidad de los reflectores y evitar cometer errores en la fase de la interpretación.

- La profundidad alcanzada no fue suficiente para notar aumentos de velocidades correspondientes a señales de evaporitas, esto debido a los diferentes factores que se presentaron en campo tales como el tipo de material encontrado sobre la roca consolidada el cual causó la disipación de la energía generada por el martillo.

- Se describió mediante un modelo geológico los resultados de la integración de la interpretación sísmica y geoeléctrica, sin embargo, al no lograr definir el tope de la estructura salina, no se puede inferir en la evolución geológica que incluye actividad halocinética para el piedemonte llanero en el modelo propuesto por Parravano et al. en el año 2015.

- Cuando se trabaja con sísmica de reflexión somera las tomografías eléctricas son una herramienta importante para determinar el límite entre la capa meteorizada y la roca consolidada ya que el contraste de resistividades entre estas es significativo.

- Se puede utilizar el flujo de procesamiento de sísmica de reflexión profunda para datos de reflexión somera sin inconveniente, solo se debe tener cuidado cuando se determinan las frecuencias a ser suprimidas por los filtros ya que podremos eliminar algunas que se consideran como ruido pero pueden representar eventos de relevancia.

- No se puede realizar una retro deformación que arroje información relevante ya que el modelo carece de algunos factores tales como alta profundidad, estructuras presentes (Fallas, Pliegues, etc.), información estratigráfica detallada, entre otros.

5.3. Observaciones

- El desarrollo de la investigación realizada fue posible en su totalidad gracias al apoyo otorgado por la vicerrectoría de investigación y extensión en calidad de beneficiarios adscritos al proyecto CINEMATICA DEL SINCLINAL DE MEDINA.

- Se decidió realizar la línea sísmica en esta zona ya que por el trend estructural se podría encontrar señales de sal tal y como se documenta en el trabajo realizado por la empresa GEOINVESTIGACIONES para la Mina de Upin.

- Se contó con los permisos necesarios otorgados por la empresa para llevar a cabo esta investigación ya que el terreno donde se realizó la línea sísmica es propiedad de la mina, sin embargo, no toda la información puede ser publicada ya que la mina será entregada al estado próximamente.

- El sismógrafo y el equipo de tomografía eléctrica utilizados en este trabajo son de fabricación colombiana a cargo de la empresa SUBSUELO 3D.

- Se decidió trabajar con el software de procesamiento Seismic Unix ya que éste es de libre uso.

- Durante toda la campaña de adquisición se buscó la conservación del medio ambiente, por lo tanto no se llevó a cabo ningún tipo de acción destructiva en contra de la naturaleza tales como la tala de árboles ni eliminación de fauna.

5.4. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar una fuente diferente al martillo ya que esta no produce la energía suficiente para alcanzar el máximo de profundidad en el área de investigación, en vez de esta fuente el investigador podría utilizar detonaciones con rifles como el utilizado en el trabajo de Baker (1999) sobre la línea de Kansas, de igual forma podría utilizar geles sísmicos, de esta forma se podría aumentarla resolución y la profundidad de investigación. Si no se dispone de otra fuente a parte del martillo, se debe procurar dar golpes certeros y fijar la platina al suelo, de esta forma se evitaría el ruido generado por el rebote de la misma.

- Se debe procurar que el tendido sea lo más extenso posible ya que por experiencia en esta investigación solo se alcanzó una décima parte de la longitud total del tendido debido a los diferentes factores ya explicados.

- Se recomienda realizar un mayor número de disparos por adquisición, de esta forma se obtendría un mayor cubrimiento sísmico, por lo tanto, mayor densidad de datos que se vería reflejado en la resolución de la imagen sísmica final.

Referencias bibliográficas

Acosta, J. 2002. Structure, tectonics and 3D models of the western foothills of theEastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. PhD. Thesis. Imperial College. London.

Báez, R. 2016. Diagnóstico de la nomenclatura de las unidades litoestratigráficas cretácicas del piedemonte llanero (región de Medina – San Luis de Gaceno). (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia

Baker, G.S. 1999. Processing Near-Surface Seismic-Reflection Data: A Primer. Society Of Exploration Geophysicists.

