

## ADQUISICION Y PROCESAMIENTO DE DATOS SISMICOS SOMEROS 2D A TRAVES DE LA FALLA DE BUCARAMANGA EN EL AREA DE PIEDECUESTA (SANTANDER)

Julián Andrés Vargas Parra<sup>1</sup>

Maria Teresa Duarte<sup>2</sup>

Carlos Andrés Pérez Solano<sup>3</sup>

German Yuri Ojeda<sup>4</sup>

William Mauricio Agudelo<sup>5</sup>

<sup>1</sup> UIS-ECOPETROL, juliandresvargas1981@hotmail.com.

<sup>2</sup> Universidad EAFIT, duartegeology@yahoo.com

<sup>3</sup> Universidad EAFIT, carpsand@yahoo.com

<sup>4</sup> ECOPETROL, german.ojeda@ecopetrol.com.co

<sup>5</sup> ECOPETROL, william.agudelo@ecopetrol.com.co

### RESUMEN

La falla activa sinextral de Bucaramanga atraviesa el Área Metropolitana de Bucaramanga (Colombia), lugar de cerca de 1,2 millones de habitantes. La imagen de la geometría somera de esta falla es crucial para entender la recurrencia de procesos tectónicos sismogénicos que pueden haber ocurrido en el pasado geológico reciente. Las secciones sísmicas de la industria que cruzan esta falla no resuelven el estrato somero. Por tal motivo, la recolección de datos sísmicos de alta resolución de la zona de falla, es un parámetro relevante. En este trabajo, un experimento sísmico somero de alta resolución 2D (Sísmica de reflexión) es el procedimiento. Una porra de 18 libras es la fuente de energía usada, generando pulsos sísmicos con frecuencias entre 10 y 200 Hz. Los datos son grabados con un sistema digital de 32 canales. Este equipo usado, permitió adquirir datos sísmicos y tasas de muestreo de 0.25 milisegundos. Los datos fueron procesados usando hardware y software disponible en el INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO de ECOPETROL.

Este proyecto utiliza los conceptos y tecnologías de la industria del petróleo para solucionar problemas geológicos socialmente significativos.

**Palabras clave:** Adquisición Sísmica, Procesamiento Sísmico, Falla de Bucaramanga, Sísmica 2D.

### SHALLOW SEISMIC DATA ACQUISITION AND PROCESSING ON THE BUCARAMANGA FAULT IN PIEDECUESTA (SANTANDER)

#### ABSTRACT

The active, 220 km-long, left-lateral Bucaramanga Fault traverses the metropolitan area of Bucaramanga (Colombia), home to over 1.5 million people. Imaging the shallow geometry of this fault is crucial for understanding the recurrence of seismogenic tectonic processes that may have occurred in the recent

geological past. Industry seismic sections across this fault do not resolve shallow strata; collection of high-resolution seismic data across the fault zone is of paramount relevance.

In this work, a 2D high-resolution shallow seismic experiment (reflection seismic) is underway. An 18 lb sledgehammer is being used as energy source, generating seismic pulses with frequencies between 10 and 200 Hz. Data are being recorded with a 32 channel digital system. This equipment allows acquisition of both seismic data at sampling rates up to 0.25 milliseconds. Data was processed using hardware and software available at the INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO of ECOPETROL.

This project uses concepts and technology from oil industry and applying them to socially significant geological problems.

**Key words:** Seismic Acquisition, Seismic Processing, Bucaramanga fault, 2D Seismic.

## INTRODUCCIÓN

El área metropolitana de Bucaramanga está ubicada en el Nororiente de Colombia, a 422 Km. de la capital Bogotá. Posee una población de cerca de 1,2 millones de habitantes. Esta ciudad es atravesada por el sistema de fallas activas Bucaramanga-Santa Marta, la cual se distingue perfectamente en imágenes de satélite, desde el cerro Jurisdicciones (en la Sierra Nevada de Santa Marta) hasta su terminación en la falla de Soapaga (en Boyacá), tiene aproximadamente 600 Km. de longitud, 160° de azimut y presenta un buzamiento este a Vertical. Su movimiento es de rumbo sinetral con componente Inversa en algunos sectores. Esta falla es muy interesante geológicamente porque puso en contacto rocas de edad Jurasica y Neógenas muy recientes con rocas muy antiguas de edad precámbrica y solo un gran evento tectónico pudo hacer esto posible.

Muchos autores han estudiado la falla en superficie como sus geoformas y hasta su historia de evolución, pero no se conoce su geometría en el estrato somero, y se desconoce si su actividad reciente afecto las capas más superficiales del abanico aluvial o si el evento de depositación fue posterior al último evento sísmico producido por la falla, y ese es el objetivo de este trabajo.

