

**REVISIÓN DE LA INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA ESTRUCTURAL DEL ÁREA  
DE BRUNO EN EL DEPÓSITO CARBONÍFERO DEL CERREJÓN EN EL  
DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA**

**XAVIER ANTHONI GÓMEZ VÁSQUEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2012**

---

**REVISIÓN DE LA INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA ESTRUCTURAL DEL ÁREA  
DE BRUNO EN EL DEPÓSITO CARBONÍFERO DEL CERREJÓN EN EL  
DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA**

**XAVIER ANTHONI GÓMEZ VÁSQUEZ**

**Proyecto de Grado para optar al título de Geólogo**

**DIRECTOR**

**RICARDO MIER UMAÑA**

**Profesor Universidad Industrial de Santander**

**TUTOR**

**WILSON MENDOZA CARREÑO**

**Geólogo Modelador Especialista, El Cerrejón Ltda.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

A Dios por ser mi bendición, mi mayor inspiración en este sueño y mi fortaleza en cada momento difícil, por darme salud y sabiduría, y por ser Él quien me posicionó en lugares de privilegio.

A mis padres Javier Gómez y Yanith Vásquez quienes fueron mi sustento en todo momento, por su ejemplo, entrega, amor y dedicación.

A mis hermanos Jennifer Eliana y Juan Jesús por ser mi alegría, mi motivación y apoyo incondicional.

A todos mis familiares por apoyarme y animarme a culminar con éxito esta etapa de mi vida

A Angelita, por su apoyo, su comprensión, cariño y paciencia, sobretodo paciencia, gracias por compartir conmigo y hacer parte de mi vida.

A todos mis amigos quienes compartieron conmigo y vivieron paso a paso cada uno de mis logros, a mi compadre Efra, a mis Amigos de la UIS, de la MCI y compañeros del Cerrejón.

Y a todos aquellos que hacen parte de mi vida y que siempre estuvieron conmigo apoyándome.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Geología y a sus profesores que contribuyeron en mi formación como profesional y como persona.

A El Cerrejón que me dio la oportunidad de realizar las prácticas empresariales y aportó a mi crecimiento profesional.

A mi director, el Profesor Ricardo Mier por su aporte y participación en el desarrollo de este proyecto.

A mi tutor de prácticas, el Geólogo Wilson Mendoza por su disposición, dedicación y soporte profesional.

Al Superintendente de Geología y Exploración del Cerrejón German Hernández, al Supervisor de Exploración Fedor Tapias y al equipo de geólogos del Cerrejón, por sus valiosas sugerencias y sus acertados aportes durante el desarrollo de las prácticas empresariales.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. METODOLOGÍA	20
2.1 FASE INICIAL	21
2.2 FASE ANALÍTICA	21
2.3 FASE INTERPRETATIVA	22
3. GEOLOGÍA REGIONAL	24
3.1 ESTRATIGRAFÍA	24
3.2 TECTÓNICA	32
4. GEOLOGÍA LOCAL	36
4.1 ESTRATIGRAFÍA	36
4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	40
5. GENERALIDADES DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS	42
5.1 GAMMA RAY	42
5.2 RESISTIVIDAD	43
5.3 CALIPER	44
5.4 DENSIDAD	45
5.5 REGISTROS DIPMETER	45

---

5.5.1 Interpretación estructural del registro dipmeter	48
5.6 SÍSMICA	51
6. DESARROLLO DEL PROYECTO	55
6.1 FASE INICIAL	55
6.2 FASE ANALÍTICA	57
6.3 FASE INTERPRETATIVA	60
7. RESULTADOS	65
7.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	66
7.1.1 Fallas	66
7.1.2 Pliegues	67
8. CONCLUSIONES	69
9. RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS	76

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Mapa de localización del Cerrejón.	18
Figura 2. Flujograma de trabajo.	20
Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Cesar-Ranchería	25
Figura 4. Marco Tectónico del Norte de Colombia, con la dirección de los esfuerzos principales que afectan la Cuenca Cesar – Ranchería	33
Figura 5. Tectónica Regional. Modelo estructural del corte NW-SE de la parte norte de Colombia entre la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia y los Andes de Mérida en Venezuela.	34
Figura 6. Geología general (arriba) y local (debajo) del área de estudio.	37
Figura 7. Combinación de perfil GR o SP con perfiles de Resistividad y Caliper.	43
Figura 8. Registro Caliper.	44
Figura 9. Registro de Densidad.	46
Figura 10. Vector de buzamiento que se presenta en un registro Dipmeter.	46
Figura 11. Patrones por colores para la interpretación de los vectores de buzamiento.	47
Figura 12. Patrón A: Sin cambios en la dirección y el buzamiento, sin falla, o con falla de movimiento paralelo a la estratificación.	48
Figura 13. Patrón B: Cambios en la dirección, falla paralela a la estratificación.	48
Figura 14. Patrón C: Incremento del buzamiento hacia el fondo del pozo. Falla Inversa.	49
Figura 15. Patrón D: Disminución del buzamiento hacia el fondo del pozo. Falla Inversa.	49
Figura 16. Patrón E: Falla Inversa.	50
Figura 17. Patrones F y G: Falla Inversa con pliegue de arrastre.	50
Figura 18. Patrón H: Cambio gradual en el buzamiento de la estratificación.	50

Figura 19. Patrón I: Falla Normal.	51
Figura 20. Sección sísmica (arriba), Sección sísmica interpretada (abajo).	52
Figura 21. Tipos de Ondas sísmicas.	53
Figura 22. Envío de señal elástica al terreno (normalmente desde superficie) y registro de eventos reflejados en estaciones registradoras (geófonos) hincados en el terreno en forma regular y equidistante.	54
Figura 23. Carpetas de Registros de Pozo.	56
Figura 24. Nomenclatura de los mantos de carbón.	58
Figura 25. Correlación estructural de mantos de carbón pozo a pozo por sección.	59
Figura 26. Representación de los Buzamientos (inclinación) en los pozos.	59
Figura 27. Tabla para Corrección de Buzamiento.	59
Figura 28. Mapa de Líneas Sísmicas. En el recuadro rojo se encuentra la zona de estudio.	62
Figura 29. Mapa de Líneas Sísmicas (zoom). De las Líneas 4 y 5 solo se tomó la parte de la sección que se proyecta en el área de estudio.	62
Figura 30. Sección Sísmica que pertenece a la Línea 1.	63
Figura 31. Sección sísmica que pertenece a la Línea 4.	64

---

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. SECCIONES ESTRUCTURALES AREA DE BRUNO	77
ANEXO B. MAPA DEL AREA DE BRUNO	78
ANEXO C. SECCION ESTRUCTURAL AREA DE BRUNO	79

## GLOSARIO<sup>1</sup>

**ANTICLINAL:** Pliegue en el que las capas situadas en el interior (núcleo) de la curvatura son las más antiguas, su estructura es convexa hacia arriba.

**BUZAMIENTO:** Ángulo que forma la superficie de un estrato con la horizontal, medido en el plano que contiene la línea de máxima pendiente.

**CARBÓN:** Mineral de color negro formado básicamente por carbono y empleado como fuente calorífico.

**CABALGAMIENTO:** Conjunto de capas rocosas de edad más antigua que se superponen sobre otras de edad más moderna por efecto de presiones laterales.

**CORRELACIÓN:** Establecimiento de correspondencia en carácter y posición estratigráfica entre dos unidades geológicas.

**FALLA:** Fractura del terreno con desplazamiento relativo de las partes separadas.

**FLANCO:** En un pliegue, cada uno de sus lados.

**FORMACIÓN:** Unidad litoestratigráfica fundamental. Cuerpo de rocas identificado por sus características litológicas y su posición estratigráfica. Cartografiable a escala 1:25.000

**GRUPO:** Unidad litoestratigráfica de rango mayor que la Formación comprende dos, o más, formaciones adyacentes.

---

<sup>1</sup> <http://es.scribd.com>

**LÍNEA SÍSMICA:** Constituye la poligonal definida por los puntos de disparo y observación de cada recorrido independiente de una campaña o trabajo de prospección sísmica.

**MANTO:** Yacimiento mineral de forma tabular que puede ser o no horizontal, generalmente confinado en un horizonte estratigráfico.

**MONOCLINAL:** 1. Estilo-. Relacionado con las estructuras en las que las capas están inclinadas en el mismo sentido en grandes extensiones. 2. Pliegue-. Estructura que desplaza capas como lo haría una falla normal pero sin romperlas.

**PLACA TECTÓNICA:** Es una gran capa de roca sólida de la corteza terrestre, de forma irregular y generalmente compuesta de material oceánico y/o continental.

**PLIEGUE:** Deformación resultante de la flexión o torsión de rocas.

**POZO:** Un pozo refiere a cualquier perforación del suelo, generalmente vertical y de forma cilíndrica, diseñada con el objeto de hallar y extraer fluido combustible, agua subterránea, o simplemente para obtener información del subsuelo; que tiene la profundidad suficiente para alcanzar lo que se busca.

**REGISTRO GEOFÍSICO DE POZO:** Son técnicas geofísicas in situ que consisten en una serie de mediciones obtenidas por una sonda con varios sensores o antenas transmisoras y receptoras que se introduce en una perforación, para determinar las curvas de cada parámetro que se desea conocer. Con esta técnica se obtiene a diferentes profundidades los parámetros físicos y geológicos de la formación. Los hay de varios tipos, se destacan el de Densidad, Gamma Ray, Resistividad, Dipmeter y Caliper.

**RUMBO:** Se refiere al ángulo que forma una línea comprendida en un plano horizontal con otra tomada como referencia, normalmente la línea geográfica Norte-Sur.

**SECCIÓN GEOLÓGICA:** Representa la configuración de estructuras y formaciones generalmente en una vista en un plano vertical, son utilizadas para resolver problemas estratigráficos y estructurales y sirven como ilustraciones finales de un modelo geológico elaborado.

**SECCIÓN SÍSMICA:** Es el perfil sísmico obtenido por apilamiento de los registros sísmicos, constituye un corte cuya trayectoria superficial es una línea sísmica.

**SINCLINAL:** Pliegue en el que las capas situadas en el interior de la curvatura son las más jóvenes, su estructura es cóncava.

**UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA:** Volumen de materiales diferenciado por sus características litológicas.

## RESUMEN

**TÍTULO:** REVISIÓN DE LA INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA ESTRUCTURAL DEL ÁREA DE BRUNO EN EL DEPÓSITO CARBONÍFERO DEL CERREJÓN EN EL DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA\*.

**AUTOR:** XAVIER ANTHONI GÓMEZ VÁSQUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Secciones Estructurales, Registros de Pozo, Formación Cerrejón, Carbón.

El depósito carbonífero del Cerrejón localizado en Colombia, en el departamento de La Guajira, es uno de los yacimientos más importantes a nivel mundial y tiene una de las reservas más grandes de Latinoamérica. El Cerrejón posee uno de los proyectos de infraestructura de mayor tamaño en el país y sus magnitudes impresionan en todos los aspectos de la minería. El desarrollo de esta minería demanda un mayor conocimiento de la geología del subsuelo y del modelo estructural del depósito, para esto, es preciso comprender en gran parte la dinámica geológica-estructural de éste.

Dentro del yacimiento se encuentra el área de Bruno, que es un nuevo bloque de exploración que se ha venido estudiando con el fin de actualizar y mejorar el modelo geológico actual de la zona, sin embargo, debido a la complejidad tectónica de éste, el modelo necesita una mayor definición. Esta se hará mediante una completa revisión de la información básica existente, de tal forma que se determine la distribución espacial de los mantos de carbón, su continuidad, espesor y su disposición estructural.

La interpretación geológica estructural de la zona, se realizará mediante la correlación de los diferentes intervalos de carbón observados en los registros geofísicos (curvas de densidad, gamma, y resistividad, entre otros), en cada uno de los pozos seleccionados incluidos en las diferentes secciones. Este proyecto aportará una interpretación estructural alternativa para el mejoramiento del modelo geológico actual del bloque de Bruno.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director Ricardo Mier Umaña Tutor Wilson Mendoza Carreño

---

## ABSTRACT

**TITLE:** REVIEW OF THE GEOLOGICAL STRUCTURAL INTERPRETATION OF BRUNO'S AREA IN THE COAL DEPOSITS OF THE CERREJÓN IN THE DEPARTMENT OF LA GUAJIRA\*.

**AUTHOR:** XAVIER ANTHONI GÓMEZ VÁSQUEZ\*\*

**KEYWORDS:** Structural Sections, Well Logs, Cerrejón Formation, Coal.

The deposits-coal of the Cerrejón located in Colombia, in department of La Guajira, is one of the most important deposits worldwide and has one of the biggest reserves of Latin America. The Cerrejón possesses one of the projects of infrastructure of major size in the country and his magnitudes impress in all the aspects of the mining industry. The development of this mining industry demands a major knowledge of the geology of the subsoil and of the structural model of deposits, and for this, it is necessary to understand largely the geological-structural dynamics of this one.