Canales, I. 2010. Análisis estructural-estratigráfico del Cráter chicxulub a partir de datos sísmicos De reflexión. (Tesis de pregrado). Universidad nacional autónoma de México, México.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Alavarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Penas, R., Pulham, A. J. And Taborda, A., 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, A.A.P.G. Bull., 79 (10): 1421-1443.

Cortes, M., Bayona, G., Aristizabal, G., Ojeda, G., Reyes-Harker, A., Gamba, N. 2006. Structure and kinematics of the Eastern Foothills of the Eastern Cordiller of Colombia from Balanced Cross-Sections and forward Modeling.

Dengo and Covey, M. 1993. Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implicactions for trap styles and regional tectonics. AAPG Bulletin v 77 N° 8.

Dorado, J. (1.984). Contribución al conocimiento de la estratigrafía de la formación Brechas de Buenavista (límite Jurásico-Cretácico) oeste de Villavicencio, Meta. Trabajo de grados Univ. Nal. de Colombia. Bogotá.

Dorado, J. (1990). Contribución al conocimiento estratigráfico de la Formación Brechas de Buenavista (límite JurásicoCretácico), región noreste de Villavicencio (Meta). Geología Colombiana, No. 17, pp. 7-39

Ecopetrol – ICP-GER. 1990. Modelamiento Estructural de la Cordillera Oriental.

Ecopetrol-ICP. 2000. Linares R. Interpretacion sismica y analisis structural en cinturones de cabalgamiento.

Etayo, F., Barrero D., and others. 1983. Mapa de Terrenos de Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS, No. 14-1; 235 p.

Forel, D., Benz, T., Pennington, W.D. Seismic Data Processing With Seismic Un*x: A 2D Seismic Data Processing Primer. Society Of Exploration Geophysicists.

Guerrero, J., & Sarmiento, G. 1996. Estratigrafía Física, Palinologica, Sedimentológica y Secuencial del Cretacico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en la Exploracion Petrolera. Geología Colombiana, 20, 3-66.

Herron, D., Latimer, R. 2011. First Steps in Seismic Interpretation. SEG BOOKS, USA.

Hettner, A. (1892): Die Kordillere von Bogotá.- Pettermanns Mitteilungen. Erganzungsheft 1 04. Justus Pertha, Gotha, 229 p.

Hubach, E. 1957. Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Boletín Geológico, Servicio Geológico Nacional, Bogotá, 5(2): 93-112.

Ingeominas. (1.997). Estudio de zonas inestables a lo largo del valle del río Upín y sus alrededores entre Villavicencio y Restrepo del departamento del Meta. Informe 2137. Bogotá.

Ingeominas. (1.998). Geología de la plancha 266-Villavicencio, escala 1:100.000. Bogotá.

Ingeominas. (2.002). Mapa de anomalías gravimétricas, escala 1:500.000. Atlas colombiano de información Geológico-Minera, plancha 5-09. Bogotá.

Ingeominas. (2.004). Aspectos más relevantes de la geomorfología y geología del piedemonte llanero de Colombia. INGEOMINAS. Bogotá.

Ingeominas. (2.007). Mapa Geológico de Colombia, escala 1.000.000. INGEOMINAS. Bogotá.

Ingeominas. (2.011). Cartografía Geológica de la Plancha 247 Cáqueza. Memoria. Por Patiño et al. Bogotá.

Mitchum. Rjr. 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level: Part 11. Glossary of Terms used in Seismic Stratigraphy: Section 2. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation. AAPG files datapages. USA.

Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimaté, C., & Rodríguez, F. 2006. Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. Tectonics, Vol. 25, pp. 1-19.

Parra, M. 2008. Cenozoic foreland-basin evolution in the northern Andes: insights form thermochronology and basin analysis in the Eastern Cordillera, Colombia. Tesis doctoral, Universitat Potsdam, Alemania, pp 146.

Parravano, V., A. Teixell, & A. Mora, 2015. Influence of salt in the tectonic development of the frontal thrust belt of the eastern Cordillera (Guatiquía area, Colombian Andes). Interpretation, Vol. 3, (No. 4), p.17-27.

Parravano, V. 2012 Estructural analysis of the mountain front of the Eastern Cordillera between the Guatiquía and Guamal rivers (Colombian Andes): a new kinematic model (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Barcelona, España.