## LOCALIZACION DEL AREA DE TRABAJO

El área de trabajo se localiza dentro del área metropolitana de Bucaramanga, en el municipio de Piedecuesta, ubicado a 10 Km. al sur de Bucaramanga, capital del departamento de Santander. En la autopista Bucaramanga – Piedecuesta en el Km. 7, están las instalaciones del Instituto Colombiano del Petróleo de ECOPETROL, y al costado Norte del ICP existe una pequeña vía que conduce a la Iglesia de los Ermitaños. En esta vía, se llevó a cabo el trabajo de campo, porque precisamente esta vía cruza perpendicularmente a la falla de Bucaramanga, lo cual la hace un sector óptimo para realizar la línea sísmica 2D (Ver Figuras 1 y 2).

## MARCO GEOLOGICO

En el área de trabajo el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta separa 2 tipos de litologías (Ver figura 3). A su costado occidental aparecen rocas de la formación Girón, de edad Jurasica, compuestas por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, suprayacidas por rocas sedimentarias recientes (Ver figura 4), producidas por flujos de escombros como conos de deyección, provenientes de la denudación de los materiales alterados que componen el Macizo de Santander, están constituidos esencialmente por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, tamaño grava y bloque, principalmente neises y granodiorita, esporádicamente anfibolitas y esquistos, en matriz areno-limosa. Estos depósitos sedimentarios se han venido acumulando mediante repetidos episodios de descargas torrenciales, probablemente violentas, por lo que los espesores y sus proporciones granulométricas y volumétricas son muy variados, su espesor no sobrepasa

los 15 metros. Al costado Oriental del sistema de fallas, aparece el Macizo de Santander compuesto principalmente del Neis de Bucaramanga, de edad Precámbrica, altamente meteorizado con intrusiones ígneas de edad Triásico-Jurásico. Este Neis esta compuesto principalmente de neis semipelítico, neis hornbléndico, anfibólita y esquisto, presenta una textura gruesa a media y su foliación tiene orientación variable, indicativa de perturbaciones tectónicas severas.

Se observa entre las 2 litologías, un claro cambio de topografía (Ver Figura 5), donde se observa las diferentes pendientes entre ellas. El análisis morfotectónico por medio de interpretación de fotos aéreas (Ver Figura 6) se realizó con base en el vuelo C-2596, con cubrimiento del sector del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP de ECOPELROL). El sector norte comprendido entre la Finca La Españolita y la vereda Granadillo y el sector sur entre los Barrios San Carlos y San Francisco. El drenaje en el sector oriental de la falla es dendrítico y subparalelo, con cañadas en V, con una densidad de drenaje muy alta y altas pendientes en los cauces laterales; generalmente cada quebrada presenta un cauce principal de pendientes variables de 3% a 10% y cañadas laterales con pendientes superiores al 10%.

La traza de falla es muy notoria, y continua, tanto en imágenes de satélite como en fotografías aéreas. Controla y enfila numerosos drenajes y su plano de falla sirve de contacto entre litologías con diferente resistencia a los procesos erosivos. La traza de falla en este sector es principalmente rectilínea y sinuosa, cartografiable en 2 Km., de los cuales se interpreto una (1) foto con sus pares, equivalente a un 0,3 % de su longitud total. Posee una dirección aproximada N15W, esencialmente de tipo de rumbo. En el sector occidental de la falla se observa el flujo de escombros producidos como conos de deyección con pendientes menores a 10 grados y estas pendientes disminuyen hacia el occidente. El 50 %

de este área esta urbanizada, allí esta ubicado el ICP sus laboratorios y una planta piloto. Hacia el sur aparece un conjunto de casas.

Se cartografían una serie de fallas que cruzan la falla de Bucaramanga y están sido movidas por la falla activa regional. Esta serie de fallas podrían ser tener desplazamiento dextral, se observan por el lineamiento de drenajes que bajan del macizo. En una imagen de relieve en sombras (Ver Figura 7) se observa una serie de fallas posiblemente dextrales casi perpendiculares a la falla de Bucaramanga, que demuestra que estas fallas de segundo orden están relacionadas con el sistemas de fallas Bucaramanga-Santa Marta y demuestran un mas la actividad reciente de la falla.

En todo el área Metropolitana de Bucaramanga, la geomorfología muestra la actividad neotectónica de la falla, aparecen geofomas de origen estructural-denudacional como lomos estructurales, silletas de falla, lagos de falla (Ver Figura 8), facetas triangulares, entre otras.