Inside the deposit it find Bruno's area that is a new exploration block that one has come studying with the purpose of to upgrade and to improve the current geologic pattern of the area, however, due to the tectonic complexity of this, the pattern needs a bigger definition. This it will be made by means of a complete revision of the existent basic information, in such a form that is determined the space distribution of the beds of coal, their continuity thickness and their structural disposition.

The geologic structural interpretation of the area will be carried out by means of the correlation of the different intervals of coal observed in the geophysical registrations (curve of density, gamma ray, and resistivity, among other), in each one of the selected wells included in the different sections. This project will contribute an alternative structural interpretation for the improvement of the current geologic pattern of Bruno's block.

---

\* Project of Grade

\*\* Faculty of Engineering Physicochemical, Geology School Director Ricardo Mier Umaña Tutor  
Wilson Mendoza Carreño

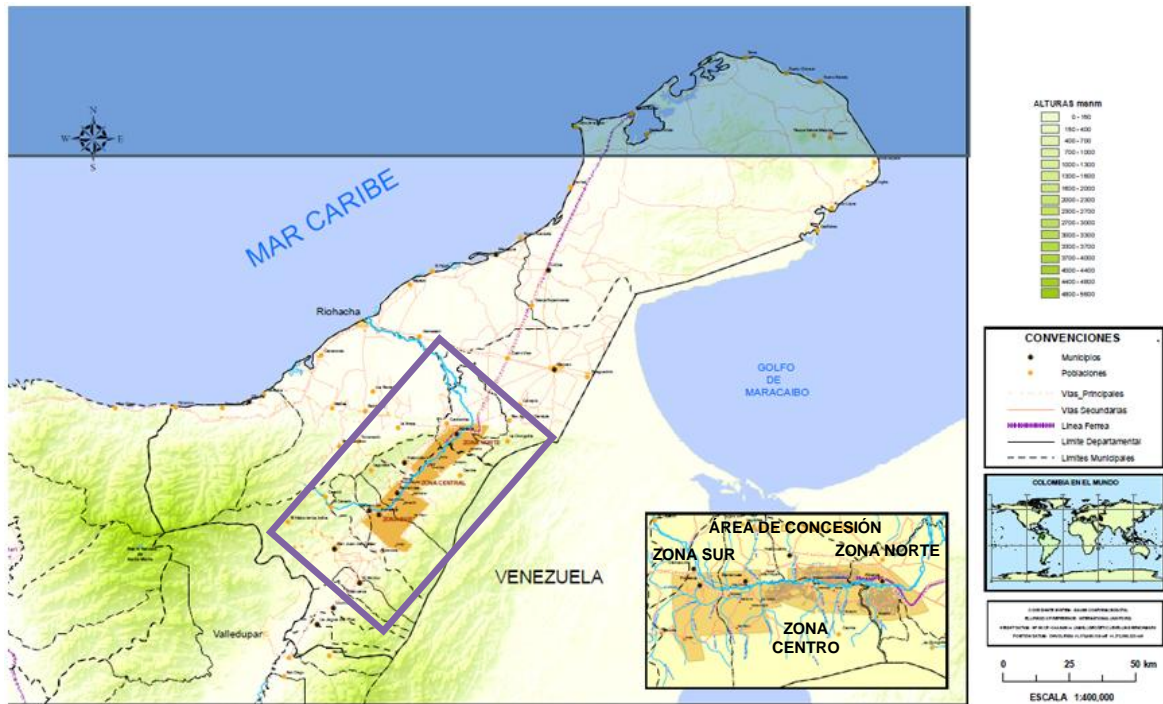
## INTRODUCCIÓN

El carbón es el combustible fósil más abundante en la naturaleza con 984.453 Millones de toneladas (Mt) en reservas mundiales medidas a finales del 2003, de los cuales 52,7% son carbones antracíticos y bituminosos y el 47,3% sub-bituminosos y lignitos (World Energy Council, 2003). Colombia es el país con mayores reservas de carbón en América Latina, cuenta con recursos potenciales de 16.992 Mt; por otra parte, es el sexto exportador de carbón en el mundo, con una participación de 6,3%, equivalente a 50 Mt anuales de carbón.

El Cerrejón es el mayor exportador del país, con una mina a tajo abierto que es la más grande del mundo, ésta se localiza en el departamento de La Guajira entre los municipios de Albania y Barrancas con una extensión aproximada de 80.000 hectáreas (ver Figura 1). Para cumplir el objetivo de posicionarse como una de las empresas carboníferas de mayor exportación, El Cerrejón requiere de una continua exploración de nuevas áreas de minería, de manera que se garantice la continuidad y la calidad de la explotación.

El área de Bruno es un bloque de exploración que se encuentra ubicado en el depósito carbonífero, éste hace parte de la Formación Cerrejón en la cuenca Cesar-Ranchería y es afectado por un cinturón de deformación que incluye la Falla Ranchería y la Falla de La Oca.

**Figura 1. Mapa de localización del Cerrejón.**



Fuente [www.cerrejon.com](http://www.cerrejon.com)

La calidad del carbón y su extracción dependen de condiciones geológicas y estructurales como la profundidad e inclinación de los mantos y el tipo de deformación que presente, ya que estas determinan el desarrollo de la actividad minera. El área de Bruno, al igual que el resto del depósito del Cerrejón, se ha venido estudiando mediante una serie de perforaciones con el fin de actualizar y mejorar el modelo geológico y una estimación de recursos.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Revisión de la interpretación geológica y estructural de la Formación Cerrejón, en el área de Bruno, en el depósito carbonífero del Cerrejón, departamento de La Guajira (con miras al mejoramiento del actual modelo geológico elaborado para la zona).

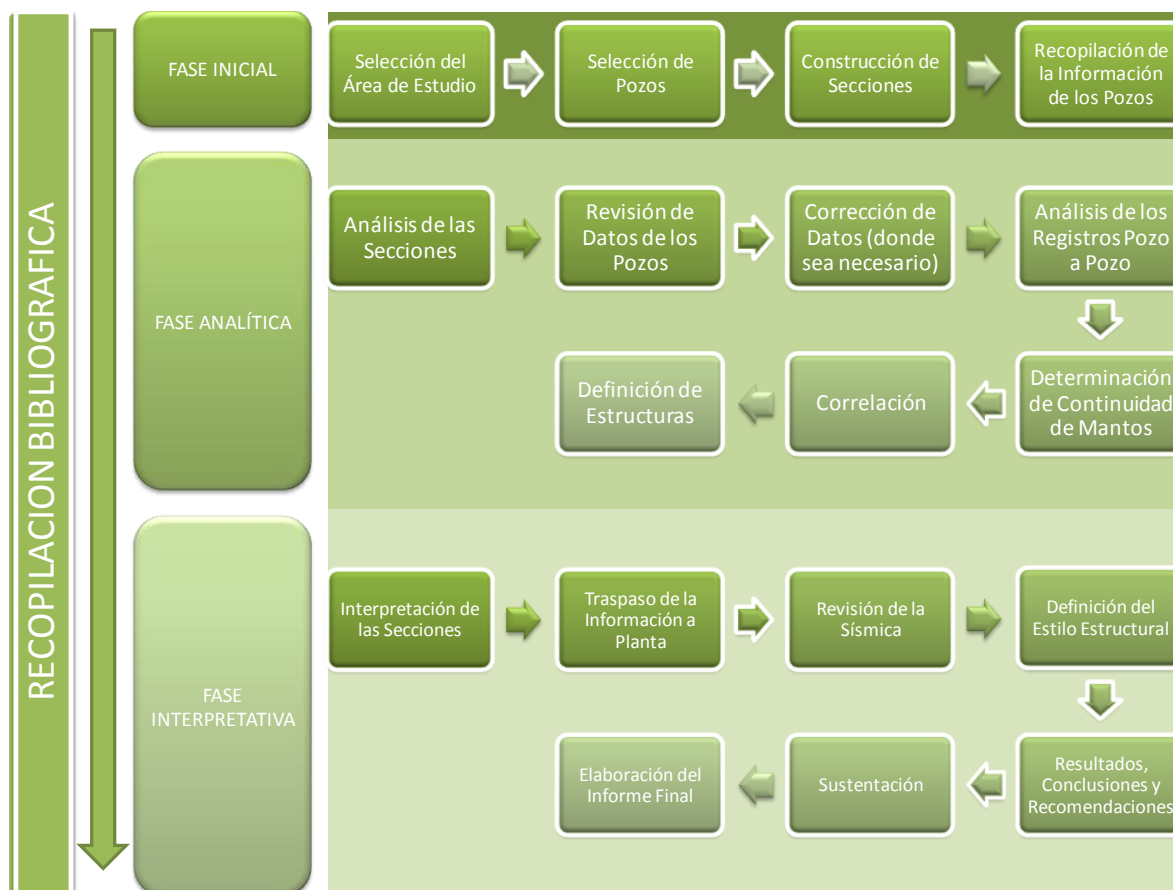
### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar las estructuras geológicas en el área propuesta, mediante secciones geológicas elaboradas pozo a pozo en dirección perpendicular al rumbo de la estructura principal de la zona, con algunos cambios menores de dirección.
- Corregir la correlación de los mantos de carbón de la Formación Cerrejón en el área propuesta en los casos que sea necesario.
- Revisar la posición e interpretación actual de la Falla Bruno.
- Proponer un modelo geológico estructural para el área de Bruno.

## 2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo los objetivos propuestos en el proyecto se plantearon una serie de pasos a seguir, de modo que se realizaran con la mayor eficiencia y que permitieran obtener los mejores resultados en cada una de las actividades propuestas, se obtuvieron así 3 fases del proyecto (ver Figura 2):

**Figura 2. Flujoograma de trabajo.**



## 2.1 FASE INICIAL

Comprende la selección del área de estudio, la selección de pozos exploratorios (221) y la construcción de las líneas de las secciones (18). Las secciones tienen una dirección NW – SE que es casi perpendicular al rumbo de la estructura principal para obtener rasgos estructurales como pliegues y fallas, con algunos cambios menores en la dirección del rumbo. Las secciones se elaboraron a escala 1:2000.

En esta fase también se realizó una recopilación de la información de los pozos tanto en las carpetas de registros geofísicos como en la base de datos de la empresa.

## 2.2 FASE ANALÍTICA

Consta de la elaboración de secciones, esto se hizo comenzando por un análisis de cada una de ellas, pozo a pozo, de la siguiente manera:

- ✚ Se revisaron de cada uno de los mantos de carbón contenidos en cada pozo de la sección analizada, por medio de los registros geofísicos (densidad, resistividad y gamma), de la descripción del pozo y de la base de datos de Cerrejón. Estos se compararon entre si y se realizaron las respectivas correcciones de espesor y profundidad en la base de datos (si la hay).
- ✚ Se realizó una revisión en la interpretación de los registros Dipmeter de cada pozo (si había).
  - Se identificaron fallas y/o pliegues en el registro y se indicaron en el pozo.
  - Se obtuvieron buzamientos representativos del registro de pozo y se hizo la corrección por buzamiento.

- Se trazaron los buzamientos corregidos en el pozo y se obtuvo un promedio para este.
- ✚ Se miró la continuidad de los mantos de carbón y las posibles estructuras alrededor del pozo analizado, se realizó la correlación y se definieron estructuras geológicas por sección y zonas con deficiencia de información geológica.

### 2.3 FASE INTERPRETATIVA

Esta última fase incluye la comparación de las interpretaciones de cada una de las secciones, el traspaso de la información de la sección a planta (Fallas, Ejes de pliegues y Buzamientos) y la definición de un posible estilo estructural para la zona.

Como complemento se revisaron 5 líneas sísmicas ya interpretadas que están ubicadas en cercanías de la zona de estudio, 3 en sentido paralelo al rumbo de la estructura principal (de las cuales 2 están dentro de la zona) y 2 de manera perpendicular, para un mejor entendimiento en el área.

Se tuvieron en cuenta los trabajos realizados anteriormente y la recopilación bibliográfica fue constante durante el desarrollo del proyecto.

Luego de la interpretación de todas las secciones se propuso un modelo geológico estructural alternativo, este fue puesto a consideración por el geólogo modelador especialista y tutor del proyecto, el superintendente de geología y exploración, y por el grupo de geólogos del Cerrejón, para que fuera analizado y se expusieran sus puntos de vista. La nueva interpretación aporta al mejoramiento del modelo geológico estructural actual elaborado para la zona.

---

Finalmente se realizó un informe final en el que se expusieron los resultados, conclusiones y recomendaciones del proyecto.

### 3. GEOLOGÍA REGIONAL

En la región se han realizado algunos levantamientos geológicos por parte de las empresas encargadas de la explotación y comercialización del carbón de la zona, tales como Carbones del Cerrejón, Intercor, CoalCorp, entre otras, también se han realizado levantamientos por parte de Ecopetrol & Exxon Mobil. Por parte del gobierno se han realizado estudios hacia la Serranía del Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta (Ward, 1973; Wokittel, 1957; Tschanz, 1969; encaminados a comprender el proceso de formación y el posterior levantamiento éstos.