Perez, G. & Salazar, A. (1978): Estratigraffa y facies del Grupo Guadalupe. Geología Colombiana 10: 7-86. Universidad Nacional, Bogotá.

Ramirez, L.H. 2011. Determinación de los patrones de fracturamiento de la formación mirador en el anticlinal del Guavio, mediante el análisis de imágenes de pozo. Implicaciones en la permeabilidad y productividad del reservorio. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional De Colombia. 207 p.

Renzoni, G. 1964. Geología del Cuadrángulo L-11 Villavicencio. Escala 1:200.000. Servicio Geológico Nacional e Inventario Minero Nacional.

Restrepo L.E. (2.015). Estudio Hidrogeológico en el área de la mina de sal de Upín. SALCOL S.A. Bogotá.

Restrepo L.E. (2.015). Estudio Geotécnico en el área de la mina de sal de Upín. SALCOL S.A. Bogotá.

Robertson K. (1.989). Actividad neotectónica del piedemonte llanero de la codillera Orienta, sector Villavicencio Tauramena. Colombia, V Congreso colombiano de geología, Memorias tomo I. INGEOMINAS. Bogotá.

Sarmiento-Rojas, L.F., Van Wess, J.D., and Cloetingh, S. 2006. Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models: Journal of South American Earth Sciences, v. 21, p. 383–411,

Sarmiento, L.F. 2001. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Ph.D Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, pp. 72-180.

Sützer (1926). – Sobre la geología de la parte media del Valle del Magdalena, Ibid, t. 2, pp. 183-209, 2 fig., Bogotá.

Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Hervé, P., Harmen, B., Olaya, J., and Rivera, C., (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation. Colombia, Tectonics, 19, 5, p. 787-813.

Terraza, R., Montoya, D., Reyes, G., Moreno, G., Fuquen, J., Torres Jaimes, E., Nivia Guevara, A. 2013. Geología de la Plancha 229 Gachalá. Servicio Geológico Colombiano.

Ulloa C., y Rodriguez, E. 1976. Geología del Cuadrángulo K13- Tauramena. Boletín Geológico, INGEOMINAS, V XXII, pp. 3-56.

Ulloa C., y Rodriguez, E. 1979. Geología del Cuadrángulo K12- Guateque. Boletín Geológico, INGEOMINAS. No 22

Apéndices

Apéndice A. Conversión de SGY a SU

```
#! /bin/bash

NSHOT=9
ISHOT=1

while [ $ISHOT -le $NSHOT ]; do
rm -f $ISHOT.su
segyread tape=$ISHOT.sgy verbose=1 endian=0 > $ISHOT.su

suxwigb < $ISHOT.su title="$ISHOT" &

ISHOT=`expr $ISHOT + 1`
done

exit 0
```

Apéndice B. Adición de cabeceras a los disparos sísmicos.

```
#! /bin/sh

#Autor: German Reina Fernandez
#Año:2017

rm -f sections.su

nt=250 dt=0.004

#####variar Linea hi=linea

hi=1
while [ $hi -le 5 ]; do
cd L$hi
echo "Abriendo L$hi"

        h=`expr $hi-1 | bc -l`

###################variar tanda#######################
Ti=1
while [ $Ti -le 9 ]; do
cd L$hi-T$Ti
echo "Abriendo T$Ti"
        t=`expr $Ti-1 | bc -l`
######################

#######variar disparo
Si=1
while [ $Si -le 9 ]; do

        i=`expr $Si-1 | bc -l`
  sx=`bc -l <<-END
  $i * 16 + $t * 8 + $h * 128
  END`
  fldr=`bc -l <<-END


  .       .         .
  END`
##############################################
##############       je=geofono

je=1

while [ $je -le 16 ]; do
  j=`expr $je-1 | bc -l`

    gx=`bc -l <<-END
    $t * 8 + $j * 8 + 12 + $h * 128
    END`
    offset=`bc -l <<-END
    $j * 8 + 12 - $i * 16
    END`
    tracl=`bc -l <<-END
    $t * 144 + $i * 16 + $j + 1 + $h * 1296
    END`
    tracf=`bc -l <<-END
    15 + 1
    END`

echo "Linea=$hi Tanda=$Ti Shot=$Si tracl=$je"

suwind < $Si.su key=tracl min=$je max=$je > $je-.su

        cat $je-.su | \
        sushw key=tracl,tracr,fldr,tracf,trid,offset,sx,gx,duse \
           a=$tracl,$tracl,$fldr,$tracf,1,$offset,$sx,$gx,$fldr >>
            ../../sections.su

rm -f $je-.su

  je=`expr $je + 1 | bc -l`
done
```

```
    $t * 144 + $i * 16 + $j + 1 + $h * 1296
    END`
    tracf=`bc -l <<-END
    15 + 1
    END`

echo "Linea=$hi Tanda=$Ti Shot=$Si tracl=$je"

suwind < $Si.su key=tracl min=$je max=$je > $je-.su

        cat $je-.su | \
        sushw key=tracl,tracr,fldr,tracf,trid,offset,sx,gx,duse \
           a=$tracl,$tracl,$fldr,$tracf,1,$offset,$sx,$gx,$fldr >>
            ../../sections.su

rm -f $je-.su

  je=`expr $je + 1 | bc -l`
done

###############################################
  Si=`expr $Si + 1`
done

cd ..
######################

Ti=`expr $Ti + 1`
done

cd ..

hi=`expr $hi + 1`
done

exit 0
```