## **METODOLOGIA**

La técnica aplicada en este trabajo, muy usada por la industria del Petróleo, es el método sísmico. Este método de investigación del subsuelo se fundamenta en la medición de la velocidad de propagación de las ondas elásticas artificiales a través de las diversas capas que lo integran. Cada grupo de rocas esta caracterizado por una cierta velocidad de propagación de las ondas sísmicas, independiente de su edad geológica. Este método esta dividido en 3 etapas: La adquisición, el procesamiento y la interpretación de los datos.

### **Localización y Adquisición del Perfil Sísmico**

La campaña de prospección sísmica consistió en un perfil de reflexión de alta resolución perpendicular al rumbo de la falla de Bucaramanga, en el norte de Piedecuesta. (Ver Figura 3). El equipo usado durante este experimento sísmico en campo consistió de una porra de

18 libras como fuente sísmica, un equipo electrónico que permite la adquisición simultánea de datos sísmicos con 32 canales y tasas de muestreo de 0,25 milisegundos (diseñado por ECOPEPETROL), un geófono multicomponente y otro electromagnético, un portátil para guardar la información, un GPS, un equipo de topografía y equipos de seguridad personal. El diseño implementado (Ver Figura 9) se basó en el trabajo hecho por Hunter (1984), en el cual, él propone que en capas superficiales no consolidadas que tengan aproximadamente 20 metros de espesor el método de reflexión puede ser muy eficiente usando equipos de adquisición, para mapear la topografía de la interfase capa no consolidada y capa rocosa. Propone la técnica del offset óptimo u offset común, la cual utiliza un canal y después de cada disparo, se va moviendo la fuente y el geófono en un arreglo 2D sin variar la distancia fuente-receptor. Los parámetros de adquisición pueden ser vistos en la tabla 1.

## Procesamiento de Datos Sísmicos

En la implantación de la geometría se ha considerado el trazo del perfil sísmico horizontal ( $Y=0$ ) y se tomó el valor topográfico dado por un GPS para el primer punto y los demás puntos fueron dados por el levantamiento topográfico.

En el procesamiento de datos de sísmica superficial se utilizan los mismos algoritmos, incluso el mismo software, que en sísmica profunda. En particular, en este trabajo se usó un paquete comercial de software (ProMax,) ampliamente usado en el procesamiento de la sísmica de exploración petrolera. El procesamiento consiste en la elección y posterior aplicación de los parámetros y algoritmos de tratamiento adecuados a los datos sísmicos adquiridos en el campo (datos brutos) con el fin de obtener secciones sísmicas de calidad.

El objetivo fundamental de todo procesamiento multiseñal es aislar en los registros las reflexiones de los otros eventos sísmicos que se superponen a ellas (ruido ambiental,

Ground Roll, onda aérea, etc.). Actualmente, debido al gran incremento del volumen de datos (mayor capacidad instrumental) y al desarrollo de nuevos algoritmos (mayor potencia de cálculo), el dominio de las técnicas de procesado es el pilar básico de la prospección geofísica. Otro factor decisivo en sismica de alta resolución que afecta al procesamiento es la necesidad de preservar las altas frecuencias ya que las estructuras geológicas superficiales están en el límite de la detectabilidad sísmica y la aplicación de filtros para suprimir los eventos que no pertenecen a reflexiones caen, a menudo, en el mismo rango de frecuencias, de manera que cualquier disminución de este rango supone una menor definición de la sección sísmica.

Es también un precepto que todo algoritmo empleado durante el procesado debe preservar el máximo posible las reflexiones originales, de manera que su aplicación no se superponga a éstas creando "artefactos" que puedan considerarse como falsas reflexiones. Solo se procesa en etapas de pre-apilamiento y apilamiento.

### **Tratamientos de Pre-apilamiento:**

**Almacenamiento:** los datos de campo fueron grabados en formatos SEG-Y, compatible con el software utilizado y formato recomendado por la Society of Exploration Geophysicists (SEG).

**Cargar la Geometría:** Se definió correctamente las coordenadas (X, Y, Z) de cada una de las estaciones (fuentes y receptores), así como algunas otras características como el offset, entre otras. Algunos de estos datos deben ser introducidos manualmente, mientras que otros ya se encuentran en los headers de los ficheros de cada registro sísmico. Una vez definida la geometría de la línea sísmica se procede a su implantación de manera que cada traza de cada uno de los tiros de campo queda perfectamente ubicada.

**Eliminación de Trazas:** Se eliminaron total o parcialmente, aquellas trazas que presentan ruido o malas conexiones. El mal funcionamiento del geófono implica la pérdida de una traza, pero no se presentó cambios en la polaridad.