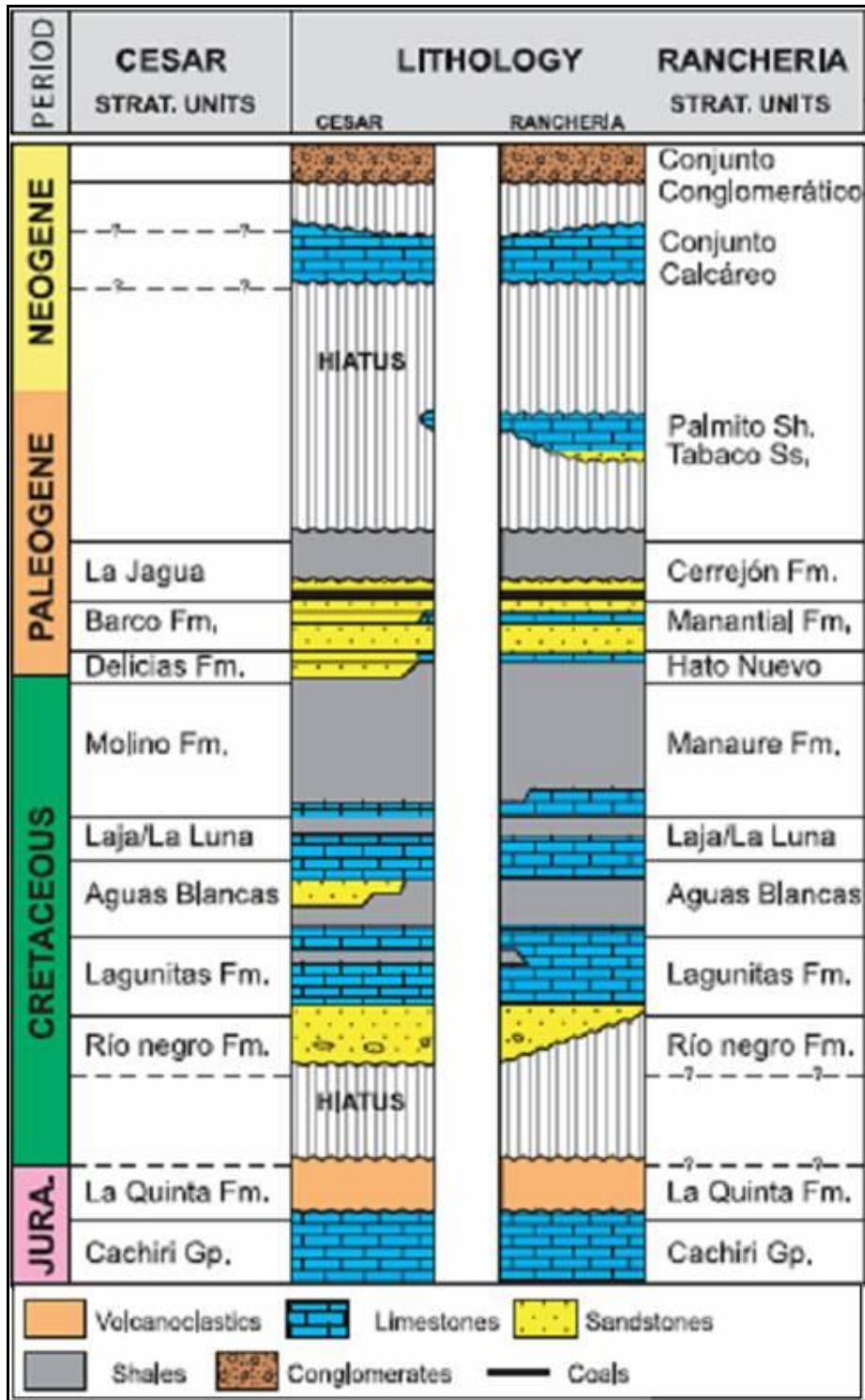
#### 3.1 ESTRATIGRAFÍA

Dentro de las rocas halladas en la Cuenca del Cesar-Ranchería se tienen registros estratigráficos que van desde el Triásico hasta el presente. Esta región es geológicamente muy heterogénea presentándose desde rocas sedimentarias marinas y continentales (con o sin metamorfismo), hasta rocas ígneas intrusivas, extrusivas y piroclásticas de distintas edades, afectadas en mayor o menor escala por movimientos tectónicos, (ver Figura 3).

- **MESOZOICO**
- **TRIÁSICO – JURÁSICO**

**FORMACIÓN LA QUINTA:** Es una secuencia de limolitas y areniscas finas de color rojo, macizas, con laminación plano paralela a ligeramente ondulada, con venas de calcita y manifestaciones de malaquita.

Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Cesar-Ranchería



(Tomado y Modificado de Barbero et al., 2007., en Cerrejón 2008).

Hacia la parte media de la formación, se encuentran intercalaciones de areniscas blancas, pardas y rojizas, de grano fino a grueso, con laminación plano paralela, estratificación inclinada, cruzada y festoneada. En algunos casos se presentan niveles conglomeráticos que presentan cantos de cuarzo lechoso. Esta unidad es atravesada por diques de rocas volcánicas, oscuras, pero hacia el tope pueden observarse tobas líticas de color claro (INGEOMINAS, 1999).

La unidad se considera formada en un ambiente marino (Forero, 1972), entre el Triásico superior y el Jurásico inferior, y muestra el ambiente volcánico predominante para la fuente de aporte de los sedimentos.

El espesor de la unidad varía de 2300m en la localidad tipo en los andes de Mérida en Venezuela a 3000m cerca al municipio de Manaure en la baja Guajira (Forero, 1972). Ha sido correlacionada con las Formaciones Guatapurí en la Sierra Nevada de Santa Marta (Tschanz et al, 1969), Bocas y Jordán en la Serranía del Perijá (Forero, 1972) y a Saldaña en el Valle del Magdalena (Cediel et al, 1981).

- **CRETÁCEO**
- **CRETÁCEO INFERIOR**

**FORMACIÓN RÍO NEGRO:** Esta unidad detrítica representa la base del Cretáceo para este sector de la Serranía del Perijá y para la parte norte de la misma en Venezuela. Conformada por arcosas de grano grueso, poco cementadas, con granos subangulares y presencia local de óxidos de hierro que le dan un color rojizo; areniscas conglomeráticas y conglomerados con clastos subangulares a subredondeados, de cuarzo, en una matriz de arenas gruesas dispuestas en capas delgadas (INEGEO MINAS, 1999).

Esta unidad se considera de ambiente continental a marino transgresivo y tiene un espesor promedio de 3000m en la sección tipo localizada en la Serranía del Perijá en Venezuela, con variaciones considerables hacia el departamento del Cesar, hasta alcanzar un espesor de 203m (INGEOMINAS, 1999), depositada discordantemente sobre la Formación La Quinta entre el Barremiano y el Aptiano inferior.

**GRUPO COGOLLO:** Es una potente sucesión de calizas grises azulosas y grises oscuras, dispuestas en capas medianas a gruesas, con variaciones a areniscas y lodolitas calcáreas, con intercalaciones ocasionales de lutitas carbonosas y abundante contenido de fauna fósil (INGEOMINAS, 1999). La descripción y división de la secuencia, en Cogollo inferior y Cogollo superior por parte de Miller (1960), llevó a Govea & Dueñas (1975), a subdividir el cogollo superior en dos Formaciones: Lagunitas en la base y Aguas Blancas en el techo.

- **Formación Lagunitas:** Conformada por calizas fosilíferas intercaladas con arcillolitas y lutitas calcáreas, tiene un espesor aproximado de 450 a 500 metros. Su contacto inferior con la Formación Río Negro es discordante.
- Los 120 metros basales se caracterizan por presentar calizas micríticas, grises claras a marrón claras, interestratificados con calizas arenosas finas, con estratificación ondular, alternando con calizas micríticas. Sus contactos son netos.
- **Formación Aguas Blancas:** Compuesta por una sucesión de calizas nodulares, fosilíferas, intercaladas con lutitas carbonosas, areniscas de grano fino y calizas neríticas.

La secuencia de rocas sedimentarias carbonáticas, con un espesor aproximado de 300 metros, se dispone concordantemente en contacto neto sobre la Formación Lagunitas, en estratos de calizas esparíticas a calizas

arenosas finas, color gris marrón claro, intercaladas con calizas fosilíferas, con abundantes conchas de moluscos en los niveles inferiores. Calizas arenosas marrón claras, con estratificación ondular plana, intercaladas con calizas limosas gris oscuras, constituyen la parte media de la secuencia. Calizas arenosas fino granuladas y calizas esparíticas, marrón claras, junto a calizas fosilíferas, constituyen la parte superior de la secuencia (INGEOMINAS, 1999).

En general, esta sucesión de calizas corresponde a una secuencia calcárea, depositada en un ambiente de plataforma continental, con un mar tropical, que permite la precipitación de lodos ricos en carbonatos y materia orgánica entre el Aptiano y el Albiano (INGEOMINAS, 1999).

- **CRETÁCEO SUPERIOR**

**FORMACION LA LUNA:** Secuencia sedimentaria compuesta por lutitas carbonosas, limolitas, arcillolitas, calizas negras, areniscas calcáreas y cintas de chert, alternadas en la parte superior con calizas granulares. Los afloramientos de esta formación se encuentran principalmente hacia el departamento del Cesar, en el Valle Medio del Magdalena, y se caracterizan por el olor a petróleo de las lutitas carbonosas y la abundante fauna encontrada en ellas. Esta sucesión de rocas de ambiente marino, tiene un espesor aproximado de 180m y según dataciones palinológicas y paleontológicas corresponde a sedimentación cretácica entre el Turoniano y el Santoniano (Ward et al, 1973). El contacto inferior con el Grupo Cogollo es concordante a gradacional.

**FORMACIÓN MOLINO:** Sucesión de lutitas grises calcáreas a lutitas negras, areniscas de grano fino, limolitas y calizas con abundantes microfósiles, cuyos contactos superior e inferior son considerados, por Tschanz et al (1969), como transicionales. Esta secuencia de rocas de ambiente marino tiene un espesor

aproximado de 350 metros y fue depositada en el Campaniano. Esta formación es correlacionable con la Formación Manaure.

- **CENOZOICO**
- **PALEOCENO INFERIOR-MEDIO**

**FORMACIÓN HATO NUEVO:** Esta unidad de roca consiste en una serie de areniscas finas de color claro, interestratificadas con arcillolitas grises, shales y calizas. Esta secuencia se considera como una facies de aguas marinas someras, que depositó sedimentos al interior de la plataforma continental entre el Maestrichtiano y el Paleoceno inferior, alcanzando un espesor de 200m. Los contactos inferior y superior son inconformes (INGEOMINAS, 1999).

**FORMACIÓN MANANTIAL:** Secuencia de areniscas calcáreas de grano fino, lutitas rojizas y calizas fosilíferas grises y pardas. Es muy común la intercalación de limolitas de color verde-grisáceo. Es considerada del Paleoceno inferior por los fósiles contenidos y su origen está ligado a un ambiente continental. El contacto inferior con la Formación Hatonuevo es inconforme, mientras que el contacto con la Formación Cerrejón (Suprayacente), es transicional. El espesor es de 300m, según Lamus et al (2006).

- **PALEOCENO SUPERIOR**

**FORMACIÓN CERREJÓN:** Es una secuencia monótona de areniscas feldespáticas y líticas, interestratificadas con lutitas carbonosas y mantos de carbón de gran espesor, que indican ciclos de sedimentación más o menos homogéneos, dentro de una cuenca transarco de alta subsidencia. Una descripción de los diferentes ambientes de sedimentación, propuestos para la Formación Cerrejón en el Paleoceno superior, indica que los posibles ambientes son:

- Un delta progradante, con sus facies subacuosas y subareales gradando a ambientes continentales, según Cardozo & Gómez (1980).
- García (1990), dice que los sedimentos de la Formación Cerrejón fueron depositados en un ambiente de llanuras de marea cronológica y geográficamente afectados por una regresión marina.

Sin embargo, algunos geólogos que han estudiado parte de ésta, consideran que la Formación Cerrejón es una secuencia sedimentaria no marina afectada por las variaciones eustáticas, según algunos niveles con fauna marina reportados al final del Paleoceno.

El contacto inferior de la Formación Cerrejón con la Formación Manantial es gradacional, y va hasta el momento en el que se encuentra la primera manifestación de carbón; el espesor de esta unidad es de aproximadamente 1400 metros y el contacto superior, con la suprayacente Formación Tabaco, es discordante.

- **EOCENO**

**FORMACION TABACO:** Es una secuencia de areniscas conglomeráticas y conglomerados claros, con abundantes fragmentos de chert y cuarzo lechoso,

que se disponen en paquetes de gran espesor. El ambiente de formación se considera fluvial, de corrientes trenzadas, tiene un espesor aproximado de 120 metros y su edad, según estudios palinomórficos, es Paleoceno tardío a Eoceno temprano (Lamus et al, 2006). El contacto basal es neto, discordante, de geometría angular con la formación Cerrejón.

- **MIOCENO**

**FORMACION PALMITO:** Rocas sedimentarias clásticas finas, con un espesor que oscila entre los 180 y los 300 metros. El contacto basal es transicional con la Formación Tabaco.