Apéndice C. Análisis de velocidad.

```
#! /bin/sh
# File: iva.sh
#       Run script iva.scr to start this script

# Set messages on
##set -x

#================================================
# USER AREA -- SUPPLY VALUES
#------------------------------------------------
# CMPs for analysis

cmp1=58  cmp2=66  cmp3=74
cmp4=114 cmp5=122 cmp6=130
cmp7=170 cmp8=178 cmp9=186
cmp10=218 cmp11=234 cmp12=242
cmp13=274 cmp14=282 cmp15=298
cmp16=330 cmp17=338 cmp18=346
cmp19=386 cmp20=394 cmp21=402
cmp22=442 cmp23=450 cmp24=458
cmp25=498 cmp26=506 cmp27=514
cmp28=554 cmp29=562 cmp30=570
cmp31=602 cmp32=618 cmp33=626
cmp34=658

numCMPs=34

#------------------------------------------------
# File names

indata=03_addcdpsections.su      # SU format
outpicks=picadofotos.txt  # ASCII file

#------------------------------------------------
# display choices



myperc=99       # perc value for plot
plottype=0      # 0 = wiggle plot,  1 = image plot

#------------------------------------------------
# Processing variables

# Semblance variables
nvs=100  # number of velocities
dvs=27   # velocity intervals
fvs=400 # first velocity

# CVS variables
fc=400 # first CVS velocity
lc=3100 # last CVS velocity
nc=10   # number of CVS velocities (panels)
XX=11   # ODD number of CMPs to stack into central CVS

#================================================

# HOW SEMBLANCE (VELAN) VELOCITIES ARE COMPUTED

# Last Vel =  fvs + (( nvs-1 ) * dvs ) = lvs
#     5000 =  500 + ((  99-1 ) * 45  )
#     3900 = 1200 + (( 100-1 ) * 27  )

# Compute last semblance (velan) velocity
lvs=`bc -l << -END
$fvs + (( $nvs - 1 ) * $dvs )
END`

#------------------------------------------------

# HOW CVS VELOCITIES ARE COMPUTED

# dc = CVS velocity increment
```

```
# dc = CVS velocity increment
# dc = ( last CVS vel - first CVS vel ) / ( # CVS - 1 )
# m = CVS plot trace spacing (m = d2, vel units)
# m = ( last CVS vel - first CVS vel ) / ( ( # CVS - 1 ) * XX )

# j=1
# while [ j le nc ]
# do
#   vel =  fc  + { [(   lc - fc   ) / ( nc-1 )] * ( j-1) }
#   j = j + 1
# done
# EXAMPLE:
#   vel = 1200 + ( (( 3900 - 1200 ) / ( 10-1 )) * ( 1-1) )
#   vel = 1200 + ( (( 3900 - 1200 ) / ( 10-1 )) * ( 2-1) )
#                                                    .
#                                                    .
#                                                    .
#   vel = 1200 + ( (( 3900 - 1200 ) / ( 10-1 )) * (11-1) )

#================================================

# FILE DESCRIPTIONS

# tmp0 = binary temp file for input CVS gathers
# tmp1 = binary temp file for output CVS traces
# tmp2 = ASCII temp file for managing picks
# tmp3 = binary temp file for stacked traces
# tmp4 = ASCII temp file for "wc" result (velan)
# tmp5 = ASCII temp file for stripping file name from tmp4 (velan)
# tmp6 = ASCII temp file to avoid screen display of "zap"
# tmp7 = ASCII temp file for picks
# tmp8 = binary temp file for NMO (flattened) section
# panel.$picknow = current CMP windowed from line of CMPs
# picks.$picknow = current CMP picks arranged as "t1 v1"
#       |                                       "t2 v2"


#                                                 etc.
# par.# (# is a sequential index number; 1, 2, etc.)
#      = current CMP picks arranged as
#        "tnmo=t1,t2,t3,...
#        "vnmo=v1,v2,v3,...
# par.uni.# (# is a sequential index number; 1, 2, etc.)
#      = current CMP picks arranged as
#        "xin=t1,t2,t3,...
#        "yin=v1,v2,v3,...
#        for input to xgraph to display velocity profile
# par.cmp = file of CMP number and sequential index number;
#           for example: "40 1"
#                        "60 2"
#                         etc.
# par.0 = file "par.cmp" re-arranged as
#         "cdp=#,#,#,etc."  NOTE: # in this line is picked CMP
#         "#=1,2,3,etc."    NOTE: # in this line is "#"
# outpicks = concatenation of par.0 and all par.# files.

#================================================