**Lecturas de las Primeras Arribos:** Se emplearon estas lecturas para calcular la velocidad de los primeros arribos y así realizar las correcciones estáticas.

**Filtro Pasabandas:** Se diseñó un filtro pasabandas de Ormsby definido por el trapecio 30-40-80-100 Hz.

**Aplicación de las Correcciones Estáticas:** Era importante realizarlas ya que en sismica superficial las frecuencias son muy elevadas, las primeras capas son heterogéneas y presentan bajas velocidades. Además el área presentaba cambios topográficos que obligaron a realizar correcciones por elevación.

**Control de Ganancia Automática (AGC):** Se aplicó esta función de ganancia para aumentar la amplitud de las trazas.

**Deconvolución:** Se aplicó en esta etapa etapas, con el fin de aumentar la resolución temporal de las reflexiones.

**Tratamientos de Apilamiento:**

**Análisis de Velocidad:** Se halló un campo de velocidades, que se requiere en el apilamiento para obtener la sección sísmica.

**Apilamiento:** con los resultados del análisis de velocidad y al no tener que aplicar correcciones NMO ya que al mantener un offset Óptimo o Común según Hunter (1984) no se requiere hacer este paso. Así se crea una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo de offset cero.

## RESULTADOS OBTENIDOS

El resultado obtenido es el de una imagen sísmica somera (Ver Figuras 10 y 11), que represento el subsuelo, como si se le hubiese tomado una foto o se hubiese hecho un corte geológico. Se obtuvo una imagen sin tener que perforar.

## DISCUSION DE RESULTADOS

Todavía hay controversia si el nido sísmico en Bucaramanga y la falla de Bucaramanga están relacionados entre si, lo que si se puede encontrar es de actividad sísmica reciente sobre el subsuelo del área metropolitana de Bucaramanga.

Para un proyecto de investigación aun es difícil usar la mejor fuente que existe, que es la dinamita por su alto costo, por su manejo y permiso para usar en un área de trabajo.

Para entender bien porque el fallamiento es paralelo, se requiere ver mas profunda la sección sísmica para entender bien esa geometría superficial de la falla.

## CONCLUSIONES

La porra a pesar de ser la mejor fuente sísmica somera de alta resolución, no alcanza superar los 80 metros de profundidad debido a que no genera la suficiente energía para que la onda viaje a través de las capas mas profundas, y si se necesita observar estructuras o eventos a profundidades superiores a los 100 metros se requiere cambiar la fuente.

La sección sísmica muestra la presencia de fallamiento normal e inverso a través de las capas someras del área de trabajo, indicando actividad muy reciente y posterior al evento de depositación del cuaternario. Como el depósito de origen aluvial esta poco consolidado, no es muy claro observar las dislocaciones de los reflectores.

El hecho de encontrar más de un fallamiento en la sección sísmica, se debe a que la falla de Bucaramanga no es solo una, sino es un sistema de fallas paralelas y perpendiculares, donde la falla principal tiene rumbo de N15W.

En los lugares donde aparece el fallamiento son sitios donde cambia bruscamente la topografía.

El hecho de que la falla sea tan activa con sismos de menos de 50 mil años, obliga a que el área metropolitana de Bucaramanga se mantenga en alto riesgo, y se cree todos los mecanismos para estar alertas y mejor preparados ante cualquier sismo de gran poder.

Con respecto a la sísmica, La sísmica de alta resolución somera es una de las técnicas geofísicas más útiles para la prospección del subsuelo. Su gran potencial de aplicación en el reconocimiento de estructuras geológicas la hace una gran herramienta para los geólogos y geofísicos.

La escala de interés de este trabajo se caracterizo por un subsuelo muy heterogéneo en el cual las capas mas superficiales presentaban grados de compactación diferentes dando lugar a cambios bruscos de velocidad, de manera que se generan muchas fases sísmicas; ondas superficiales, difracciones.

Un aspecto del tratamiento de los registros sísmicos que más se enfoco fue el de la eliminación del ruido que se superpone a las reflexiones superficiales.

Se destaca la necesidad de obtener toda la información sobre el área de estudio antes de la adquisición de datos sísmicos, para implementar un buen arreglo de geófonos, y así mejorar la imagen sísmica.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Geología y a todo su cuerpo docente, en el especial al Profesor Jorge Eduardo Pinto, al ICP de ECOPETROL, y a todos los funcionarios y contratistas del área de Geofísica en especial a German Yuri Ojeda, William Mauricio Agudelo, Saúl Guevara, Andrés Calle, Jorge Monsegny, Diego Barrera, Danny Rueda, Alexandra Plata, y a

los estudiantes de maestría de la Universidad EAFIT Carlos Pérez y Maria Teresa Duarte, gracias por sus valiosos aportes en este trabajo.