En la base de la secuencia encontramos areniscas arcillosas, de grano medio, cuarzo feldespáticas a arcosas, rosadas y amarillas rojizas, con laminación cruzada, alternan canales de arcillolitas grises con laminación ondular discontinua.

Arcillolitas arenosas, marrones oscuras, con laminación ondular y arcillolitas limosas, amarillas rojizas, alternan limolitas arenosas calcáreas, amarillo oscuro a marrones, con lentes de yeso, hacia la parte superior de la secuencia (INGEOMINAS, 1999).

- **CUATERNARIO**

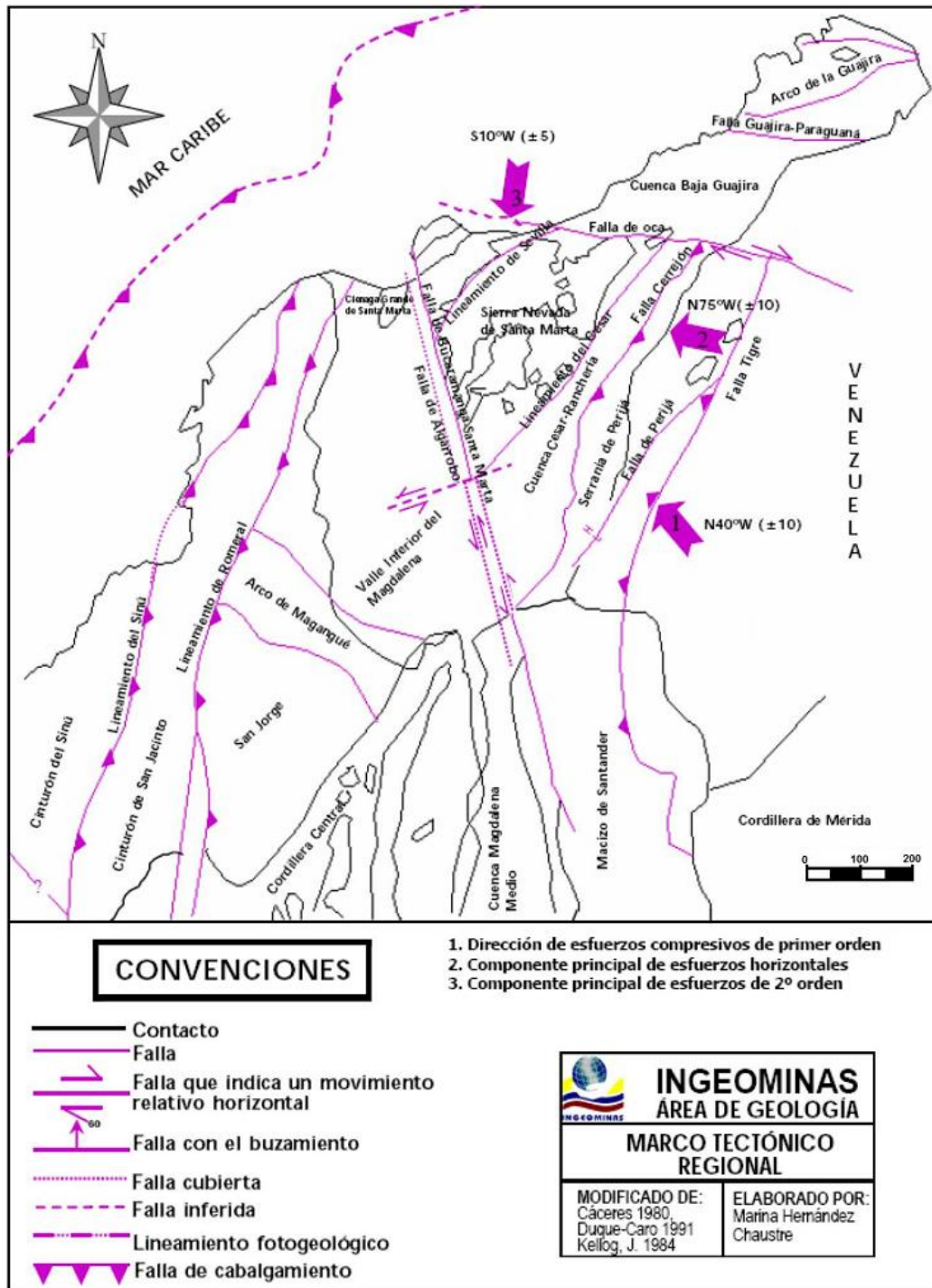
Compuesto por sedimentos arcillosos, calcáreos y sedimentos que van de grano fino hasta conglomerático, que son el resultado de la erosión de las rocas arenosas, calcáreas, arcillosas e ígneas que se encuentran a los lados del valle del Río Ranchería.

Su espesor varía de 10 a 20 metros. El contacto basal es discordante sobre diferentes unidades litoestratigráficas (INGEOMINAS, 1999).

### 3.2 TECTÓNICA

La cuenca de Cesar – Ranchería, es un cuenca asimétrica cuyo mayor espesor se encuentra hacia el sureste y su geometría está definida por la conjunción de tres placas tectónicas (Nazca, Caribe y Suramerica) (Ujueta&Linas, 1990). Como resultado de la interacción de estas tres placas, se desarrollaron sistemas de fallas como el de Santa Marta - Bucaramanga y Oca, el levantamiento de la Serranía del Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta (Hernández, 2003). Cáceres y otros (1992), establecieron dos series de esfuerzos compresivos, el primero con rumbo  $N40^{\circ}W \pm 5^{\circ}$  y el segundo con sentido  $N75^{\circ}W \pm 10^{\circ}$ . Además Hernández (2003), establece un acortamiento de la Cordillera Oriental a través de desplazamiento en las fallas Perijá (46km) y Boconó (50km) (ver Figura 4).

**Figura 4. Marco Tectónico del Norte de Colombia, con la dirección de los esfuerzos principales que afectan la Cuenca Cesar – Ranchería**

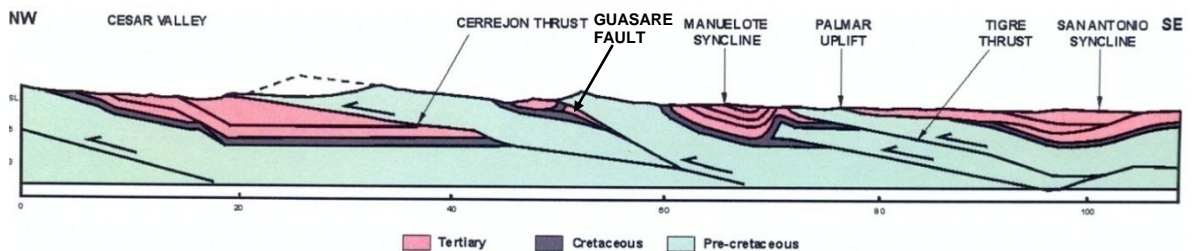


(Hernández, 2003., Tomado de Cerrejón 2008).

Dentro de los modelos estructurales que se tienen para la zona, el propuesto por Kellog & Bonini (1982), realizado a partir de estudios geofísicos, muestra la conformación estructural detallada del corte NW-SE, desde la Sierra Nevada de Santa Marta hasta la Falla Boconó en los Andes de Mérida (ver Figura 5). Este modelo propone una serie de fallas de cabalgamiento con vergencia hacia el NW, como lo muestran varias líneas sísmicas realizadas por los autores.

Además de esto muestran a partir de datos gravimétricos, la existencia de rocas terciarias por debajo de rocas precretácicas en el flanco noroccidental de la Serranía del Perijá, indicando así la existencia de una zona de falla con una inclinación que varía de 5° a 25°, con movimiento inverso en el piedemonte de la Serranía.

**Figura 5. Tectónica Regional. Modelo estructural del corte NW-SE de la parte norte de Colombia entre la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia y los Andes de Mérida en Venezuela.**



Tomado de Kellog&Bonini (1982).

INGETEC (2007), define la zona de cizalla a partir de estudios realizados en la cuenca del río Palomino en la concesión sur del Cerrejón, denominándola Falla Cerrejón, definiéndola como una falla inversa, orientada en dirección NS a N14°E, con buzamiento muy suave de 7-10° hacia el SSE, cuya expresión geomorfológica marca el límite entre la Serranía del Perijá y el valle del río Ranchería (ver figura 4).

---

Montes et al (2005), exponen para principios del Terciario, que las Formaciones Manantial-Cerrejón en Colombia y Marcelina-Guasare en Venezuela, son correlacionables; que su posterior inclinación hacia el SE y consecuente levantamiento de la Serranía del Perijá, se dio por el basculamiento de toda la secuencia durante el levantamiento de la Sierra Nevada de Santa Marta, con un comportamiento rígido, que permitió el posterior cabalgamiento de rocas Mesozoicas sobre Cenozoicas a través de las Fallas Guasare y Cerrejón.

## 4. GEOLOGÍA LOCAL

### 4.1 ESTRATIGRAFÍA

En el área de estudio se observan cinco unidades estratigráficas (ver Figura 6), con edades que abarcan desde el Paleoceno Superior hasta el Cuaternario. A continuación se hace una breve descripción de las unidades estratigráficas:

- **Formación Cerrejón (Tc):**

**Litología:** Su composición litológica consiste esencialmente de litoarenitas grises claras a oscuras, arcillolitas, limolitas grises y shales grises a negros con abundantes mantos de carbón (Morón et al., 2007., reportado en Cerrejón, 2008).

**Posición Estratigráfica:** La Formación Cerrejón, suprayace concordantemente a la Formación Manantial, siendo el contacto de tipo transicional a través de una calcoarenita. El contacto superior con la Formación Tabaco, es discordante (Hidrogeocol, 2009) o Formación Palmito (Ramos., 1990., reportado en Cerrejón, 2008).

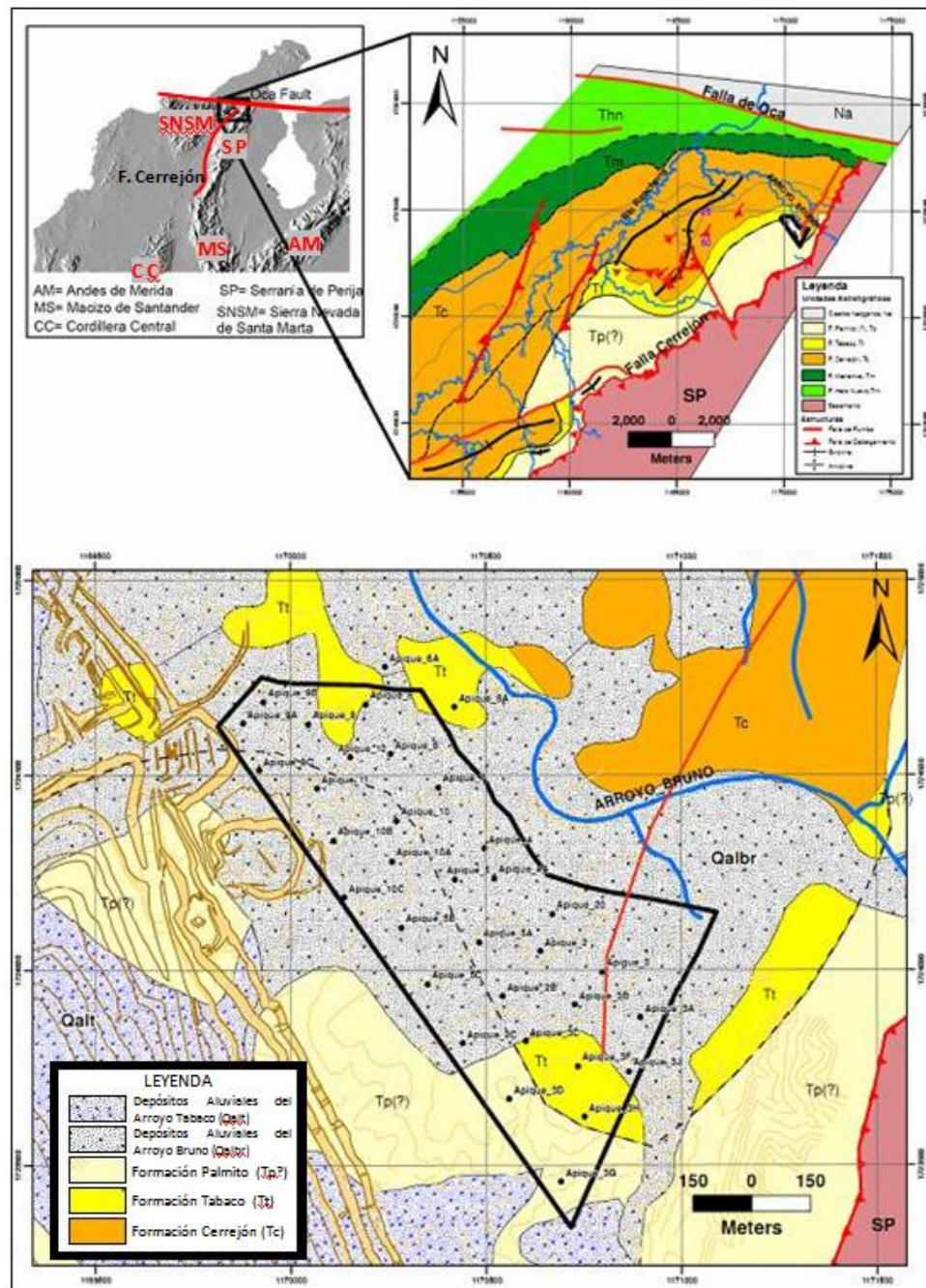
**Espesor:** Aproximadamente 1000 m (Cerrejón, 2008).