echo " "
echo "  *** INTERACTIVE VELOCITY ANALYSIS ***"
echo " "

#------------------------------------------------
# Remove old files.  Open new files
rm -f panel.* picks.* par.* tmp*

> $outpicks  # Write empty file for final picks
> par.cmp    # Write empty file for recording CMP values

#------------------------------------------------
# Get ns, dt, first time from seismic file
nt=`sugethw ns < $indata | sed 1q | sed 's/.*ns=//'`
dt=`sugethw dt < $indata | sed 1q | sed 's/.*dt=//'`


# Convert dt from header value in microseconds
# to seconds for velocity profile plot
dt=`bc -l << -END
  scale=6
  $dt / 1000000
END`

# If "delrt", use it; else use zero
if [ $ft -ne 0 ] ; then
  tstart=`bc -l << -END
    scale=6
    $ft / 1000
  END`
else
  tstart=0.0
fi

#------------------------------------------------

# Initialize "repick" -- for plotting previous picks on velan
repick=1  # 1=false, 0=true

#------------------------------------------------
# BEGIN IVA LOOP
#------------------------------------------------

i=1
while [ $i -le $numCMPs ]
do

# set variable $picknow to current CMP
  eval picknow=\$cmp$i

  if [ $repick -eq 1 ] ; then
    echo " "
```

```
    echo "Preparing CMP $i of $numCMPs for Picking "
    echo "Location is CMP $picknow "
  fi

#-----------------------------------------------
# Plot CMP (right)
#-----------------------------------------------

  suwind < $indata \
           key=cdp min=$picknow max=$picknow > panel.$picknow
  if [ $repick -eq 1 ] ; then
    if [ $plottype -eq 0 ] ; then
      suxwigb < panel.$picknow xbox=634 ybox=10 wbox=300 hbox=450 \
                title="CMP gather $picknow" \
                label1=" Time (s)" label2="Offset (m)" key=offset \
                perc=$myperc verbose=0 &
    else
      suximage < panel.$picknow xbox=634 ybox=10 wbox=300 hbox=450 \
                title="CMP gather $picknow" \
                label1=" Time (s)" \
                perc=$myperc verbose=0 &
    fi
  else
    if [ $plottype -eq 0 ] ; then
      suxwigb < panel.$picknow xbox=946 ybox=10 wbox=300 hbox=450 \
                title="CMP gather $picknow" \
                label1=" Time (s)" label2="Offset (m)" key=offset \
                perc=$myperc verbose=0 &
    else
      suximage < panel.$picknow xbox=946 ybox=10 wbox=300 hbox=450 \
                title="CMP gather $picknow" \
                label1=" Time (s)" \
                perc=$myperc verbose=0 &
    fi
  fi
```

```
#-----------------------------------------------
# Constant Velocity Stacks (CVS) (middle-left)
# Make CVS plot for first pick effort.
# If re-picking t-v values, do not make this plot.
#-----------------------------------------------

# repick: 1=false, 0=true
  if [ $repick -eq 1 ] ; then

# number of CMPs - 1; for windowing
    X=`expr $XX - 1`

# Window CMPs around central CMP (+/- X/2). Write to tmp0
    k1=`expr $picknow - $X / 2`  # Window from CMP to CMP - X/2
    k2=`expr $picknow + $X / 2`  # Window from CMP to CMP + X/2
    suwind < $indata key=cdp min=$k1 max=$k2 > tmp0