## REFERENCIAS

Almeyda, W., Evaluación del Riesgo Sísmico del Sistema de Acueducto de Bucaramanga a partir del Estudio de Microzonificación Sísmica Indicativa de Bucaramanga (Colombia). Acueducto de Bucaramanga. 2003.

Anderson, N., Akingbade, A., Overview of the Shallow Seismic Reflection Technique. University of Missouri. USA. 2000.

Beltrán, R. y Rey, A. Comportamiento Estructural asociado al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y diaclasas, para definir una red de drenaje subterráneo en el Macizo de Santander, sección entre Piedecuesta (Río de Oro) y Bucaramanga (Río Surata). Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, 2002.

Díaz, G.; y, Suárez, M. Evidencias Neotectónicas del Sistema de Fallas del Suárez en su Confluencia con el Sistema de Fallas de Bucaramanga. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.1998.

Evans, B. A Handbook for Seismic Data Acquisition in Exploration, Geophysical Monograph Series. Society of Exploration Geophysicists. N° 7. 1997.

Gaya, M. Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo Turbídico de Ainsa (Huesca-España). Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña. p. 100. 2004.

Gonzalez, G.; Boyce, J.; y, Koseoglu, B. Sísmica de Reflexión de Alta Resolución en el Estudio del Cuaternario de Áreas de Pie de Monte. Revista de la Asociación Geológica Argentina. Buenos Aires. 58 (1):78-84. 2003.

INGEOMINAS. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Bogotá D.C..2001

INGEOMINAS. Zonificación de amenazas por movimientos de masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta.2008

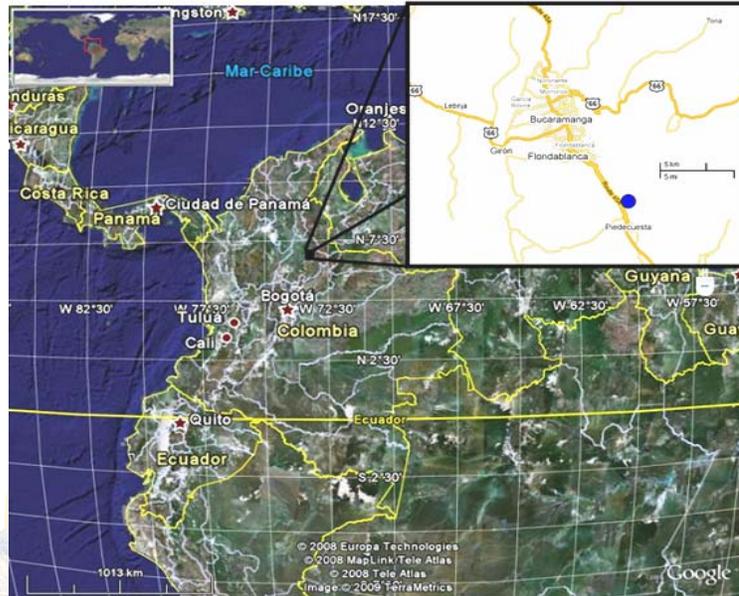
Hornbach, M. Development of Low Cost, Portable Multi-channel Seismic Data Acquisition System for Classroom Experiments and Independent Studies. Journal of Geosciences Education. Vol. 52. N° 4. University of Wyoming. USA. 2004.

Hunter, J.; Pullan, S.; Burns, R.; Gagne, R., Good, R. Shallow Seismic Reflection Mapping of the Overburden - bedrock Interface with the Engineering Seismograph-some Simple Techniques. 1984.

Prado, R.; Malagutti, W., Dourado, J. The Use of Shallow Seismic Reflection Technique in Near Surface Exploration of Urban Sites: An Evaluation in the City of Sao Paulo. Brazil. Brazilian. Journal of Geophysics. Vol. 19. 2001. p. 3. 2002.

WARD, W.; et al. . Geología del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander y Norte de Santander. Ingeominas. Boletín Geológico N° 21. Bogotá D.C. (1-3):1-32.1973

**FIGURAS**



**FIGURA 1.** Localización del área de trabajo (Punto azul). (Fuente: Google Earth 2009)



**FIGURA 2.** Localización del área de trabajo. Línea roja: Línea sísmica 2D, Línea verde: Falla de Bucaramanga (Fuente: Google Earth 2009)