**Edad:** Utilizando palinología, la edad de esta formación es Paleoceno Tardío. (Bayona et al. 2004., citado en Cerrejón, 2008)

**Ambiente de Depósito:** Depositadas en un ambiente deltáico, subacuático, donde los sedimentos continentales y marinos se entrelazan en un número de cuencas o lagunas, comunicadas entre sí, con el nivel de sus aguas gobernado

por las oscilaciones del nivel del mar (Higrogeocol, 2007., reportado en Carrejón, 2008).

**Figura 6. Geología general (arriba) y local (debajo) del área de estudio.**



Fuente: Carrejón, 2008.

- **Formación Tabaco (Tt)**

**Litología:** constituida por un conjunto de areniscas cuarzosas muy friables, amarillas y rojizas, de grano grueso a conglomerático, con estratificación cruzada, que alternan con niveles de conglomerados y delgadas intercalaciones arcillosas (Bayona et al., 2007., reportado en Cerrejón, 2008).

**Posición Estratigráfica:** Suprayace discordantemente la Formación Cerrejón (Hidrogeocol, 2009), su contacto superior es conforme y está marcado por un nivel de caliza, muy porosa y friable (Saavedra, 2008., reportado en Cerrejón, 2008).

**Espesor:** Espesor máximo de 75 m (Bayona, et al., 2004., reportado en Cerrejón, 2008).

**Edad:** Utilizando asociaciones de palinomorfos, la edad de la formación es Paleoceno medio a tardío. (Jaramillo et al. 2007., reportado en Cerrejón, 2008).

**Ambiente de Deposito:** Depositado en un ambiente fluvial de corrientes anastomosadas (Hidrogeocol, 2007., reportado en Cerrejón, 2008).

- **Formación Palmito (Tp?)**

**Litología:** compuesta por intercalaciones de arcillolitas y areniscas de grano medio a fino, con matriz lodosa calcárea. Hacia la base de la unidad, y en contacto con la Formación Tabaco, se encuentra un nivel de caliza, muy porosa y friable (Saavedra, 2008., reportado en Cerrejón, 2008).

**Posición Estratigráfica:** Su contacto inferior es concordante con la Formación Tabaco y está marcado por la aparición de un nivel de caliza arenosa, porosa, color habano con contactos ondulados (Saavedra, 2008., reportado en Cerrejón, 2008). En algunos sectores descansa discordantemente sobre la Formación Cerrejón (Ramos, 1990., reportado en Cerrejón, 2008).

**Espesor:** 300m de espesor (Ramos, 1990., reportado en Cerrejón, 2008).

**Edad:** Considerada de edad Eocena por su posición estratigráfica (Bayona et al., 2004., reportado en Cerrejón, 2008).

**Ambiente de depósito:** Bayona et al. 2004., (reportado en Cerrejón, 2008), a partir de información de corazones, interpreta ambientes de llanura costera cortados por estructuras de canales fluviales.

- **Depósitos aluviales de Arroyo Bruno (Qalbr)**

Aflora en la zona de estudio, está conformado por gravas con tamaños entre 2 cm. y 30 cm., moderadamente calibrado, esférica-subredondeada y compuesta principalmente por calizas de color gris o pardo, el porcentaje de matriz es en promedio del 50%. En general se observa un aumento en el grosor de las gravas en dirección Norte, con espesores de hasta 4 m, hacia las zonas más próximas del Arroyo Bruno (Hidrogeocol, 2009., reportado en Cerrejón, 2008).

- **Depósitos Aluviales del Arroyo Tabaco (Qalt)**

Está compuesto por clastos, cantos, bloques y grava fina a gruesa, embebidos en una matriz limo arenosa (entre 30% y 60%). Los clastos están compuestos por caliza (40%), sedimentos rojos, limolitas y lutitas (35%), areniscas (10%) de grano fino y calcita (10%), Esporádicamente presentan cuarzo (5%) y matriz arenociliosa muy calcárea (que puede variar entre 5% al 30%). Tiene espesores hasta de 25 m (Hidrogeocol, 2009., reportado en Cerrejón, 2008).

## 4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de estudio geológicamente se ubica en la Cuenca Cesar-Ranchería que limita hacia el Norte con la Falla de Oca, hacia el Noroeste con las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, hacia el Sureste con el sistema de fallas de cabalgamiento de la Serranía del Perijá (Falla Cerrejón) y hacia el Suroeste con la Falla Santa Marta-Bucaramanga (Montes et al., 2005) (ver Figura 6).

Esta zona está definida estructuralmente en su mayoría por pliegues y fallas, identificándose dos trenes estructurales principales: El Primero, orientado con rumbo Noreste y vergencia Noroeste; El segundo, orientado Este-Oeste a Noroeste-Sureste, compuesto por fallas de movimiento dextral, con una importante componente vertical, se caracteriza por cortar y desplazar el tren regional Noreste (Saavedra, 2008 citado en Cerrejón 2008). A continuación se describen las fallas más relevantes:

- **Falla Cerrejón**

Falla de cabalgamiento de bajo ángulo que afecta el basamento (Cerrejón, 2008), con buzamiento de  $15^\circ \pm 10^\circ$  hacia el Sureste y un desplazamiento mínimo de  $1,7 \pm 0,6$  Km. en la vertical y  $7,8 \pm 2$  Km. en la horizontal (Kellogg, 1981 reportado en Saavedra, 2008). Esta estructura coloca en contacto rocas Mesozoicas del Grupo Cogollo de edad Cretácica con rocas de edad Paleoceno-Eoceno, regionalmente la falla se extiende desde la Falla Oca al Norte y continúa al Sur en el Departamento del Cesar (Cerrejón, 2008).

- **Falla de Oca**

Falla de rumbo con desplazamiento dextral (Montes et al., 2005) con dirección E – NE, y de ángulo alto. Limita la cuenca del Río Ranchería hacia el Norte, haciendo virar hacia el Noreste las formaciones Cretácicas del borde Noroccidental, truncando la Serranía de Perijá (Hidrogeocol, 2007., citado en Cerrejón 2008)

- **Falla Bruno**

Presenta una dirección aproximadamente paralela a la Falla Cerrejón (SW – NE). Es una falla inversa de alto ángulo que causa el plegamiento local de los estratos de la Formación Cerrejón. (Cerrejón, 2008).

## 5. GENERALIDADES DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS

Con los registros geofísicos se puede investigar zonas sin acceso para el hombre, como el interior de la tierra. En la búsqueda, prospección y exploración de yacimientos, estos métodos geofísicos pueden dar información acerca del subsuelo. Existen muchos tipos de registros geofísicos, en este capítulo se describen las generalidades de los registros geofísicos utilizados en este proyecto.

### 5.1 GAMMA RAY

Se basa en la medición de las emisiones naturales de rayos gamma que poseen las rocas. Durante la meteorización de las rocas, los elementos radiactivos que estas contienen se desintegran en partículas de tamaño arcilla, por lo tanto las lutitas tienen emisiones de rayos gamma mayores que las arenas. Mientras mayor es el contenido de arcilla de las rocas, mayor es la emisión de GR de las mismas. Los minerales radiactivos principales son: el potasio (K), el torio (Th) y el uranio (U). (Scribd Inc., 2012)

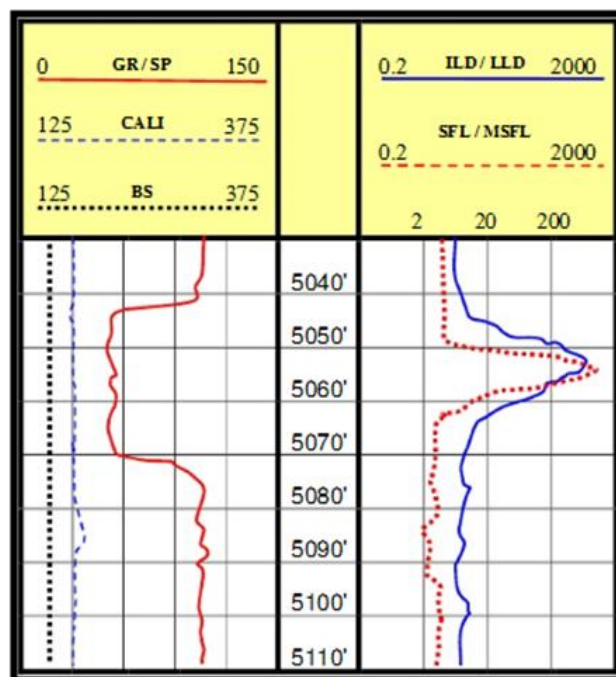
El registro Gamma Ray (GR) se lee de izquierda a derecha. Si el GR es bajo indica bajo contenido de arcilla y si es alto indica alto contenido de arcilla. La unidad de medida es en grados API, con un rango de valores que generalmente va de 0 a 150 API (ver Figura 7). Sirve para calcular el contenido de arcilla de las capas, para estimar tamaño de grano y diferenciar litologías porosas de no porosas.

## 5.2 RESISTIVIDAD

Se basa en la medición de la resistividad del material (roca) por medio de electrodos, se utiliza para diferenciar zonas acuíferas de zonas de hidrocarburos, identificar zonas permeables, determinar porosidades y medir las resistividades de las formaciones rocosas. Este tipo de registros es inducido. (Scribd Inc., 2012)

La escala del registro va de 0.2 a 2000 Ohm-m<sup>2</sup>/m. (Logarítmica) (Ver figura 7). En la figura se muestran 2 tipos de registros resistivos, el LLD (Dual Laterlog), y el SFL (Spherical Focused Log), que son clasificaciones que se hacen de acuerdo a la herramienta utilizada y la disposición de esta al momento de la toma de datos. Los valores de las resistividades en las arcillas son muy variables pero rara vez son menores que 1ohm-m.

**Figura 7. Combinación de perfil GR o SP con perfiles de Resistividad y Caliper.**



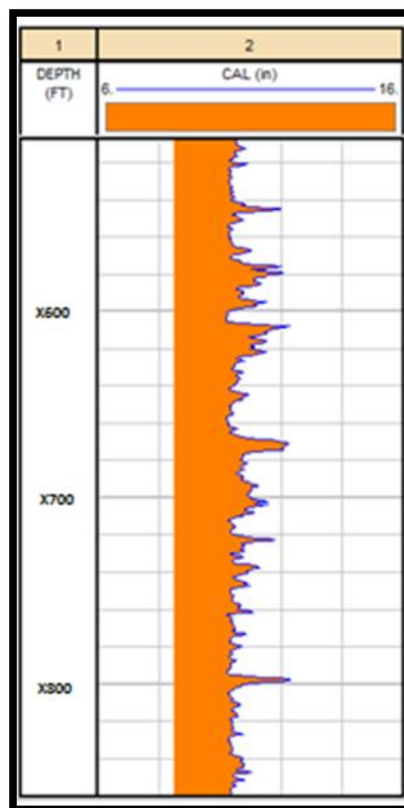
Tomado de <http://es.scribd.com>

### 5.3 CALIPER

El Caliper es una herramienta que mide el diámetro del pozo, el cual puede ser de mucha utilidad a la hora de diferenciar litologías resistentes de las poco resistentes. Su principal función es determinar el estado del hoyo del pozo (derrumbado o no derrumbado) (Glover, 2000).

El registro Caliper muestra el diámetro y forma del pozo en función de la profundidad. . La escala del registro es generalmente presentada en pulgadas (6 a 16 in), que es el estándar para referenciar los tamaños de broca, pero también se puede presentar en centímetros (ver Figura 8).

**Figura 8. Registro Caliper.**



Tomado de Glover, 2000.

## 5.4 DENSIDAD

Esta herramienta consiste en utilizar un patín blindado que contiene una fuente radioactiva y dos detectores de rayos gamma para medir la densidad total de la formación usando como medida la porosidad, distingue litologías en conjunto con otras técnicas, también es útil en la detección de zonas de gas y en el reconocimiento de rocas evaporitas (Scribd Inc., 2012).