# Calculate CVS velocity increment
# dc = ( last CVS vel - first CVS vel ) / ( # CVS - 1 )
    dc=`bc -l << -END
    ( $lc - $fc ) / ( $nc - 1 )
    END`

# Calculate trace spacing for CVS plot (m = d2, vel units)
# m = ( last CVS vel - first CVS vel ) / ( ( # CVS - 1 ) * XX )
    m=`bc -l << -END
    ( $lc - $fc ) / ( ( $nc - 1 ) * $XX )
    END`

# CVS velocity loop
    j=1
    while [ $j -le $nc ]
    do

      vel=`bc -l << -END
      $fc + $dc * ( $j - 1 )


      END`

# uncomment to print CVS velocities to screen
##    echo " vel = $vel"

      sunmo < tmp0 vnmo=$vel verbose=0 |
      sustack >> tmp1

      j=`expr $j + 1`
    done

# Compute lowest velocity for annotating CVS plot
# loV = first CVS velocity - ( ( CMP range - 1 ) / 2 ) * vel inc
    loV=`bc -l << -END
    $fc - ( $X / 2) * $m
    END`

    suximage < tmp1 xbox=322 ybox=10 wbox=300 hbox=450 \
               title="CMP $picknow Constant Velocity Stacks" \
               label1=" Time (s)" label2="Velocity (m/s)" \
               f2=$loV d2=$m verbose=0 \
               perc=$myperc n2tic=5 cmap=rgb0 &

  fi

#-----------------------------------------------
# Picking instructions
#-----------------------------------------------

  echo " "
  echo "Preparing CMP $i of $numCMPs for Picking "
  echo "Location is CMP $picknow "
  echo "  Start CVS CMP = $k1   End CVS CMP = $k2"
  echo " "
  echo "  Use the semblance plot to pick (t,v) pairs."
  echo "  Type \"s\" when the mouse pointer is where you want a pick."
```

```
  echo "  Be sure your picks increase in time."
  echo "  To control velocity interpolation, pick a first value"
  echo "    near zero time and a last value near the last time."
  echo "  Type \"q\" in the semblance plot when you finish picking."

#-----------------------------------------------
# Plot semblance (velan) (left)
#-----------------------------------------------

# repick: 1=false, 0=true
  if [ $repick -eq 0 ] ; then

#---  ---  ---  ---  ---  ---  ---  ---  ---  ---
# Get the number of picks (number of lines) in tmp7 |
#   Remove blank spaces preceding the line count.
# Remove file name that was returned from "wc".
# Store line count in "npair" to guide line on velan.

    wc -l tmp7 | sed 's/^  *\(.*\)/\1/' > tmp4
    sed 's/tmp7//' < tmp4 > tmp5
    npair=`sort < tmp5`
#---  ---  ---  ---  ---  ---  ---  ---  ---  ---

    suvelan < panel.$picknow nv=$nvs dv=$dvs fv=$fvs |
    suximage xbox=10 ybox=10 wbox=300 hbox=450 perc=99 \
             units="semblance" f2=$fvs d2=$dvs n2tic=5 \
             title="Semblance Plot CMP $picknow" cmap=hsv2 \
             label1=" Time (s)" label2="Velocity (m/s)" \
             legend=1 units=Semblance verbose=0 gridcolor=black \
             grid1=solid grid2=solid mpicks=picks.$picknow \
             curve=tmp7 npair=$npair curvecolor=white

  else

    suvelan < panel.$picknow nv=$nvs dv=$dvs fv=$fvs |
    suximage xbox=10 ybox=10 wbox=300 hbox=450 perc=99 \
             units="semblance" f2=$fvs d2=$dvs n2tic=5 \
             title="Semblance Plot CMP $picknow" cmap=hsv2 \
             label1=" Time (s)" label2="Velocity (m/s)" \
             legend=1 units=Semblance verbose=0 gridcolor=black \
             grid1=solid grid2=solid mpicks=picks.$picknow

  fi

#-----------------------------------------------
# End first set of plots
#===============================================

#-----------------------------------------------
# Manage picks (1): Prepare picks for sunmo
#-----------------------------------------------

  sort < picks.$picknow -n |