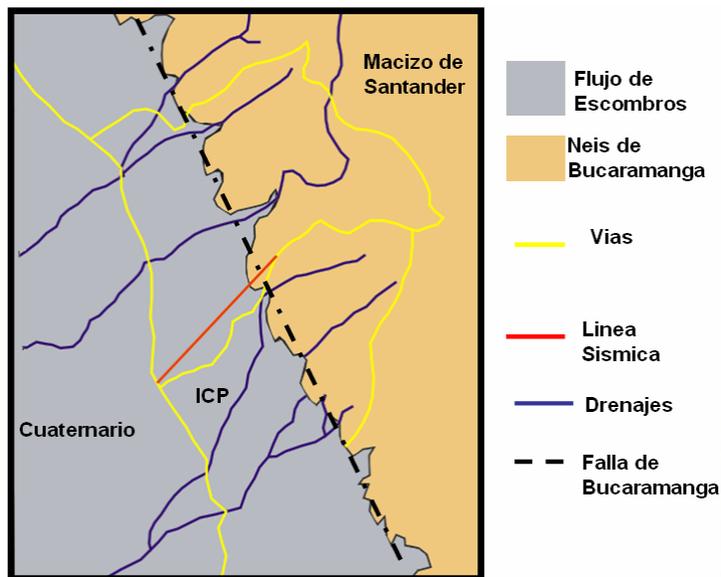
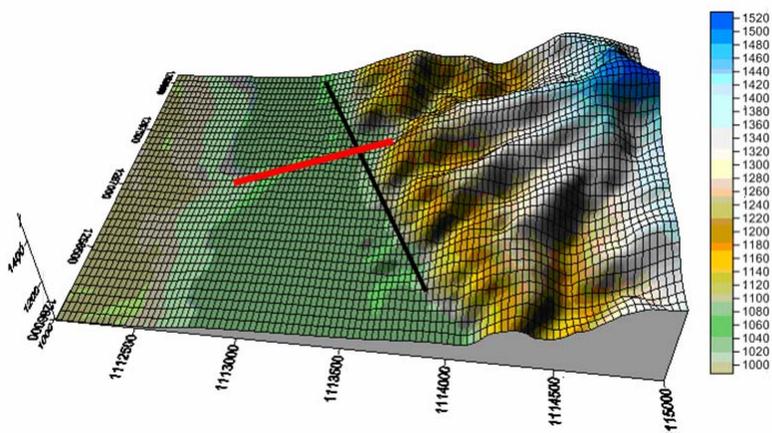


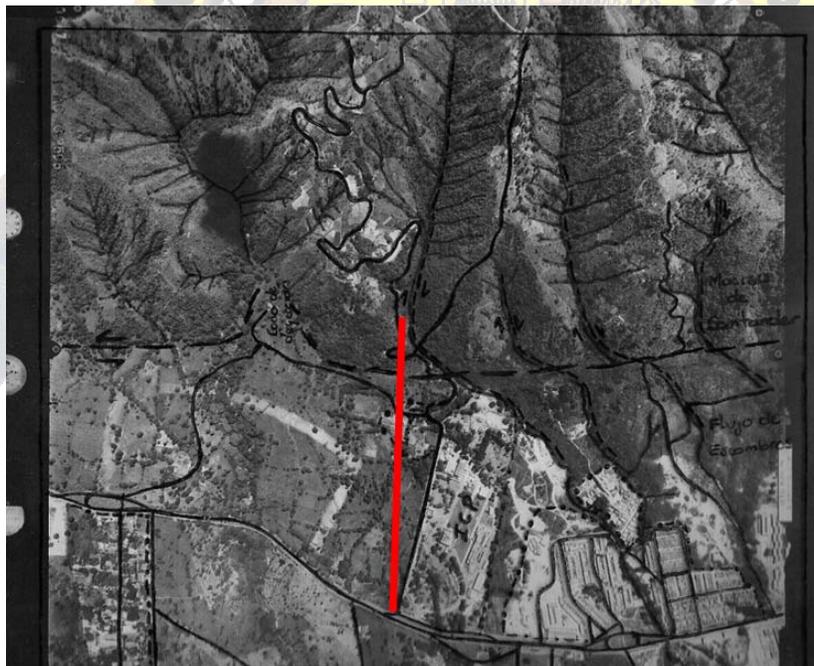
FIGURA 3. Mapa Geológico del Área de trabajo.



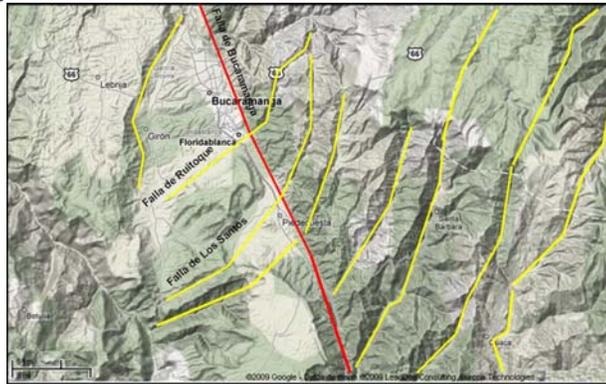
FIGURA 4. Flujo de escombros, compuesto por fragmentos del Macizo de Santander.