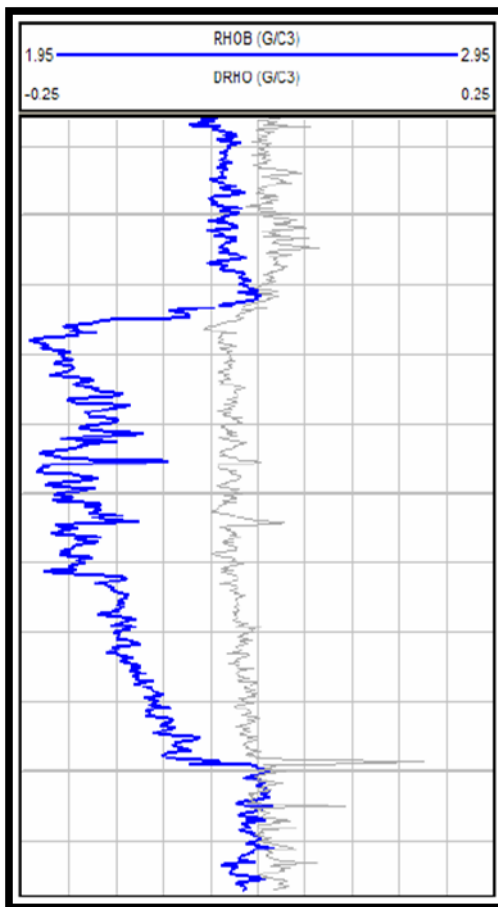
El registro de densidad de la formación (RHOB) cuando se usa solo, no es una buena herramienta para identificar la mayoría de las litologías. Esto se debe a que la mayoría de las rocas tiene un intervalo de densidades grandes resultado de su variada composición mineralógica y sus porosidades variables. La escala del registro se presenta en  $\text{g/cm}^3$  (ver Figura 9).

## 5.5 REGISTROS DIPMETER

La herramienta de Dipmeter mide la cantidad de resistividad de las características geológicas a lo largo de la pared del pozo, cualquier anomalía en la resistividad es detectada por los sensores de la herramienta, al ser detectados al menos tres puntos contiguos alrededor del pozo son correlacionados y computados dando como resultado vectores de buzamiento. Estos vectores son representados en el registro geofísico y con ello podemos conocer la dirección azimut de buzamiento y el buzamiento de un estrato o capa (Van Der Merwe. 1999), (ver Figura 10).

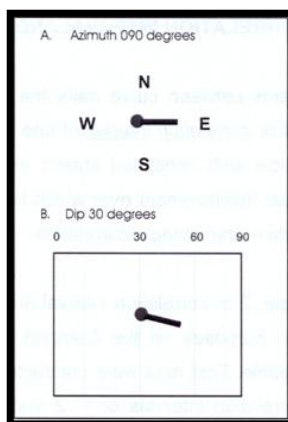
Los vectores pueden ser interpretados de acuerdo a patrones en los que son agrupados, y cada uno de ellos es representado con un color diferente (ver Figura 11):

**Figura 9. Registro de Densidad.**



Tomado de <http://es.scribd.com>

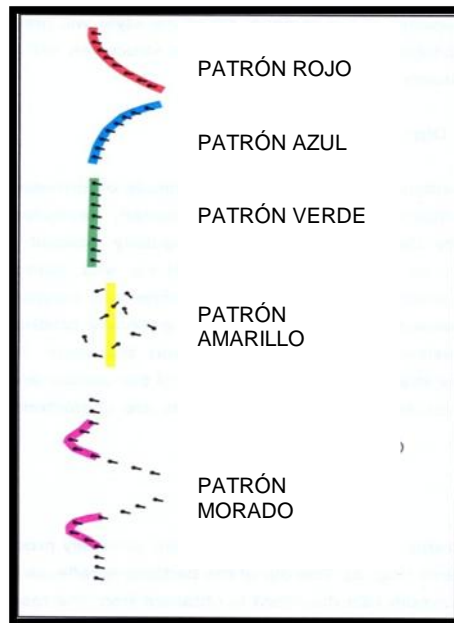
**Figura 10. Vector de buzamiento que se presenta en un registro Dipmeter.**



Tomado de Van Der Merwe, (1999).

- **Azul:** Indica una disminución en el buzamiento hacia el fondo del pozo.
- **Rojo:** Indica un incremento en el buzamiento hacia el fondo del pozo.
- **Verde:** Indica que el buzamiento no cambia con la profundidad, los patrones de buzamiento están bien definidos. Esto es tomado usualmente para indicar el buzamiento estructural.
- **Amarillo:** Indica buzamientos aleatorios, los patrones de buzamiento están pobremente definidos.
- **Morado:** Indica pliegues de arrastre generados por cabalgamientos.

**Figura 11. Patrones por colores para la interpretación de los vectores de buzamiento.**

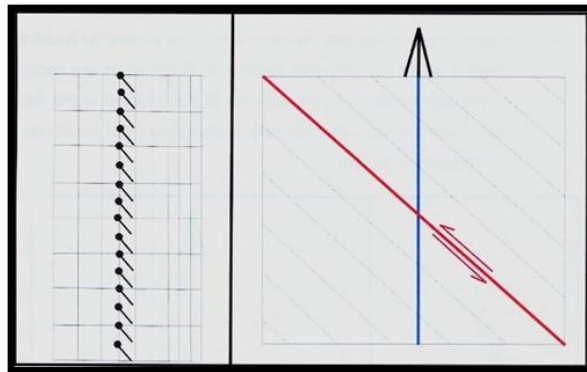


Tomado de Van Der Merwe. (1999).

### 5.5.1 Interpretación estructural del registro dipmeter

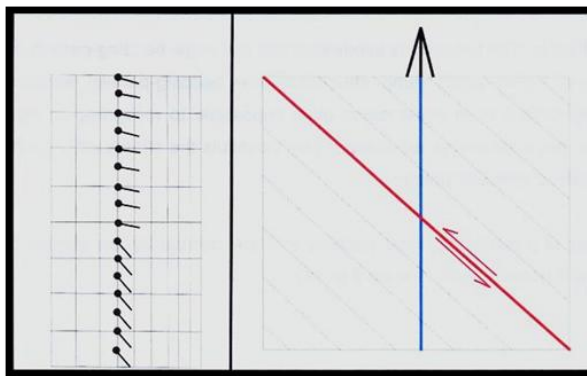
La identificación de características estructurales como fallas normales, inversas y pliegues en un registro dipmeter depende de los cambios en el buzamiento y azimut de buzamiento de los vectores, estos cambios están relacionados directamente con el estilo de deformación. A continuación se muestran algunas de las interpretaciones los patrones más importantes (ver Figuras 12 a 19):

**Figura 12. Patrón A: Sin cambios en la dirección y el buzamiento, sin falla, o con falla de movimiento paralelo a la estratificación.**



Tomado de Van Der Merwe. (1999).

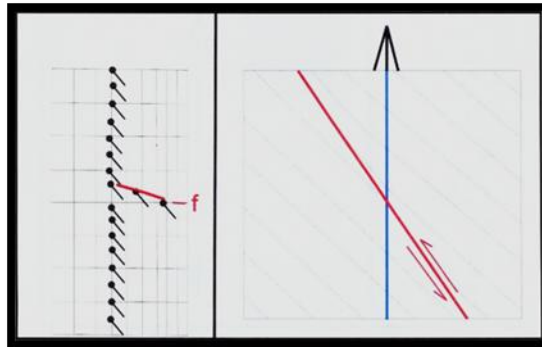
**Figura 13. Patrón B: Cambios en la dirección, falla paralela a la estratificación.**



Tomado de Van Der Merwe. (1999).

**Figura 14. Patrón C: Incremento del buzamiento hacia el fondo del pozo.**

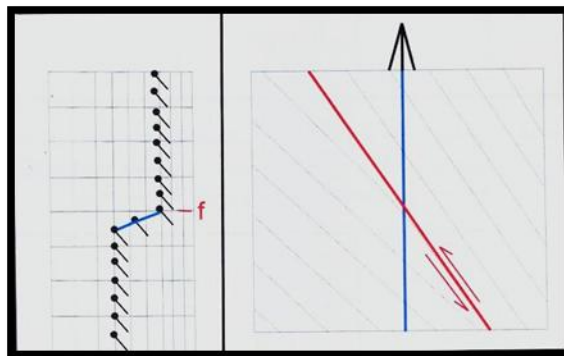
**Falla Inversa.**



Tomado de Van Der Merwe. (1999).

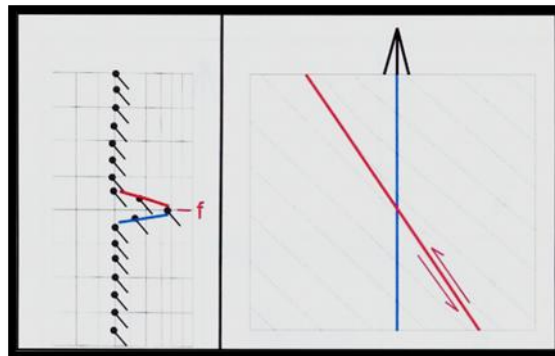
**Figura 151. Patrón D: Disminución del buzamiento hacia el fondo del pozo.**

**Falla Inversa.**



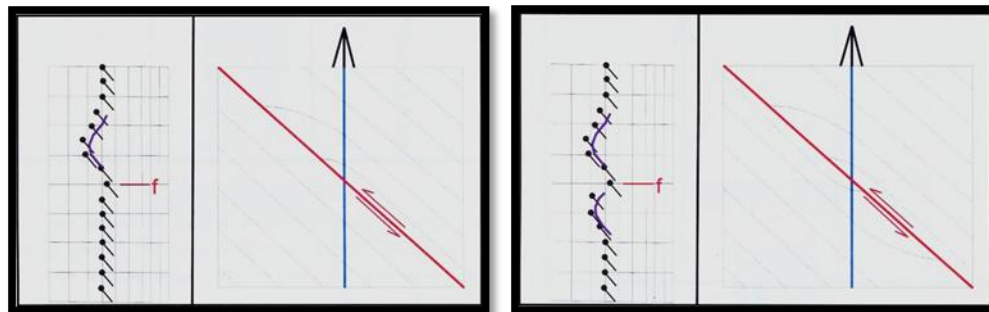
Tomado de Van Der Merwe. (1999).

**Figura 16. Patrón E: Falla Inversa.**



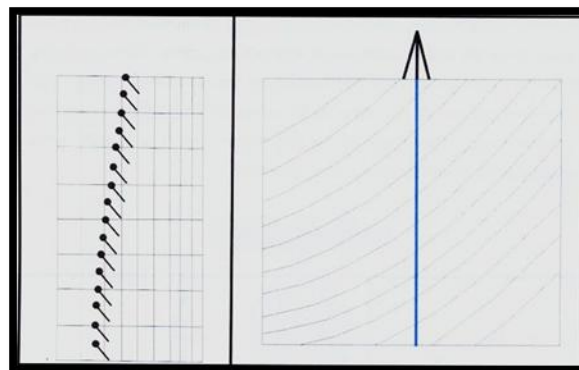
Tomado de Van Der Merwe. (1999).

**Figura 17. Patrones F y G: Falla Inversa con pliegue de arrastre.**



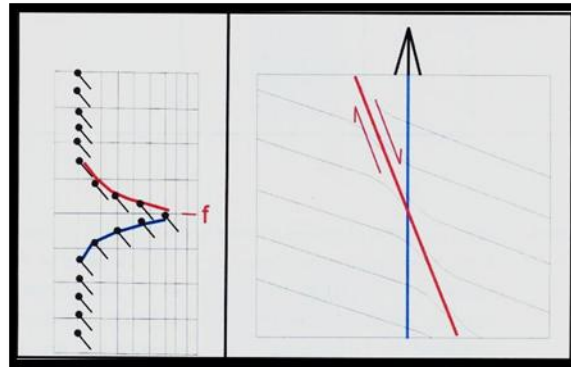
Tomado de Van Der Merwe. (1999).

**Figura 18. Patrón H: Cambio gradual en el buzamiento de la estratificación.**



Tomado de Van Der Merwe. (1999).

**Figura 19. Patrón I: Falla Normal.**



Tomado de Van Der Merwe. (1999).

## 5.6 SÍSMICA

El método sísmico se basa en la generación de ondas sísmicas por medio de una explosión, estas ondas causan deformaciones no permanentes en el medio en el que se propagan (roca). Este método da solamente información indirecta, es decir nunca sale una muestra de una roca (Griem&Griem. 1999).

Los resultados de estas investigaciones geofísicas son datos que son procesados para obtener secciones sísmicas, que son luego interpretadas (ver Figura 20a y 20b).