    mkparfile string1=tnmo string2=vnmo > par.$i
  echo "cdp=$picknow" >> tmp2
  cat par.$i >> tmp2

#===============================================
# Begin second set of plots
#-----------------------------------------------

#-----------------------------------------------
# Flattened seismic data (NMO) plot (middle-right)
#-----------------------------------------------

  sunmo < panel.$picknow par=tmp2 verbose=0 > tmp8
  if [ $plottype -eq 0 ] ; then
    suxwigb < tmp8 xbox=634 ybox=10 wbox=300 hbox=450 \
             title="CMP $picknow after NMO" \
             label1=" Time (s)" label2="Offset (m)" \
             verbose=0 perc=$myperc key=offset &
  else


#-----------------------------------------------
# Stack window (right)
#-----------------------------------------------

  j=1
  while [ $j -le 8 ]
  do

# Append stack trace into tmp3 multiple times
    sustack < tmp8 >> tmp3

    j=`expr $j + 1`
  done

  suxwigb < tmp3 xbox=946 ybox=10 wbox=200 hbox=450 \
          title="CMP $picknow repeat stack trace" \
          label1=" Time (s)" d2num=50 key=cdp \
          verbose=0 perc=$myperc &

#-----------------------------------------------
# Manage picks (2): Prepare picks for vel profile
#-----------------------------------------------

  sed < par.$i '
  s/tnmo/xin/
  s/vnmo/yin/
              ' > par.uni.$i

#-----------------------------------------------
# Velocity profile (left)
#-----------------------------------------------

  unisam nout=$nt fxout=$tstart dxout=$dt \
         par=par.uni.$i method=mono |
  xgraph n=$nt nplot=1 d1=$dt f1=$tstart x2beg=$fvs x2end=$lvs \
        | label1=" Time (s)" label2="Velocity (m/s)" \
```

```
        title="CMP $picknow Stacking Velocity Function" \
        -geometry 300x450+10+10 -bg white style=seismic \
        grid1=solid grid2=solid linecolor=2 marksize=1 mark=0 \
        titleColor=black axesColor=blue &

#-----------------------------------------------
# Dialogue with user: re-pick ?
#-----------------------------------------------

  echo " "
  echo " t-v PICKS CMP $picknow"
  echo "----------------------"
  cat picks.$picknow
  echo " "
  echo "  Use the velocity profile (left),"
  echo "    the NMO-corrected gather (middle-right),"
  echo "    and the repeated stack trace (right)"
  echo "    to decide whether to re-pick the CMP."
  echo " "
  echo "Picks OK? (y/n) " > /dev/tty
  read response

  rm tmp*

# "n" means re-loop. Otherwise, continue to next CMP.
  case $response in
    n*)
        i=$i
        echo " "
        echo "Repick CMP $picknow. Overlay previous picks."
        repick=0
        cp picks.$picknow tmp7
        ;;
     *)
        echo "$picknow  $i" >> par.cmp
        i=`expr $i + 1`


        cp picks.$picknow tmp7
        ;;
     *)
        echo "$picknow  $i" >> par.cmp
        i=`expr $i + 1`
        repick=1
        echo "-- CLOSING CMP $picknow WINDOWS --"
        zap xwigb > tmp6
        zap ximage > tmp6
        zap xgraph > tmp6
        ;;
  esac

done

#-----------------------------------------------
# Create velocity output file
#-----------------------------------------------

mkparfile < par.cmp string1=cdp string2=# > par.0

i=0
while [ $i -le $numCMPs ]
do
  sed < par.$i 's/$/ \\/g' >> $outpicks
  i=`expr $i + 1`
done

#-----------------------------------------------
# Remove files and exit
#-----------------------------------------------
echo " "
echo " The output file of t-v pairs is "$outpicks
pause
rm -f panel.* picks.* par.* tmp*
exit
```