**FIGURA 5.** Modelado topográfico Del terreno. Línea roja: Línea Sísmica, Línea Negra: Falla de Bucaramanga.



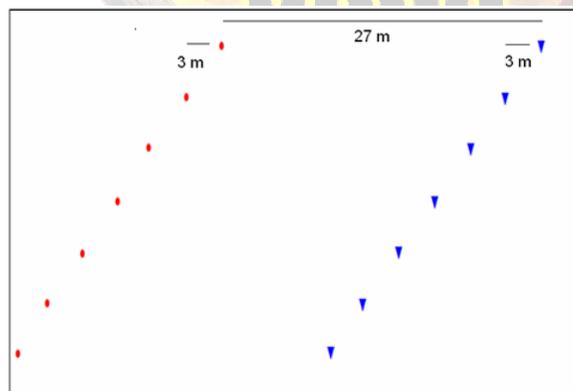
**FIGURA 6.** Fotointerpretación de fotos aéreas, Línea roja: Línea Sísmica.



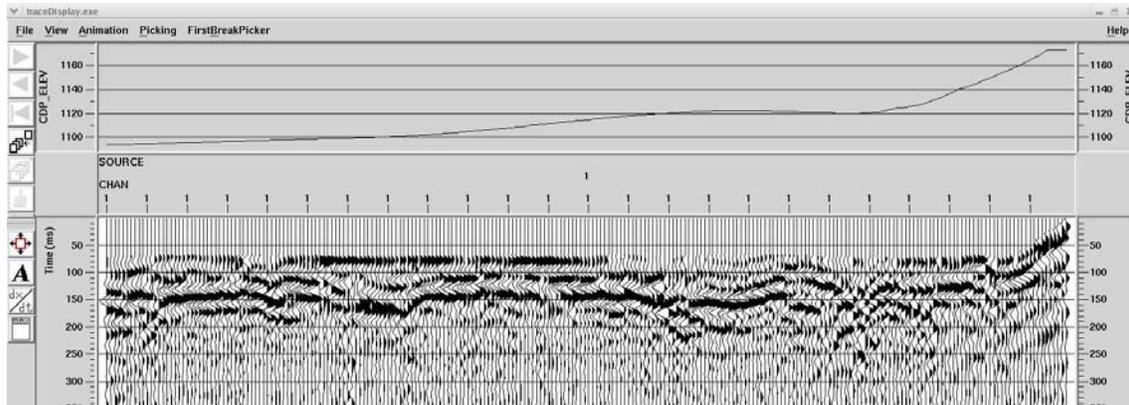
**FIGURA 7.** Mapa de sombras donde se aprecia la expresión morfoestructural de la falla de Bucaramanga y una serie de fallas que la cruzan casi perpendicularmente. Línea roja: Falla de Bucaramanga, Líneas Amarillas: Fallas asociadas al sistemas de falla Bucaramanga-Santa Marta



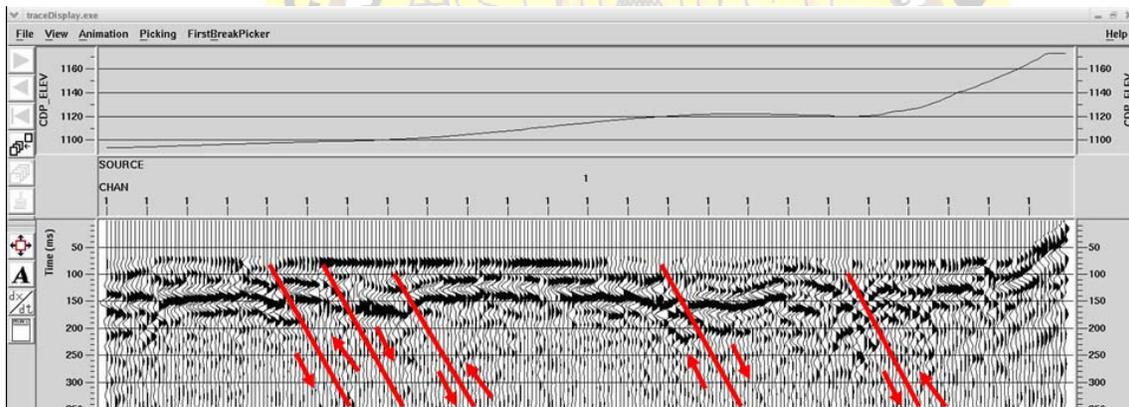
**FIGURA 8.** Lago de falla, ubicado en el oriente de Bucaramanga