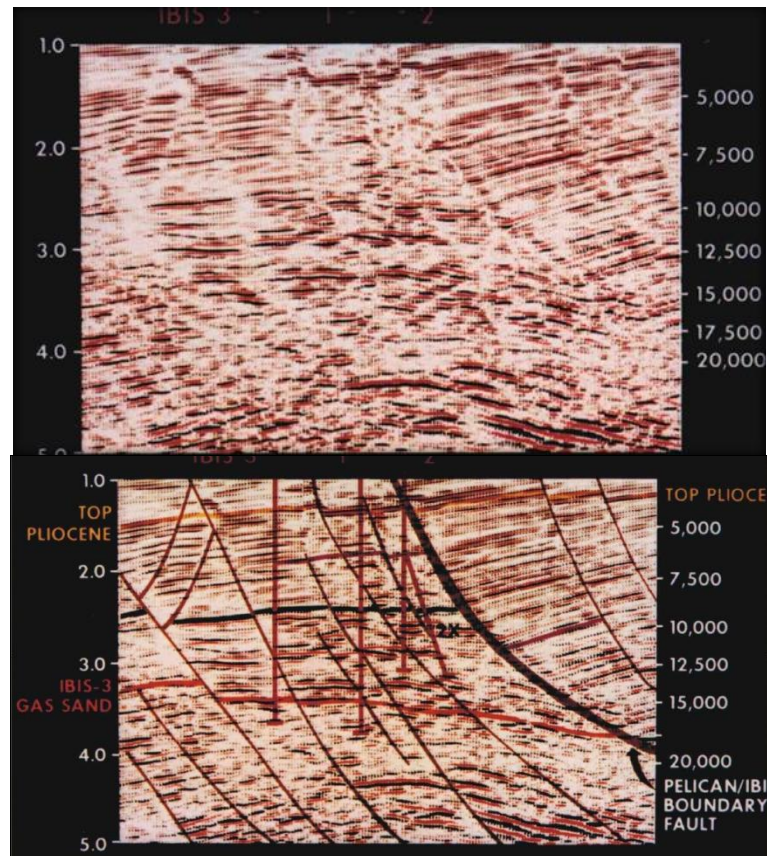
Los parámetros característicos de las rocas que se determinan con los métodos sísmicos son: la velocidad de las ondas p y s, el coeficiente de reflexión y la densidad. (Griem&Griem. 1999)

Las Propiedades de las rocas, que influyen estos parámetros son:

- a) Petrografía, contenido en minerales.
- b) Estado de compacidad.
- c) Porosidad = porcentaje o proporción de espacio vacío (poros) en una roca.

- d) Relleno del espacio vacío o es decir de los poros.
- e) Textura y estructura de la roca.
- f) Temperatura.
- g) Presión.

**Figura 20. Sección sísmica (arriba), Sección sísmica interpretada (abajo).**

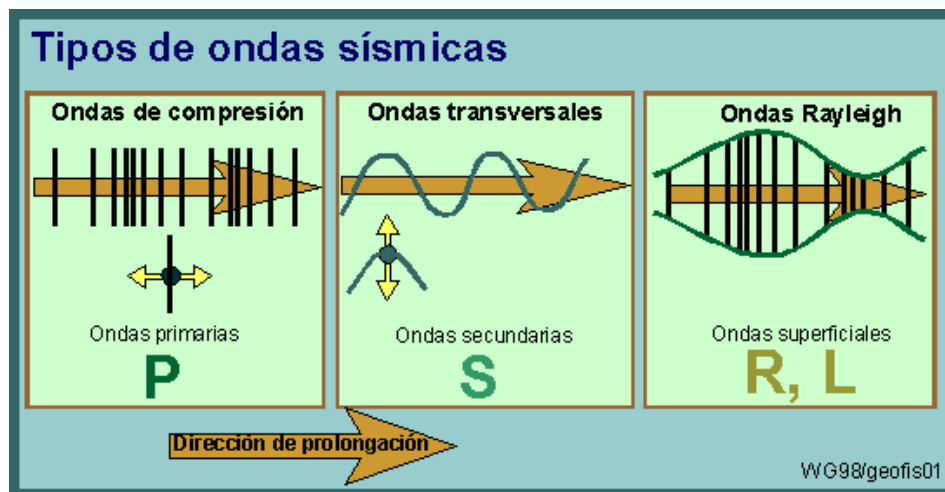


Tomado de <http://es.scribd.com>

El método sísmico se basa, tanto en el hecho de la diferencia de velocidad de la onda sísmica en los distintos terrenos, como en que las ondas al cruzar la frontera entre dos tipos de terreno distinto sufren refracción, (al igual que sucede con las ondas de luz), cambiando su dirección en un ángulo cuyo valor depende de la relación entre las velocidades de onda de cada terreno.

Existen ondas de compresión, ondas transversales y ondas superficiales como Love o Rayleigh. Las Ondas de compresión son las más rápidas por eso se llaman ondas primarias (ondas P). Las ondas transversales son un poco más lentas, llegan un poco más tarde a la estación (Ondas secundarias u ondas. S), (Griem&Griem. 1999), (ver Figura 21).

**Figura 21. Tipos de Ondas sísmicas.**



Tomado de Griem&Griem (1999).

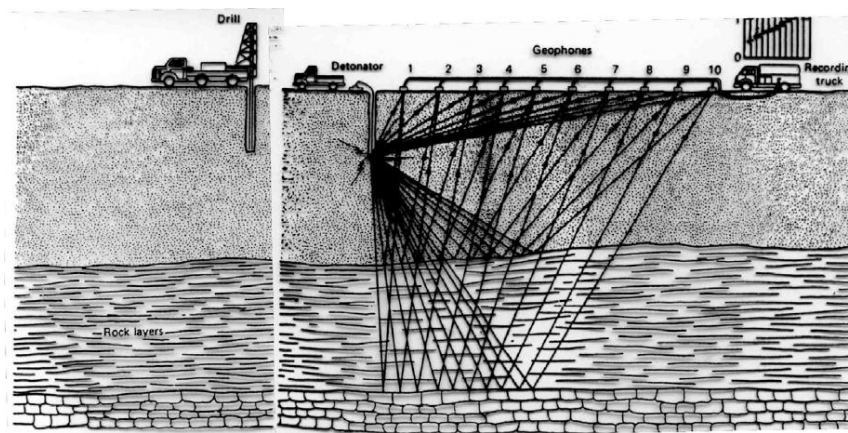
El impulso generador de la onda puede ser un impacto o una pequeña carga explosiva que se coloca, generalmente, en un punto de la superficie. Mediante geófonos (que son detectores de pequeñas vibraciones en el terreno), dispuestos a distintas distancias del punto de impacto, se mide el momento en que llega la primera onda que alcanza a un determinado geófono. De esta forma se obtiene la velocidad de transmisión (ver Figura 22).

Cuando se produce el impulso, las ondas se emiten en todas direcciones. Una onda en particular recorre un camino por la superficie del terreno en dirección al geófono (onda directa). Otras ondas descienden con diversos ángulos respecto a la horizontal. Al encontrar un estrato inferior con diferente velocidad sísmica, la onda se refracta en el plano de contacto entre ambos terrenos.

Existe una dirección de onda que al alcanzar el estrato inferior con un determinado ángulo de incidencia, su refracción se dirige por encima del estrato inferior paralelamente a la frontera entre terrenos. Esta onda, con su nueva dirección, continúa emitiendo energía hacia la superficie con un ángulo de refracción simétrico al de incidencia anterior, por lo que los geófonos pueden llegar a detectarla.

Si la velocidad sísmica del terreno inferior tiene un valor mayor que la del terreno superficial, el tiempo necesario para que la onda refractada alcance un punto de la superficie puede llegar a ser menor que el requerido por la onda directa que viaja superficialmente, aun cuando la longitud del camino sea mayor. Los geófonos cercanos al impulso reciben en primer lugar la onda directa, pero a los que se encuentran a una cierta distancia les alcanza antes la onda refractada (Griem & Griem. 1999).

**Figura 22. Envío de señal elástica al terreno (normalmente desde superficie) y registro de eventos reflejados en estaciones registradoras (geófonos) hincados en el terreno en forma regular y equidistante.**



Tomado de <http://es.scribd.com>

## 6. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 6.1 FASE INICIAL

#### SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La selección del área de estudio se hizo teniendo en cuenta las necesidades de El Cerrejón. El Bloque de Bruno se encuentra dentro de las nuevas áreas de minería que actualmente están en proceso de exploración y que se han venido estudiando a través de perforaciones con el fin de analizar y mejorar el modelo geológico que se tiene para esta zona (ver Figura 6).

#### SELECCIÓN DE LOS POZOS

Se seleccionaron en el área de estudio 221 pozos exploratorios (abiertos y corazonados) de modo que abarcaran gran parte de la zona, estos pozos debían tener como mínimo registros de Gamma Ray, Densidad y Resistividad, y como opción descripción de corazones y registros Dipmeter y Calliper.

#### CONSTRUCCIÓN DE SECCIONES

Se construyeron 18 líneas para las secciones teniendo en cuenta:

- La orientación de las líneas, esta tendría que ser NW-SE (perpendicular a la dirección de la estructura principal).
- La definición de la escala, se escogió una escala 1:2.000 para la elaboración de las secciones.
- El espaciamiento entre los pozos, estos tendrían que, en lo posible, estar a una distancia cercana (menor a 1 km).
- El espaciamiento entre las secciones, la distancia entre 2 secciones sería menor a 1 km.
- Los registros de los pozos debían estar a igual escala.

- El datum utilizado para colgar la sección fue el nivel del mar.

#### RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOS POZOS

Después de seleccionados los pozos, el siguiente paso fue localizar cada una de las carpetas de registros en los estantes dispuestos para estas, revisar cuantos, que tipos de registros tenían y si estaban a una misma escala (ver Figura 23).

**Figura 23. Carpetas de Registros de Pozo.**



Se revisó en la base de datos del Cerrejón la información de cada uno de los pozos, estos archivos contienen la ubicación (Coordenadas Norte, Este y Altura), los mantos de carbón que se encuentran en cada pozo y la profundidad de los mantos, esto se hizo con el fin de compararlos más adelante con la información de los registros de pozo.

## 6.2 FASE ANALÍTICA

### ANÁLISIS DE LAS SECCIONES

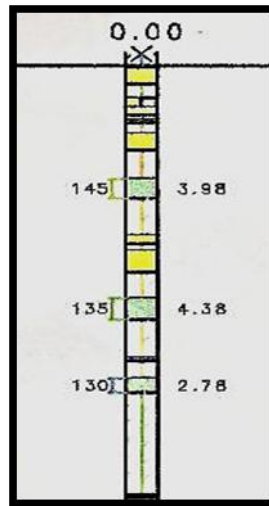
El análisis de las secciones se hizo pozo a pozo siguiendo estos pasos:

- ✓ **Se revisaron las profundidades y los espesores de los mantos de carbón** utilizando los registros geofísicos de cada uno de los pozos de la sección escogida. Los registros utilizados para esto fueron el Gamma Ray, de Densidad, Resistivo y Caliper, descritos anteriormente.
- ✓ **Se comparó la información encontrada en los registros** (ya interpretados por el personal capacitado de la empresa), **con la registrada en la base de datos**, si no correspondía se hacía la corrección pertinente en los archivos Excel.
- ✓ **Se revisó la interpretación de los registros Dipmeter** (en los pozos en los que existía esta información), esta interpretación fue utilizada para obtener información tanto de la inclinación y orientación de las capas en cada sección como de las fallas y pliegues encontrados en éstas.

### CORRELACIÓN

Una vez revisada la información anterior, se procedió a la correlación de los mantos de carbón. El Cerrejón utiliza una nomenclatura propia para los mantos de carbón, estos son nombrados con números que van desde el 010 (el más profundo, estratigráficamente) hasta el 183 (el más somero, estratigráficamente) (ver Figura 24).

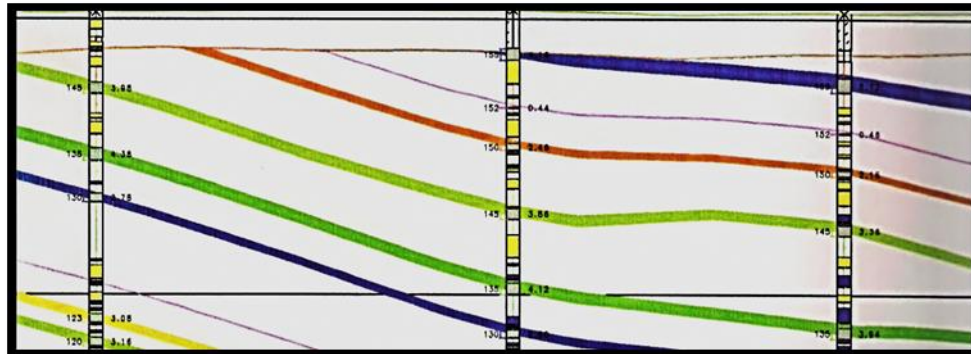
**Figura 24. Nomenclatura de los mantos de carbón.**



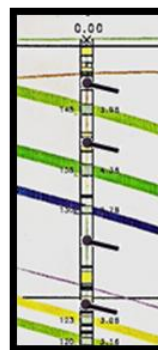
Cada manto de carbón se unía por medio de una línea pozo a pozo, a medida que se iba realizando la correlación estructural se definían posibles estructuras (pliegues, fallas) (ver Figura 25). También se definían las zonas con deficiencia de información geológica (inexistencia de pozos en un radio mayor a 1 km).

En el caso de los pozos con registros Dipmeter, el buzamiento de los mantos se representaba en cada pozo con un dibujo (ver Figura 26), se procedía a obtener un buzamiento representativo (promedio) de cada pozo y se hacía la corrección por buzamiento utilizando la Tabla para Corrección de Buzamiento (ver Figura 27), para luego representarlo en el mapa de la zona. También se identificaban las fallas y pliegues utilizando los patrones mencionados en el capítulo de registros.