**FIGURA 9.** Diseño de la línea de reflexión. Manteniendo La distancia fuente-receptor igual. Punto rojo: Disparos, Triangulos azules: Geofonos.



a)



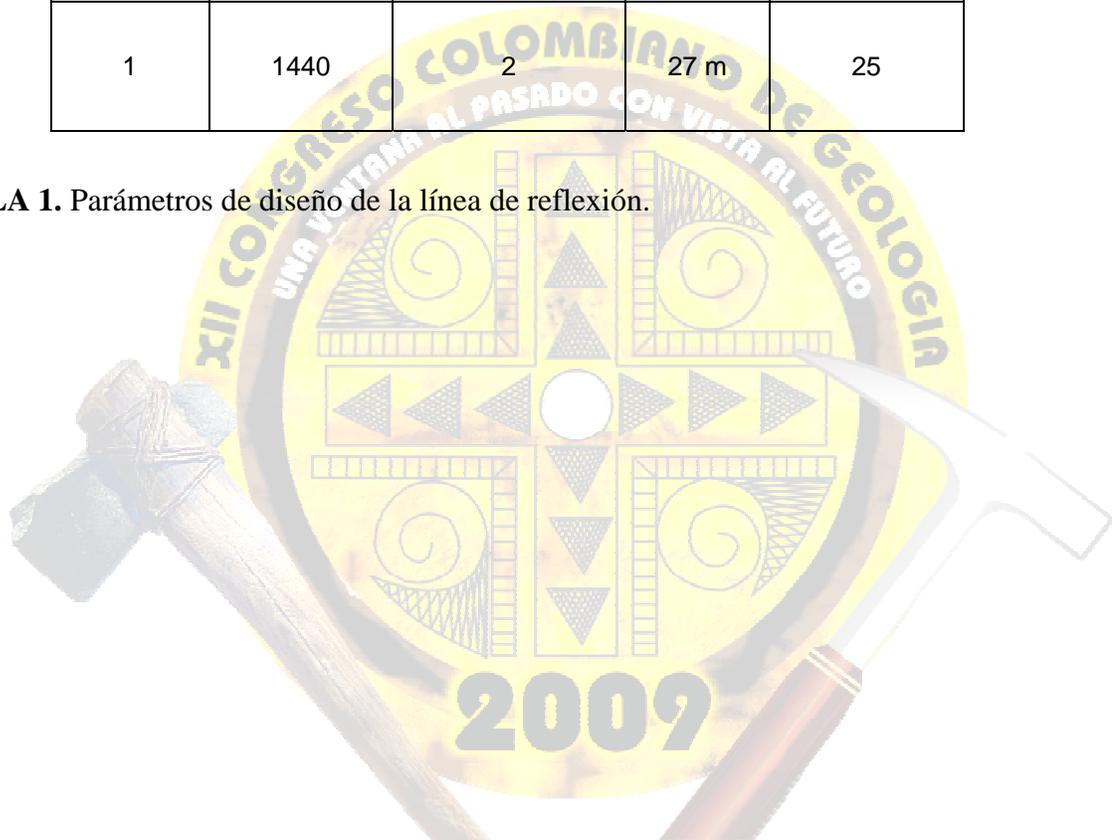
b)

**FIGURA 10.** Sección sísmica (Offset vs. Tiempo). En la parte superior de la sección sísmica esta representada la topografía del área de trabajo. En b) se observa el fallamiento y SUS direcciones de movimiento.

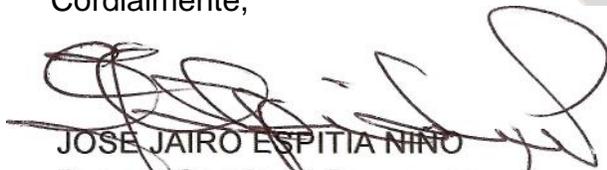
TABLAS

Numero de Geófonos	Numero Total de Disparos	Distancia entre disparos y entre receptores	Offset	Tasa de muestreo(ms)
1	1440	2	27 m	25

**TABLA 1.** Parámetros de diseño de la línea de reflexión.



Cordialmente,

  
**JOSE JAIRÓ ESPITIA NIÑO**  
 Decano Seccional Sogamoso  
 Presidente XII CCG

  
**HECTOR FONSECA PERALTA**  
 Secretario Ejecutivo XII CCG