**Figura 25. Correlación estructural de mantos de carbón pozo a pozo por sección.**



**Figura 26. Representación de los Buzamientos (inclinación) en los pozos.**



**Figura 27. Tabla para Corrección de Buzamiento.**

**TABLA PARA CORRECCIÓN DE BUZAMIENTOS**

Angulo agudo entre el rumbo de la estructura y el rumbo del corte

Buz verd	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	2.5	3.0	3.0	3.5	4.0	4.0	4.5	4.5	5.0	5.0
10	0.5	1.0	2.0	2.5	3.5	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	8.0	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
15	1.0	1.5	3.0	4.0	5.0	6.5	8.0	9.0	10.0	11.0	11.5	12.5	13.0	13.5	14.0	15.0
20	1.0	2.0	3.5	5.5	7.0	9.0	10.0	12.0	13.0	14.5	15.5	16.5	17.5	18.0	19.0	20.0
25	1.0	2.0	4.5	7.0	9.0	11.0	13.0	15.0	17.0	18.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0
30	2.0	3.5	6.0	8.0	11.0	14.0	16.0	18.5	20.5	22.0	24.0	25.0	26.5	27.5	28.5	29.5
35	2.0	3.5	7.0	10.5	13.5	16.5	19.5	22.0	24.0	26.5	28.0	30.0	31.0	32.5	33.5	34.5
40	2.0	4.0	8.0	12.0	16.0	19.5	23.0	26.0	28.5	30.5	33.0	34.0	36.0	37.0	38.5	39.5
45	2.5	5.0	10.0	14.5	19.0	23.0	26.5	30.0	33.0	35.0	37.0	39.0	41.0	42.0	43.0	44.5
50	3.0	6.0	11.5	17.0	22.0	27.0	31.0	34.5	37.5	40.0	42.5	44.0	46.0	47.0	48.0	49.5
55	4.0	7.0	14.0	20.0	26.0	31.0	35.5	39.5	42.5	45.0	47.5	49.5	51.0	52.5	53.5	54.5
60	4.5	8.5	16.5	24.0	30.5	36.0	41.0	45.0	48.0	51.0	53.0	55.0	56.0	57.5	58.5	59.5
65	5.5	10.5	20.5	29.0	36.0	42.0	47.0	51.0	54.0	56.5	58.5	60.0	62.0	63.0	63.5	64.5
70	6.5	13.0	25.5	35.0	43.0	49.0	54.0	57.5	60.5	63.0	64.5	66.0	67.0	68.0	69.0	69.5
75	9.0	18.0	33.0	44.0	52.0	57.5	62.0	65.0	67.5	69.0	70.5	72.0	73.0	73.5	74.0	75.0
80	13.5	26.5	44.5	56.0	63.0	67.5	70.5	73.0	74.5	76.0	77.0	78.0	78.5	79.0	79.5	80.0
85	26.0	45.0	63.5	71.5	75.5	78.0	80.0	81.5	82.0	83.0	83.5	84.0	84.0	84.5	84.5	85.0

Tomado de Martinez-Alvarez (1981).

### 6.3 FASE INTERPRETATIVA

Para esta fase se compararon las 18 secciones ya analizadas y correlacionadas, procediéndose a la interpretación de cada una de ellas.

#### INTERPRETACIÓN

Después de analizadas las secciones estructurales se pudo definir que:

- La complejidad de la geología de la zona es mayor hacia el SE (derecha), debido a que hacia esta parte se encuentra más cerca la Falla Cerrejón. Esto se puede observar en la mayoría de secciones.
- Las secciones exhiben una estructura principal que es un sinclinal asimétrico con un eje NW-SE, que normalmente se ve en todas las secciones.
- En el flanco derecho del sinclinal se observó una falla inversa (cabalgamiento) que genera un pliegue de arrastre (anticlinal). Esto se puede observar en las secciones 16 y 18 (anexos).
- Hacia la parte que se encuentra más al SE (derecha), se observa un sinclinal asimétrico más cerrado que el anterior, el eje de éste es NW-SE, como se puede ver en las secciones 16 y 18 (anexos).
- En algunas zonas no se pudieron definir con claridad las estructuras debido a la falta de información. La cantidad de los pozos exploratorios disminuía hacia el SE de la zona y la distancia entre estos era mayor, en estos casos las fallas y los ejes de pliegues tuvieron que inferirse (secciones 16 y 18).
- Las estructuras observadas se pueden enmarcar dentro de un modelo de fallamiento de tipo cabalgamiento. El sistema de fallas de la Serranía del Perijá

(Falla Cerrejón) hace que en el área de estudio se presente este tipo de estructuras mencionadas.

- En general el modelo muestra una estructura sinclinal – falla inversa – anticlinal (pliegue de arrastre) – sinclinal.

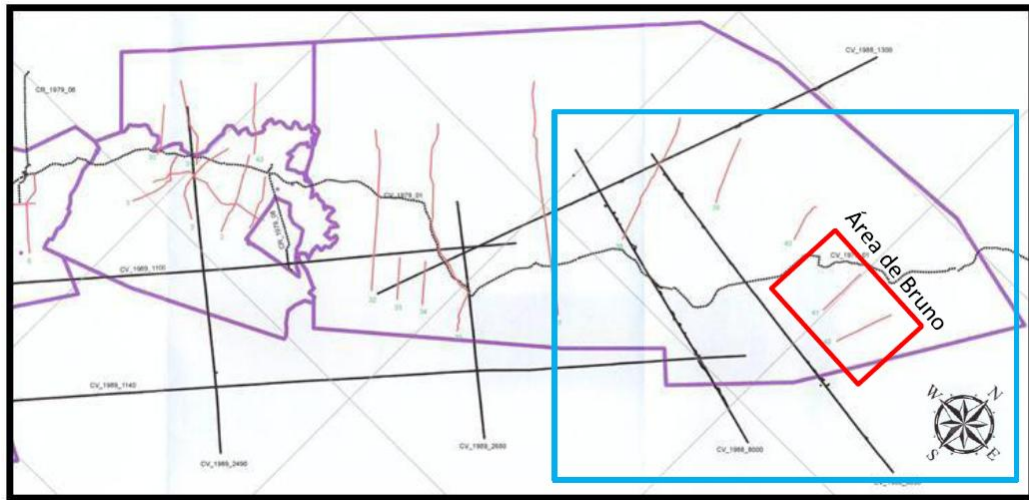
#### ✚ TRASPASO DE LA INFORMACIÓN A PLANTA

La información conseguida en el análisis de las secciones se plasmó en un mapa escala 1:5.000, datos como buzamientos, fallas y ejes de pliegues, fueron graficados para obtener el modelo geológico estructural de la zona en planta.

#### ✚ REVISIÓN DE LA SÍSMICA

En la última fase del proyecto, como complemento a las secciones realizadas, se revisaron 5 secciones sísmicas ya procesadas e interpretadas, éstas están ubicadas en cercanías a la zona de estudio (ver Figura 28), 3 en sentido paralelo al rumbo de la estructura principal (de las cuales 2 están dentro de la zona) y 2 de manera perpendicular (ver Figura 29). Esto con la finalidad de obtener una idea general de la geología estructural de la zona y así poder ayudar a mejorar la interpretación del área.

**Figura 28. Mapa de Líneas Sísmicas. En el recuadro rojo se encuentra la zona de estudio.**



**Figura 29. Mapa de Líneas Sísmicas (zoom). De las Líneas 4 y 5 solo se tomó la parte de la sección que se proyecta en el área de estudio.**

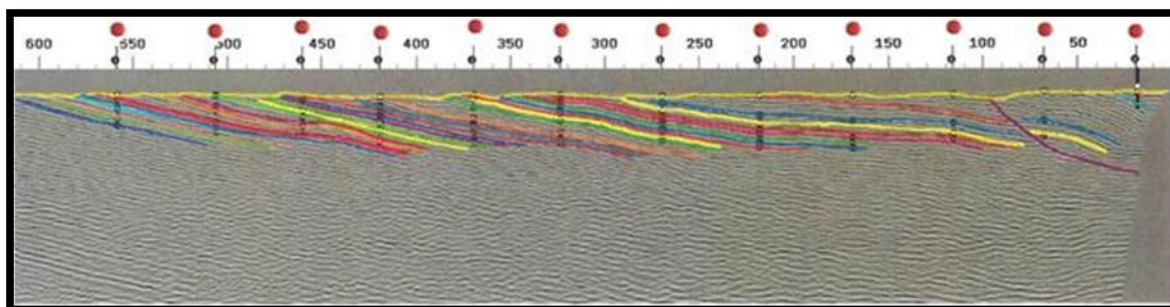


A continuación se describen 2 de las secciones sísmicas revisadas durante la etapa de interpretación del proyecto (Figuras 30 y 31).

### SECCIÓN SÍSMICA DE LA LÍNEA 1

Esta sección se encuentra hacia el oeste de la zona de estudio, en ella se pueden observar los mantos de carbón de la Formación Cerrejón (cada manto representado por una línea de color). Esta sección sísmica tiene una dirección SE–NW que es casi paralela a la dirección del eje de la estructura principal de la zona, en ella se puede observar la inclinación y la continuidad de los mantos de carbón de la Formación Cerrejón. En la parte derecha de la sección se observa también una falla inversa local.

**Figura 30. Sección Sísmica que pertenece a la Línea 1.**

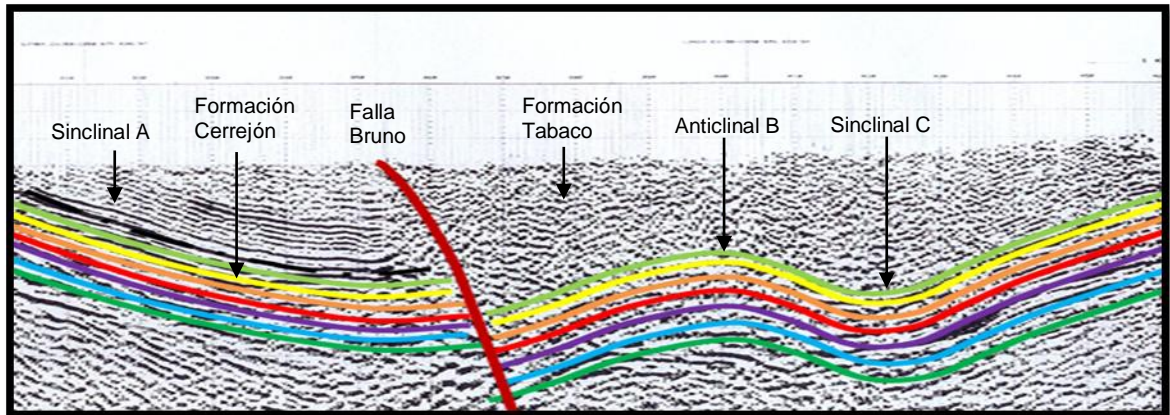


### SECCIÓN SÍSMICA DE LA LÍNEA 4

Esta sección se encuentra hacia el sur del área de estudio, en ella se pueden observar las estructuras geológicas que se presentan en una zona cercana a la analizada. Esta sección sísmica tiene una dirección NW–SE que es perpendicular a la dirección del eje de la estructura principal y paralela a la dirección de las secciones estructurales elaboradas en este proyecto. La información que contiene esta sección sísmica permitió relacionar las estructuras encontradas en la zona de estudio, se pueden observar que los mantos de carbón de la Formación Cerrejón

están afectados por plegamiento y fallamiento. A la izquierda se puede ver el sinclinal A atravesado por la Falla Bruno, también se observa el Anticlinal B (más abierto que el que se presenta en las secciones estructurales), y el Sinclinal C. Encima de la Formación Cerrejón se puede mirar la Formación Tabaco.

**Figura 31. Sección sísmica que pertenece a la Línea 4.**



## 7. RESULTADOS

La superintendencia de geología y exploración del Cerrejón trabaja con base en un modelo geológico estructural, cuyo propósito es convertir datos e información parcial obtenida a partir de pozos perforados, en disposiciones geométricas irregulares que constituyen un grupo de retículas o grids que son continuos en la información para toda el área del recurso modelado, dicho modelo, refleja principalmente características geológicas regionales, pero no las puntuales y a veces se hace necesario conocer las características geológicas locales al detalle.

El modelo geológico para el bloque de Bruno, exhibe la continuidad de los mantos casi en la totalidad del área, lo que no es del todo cierto, además en algunos casos no sugiere la existencia de cambios en la estructura como pliegues, fallas importantes y algunas fallas de menor tamaño, imperceptibles en el modelo regional, y de otras características importantes que son relevantes para aumentar la efectividad de la interpretación geológica estructural de la zona.

Para esto se construyeron 18 secciones estructurales siguiendo la metodología indicada con anterioridad; las secciones se elaboraron a escala 1:2.000, con una dirección NW – SE (que es casi perpendicular al rumbo de la estructura principal), con el fin de determinar la geometría estructural del área (pliegues y fallas), con algunos cambios menores hacia la dirección del rumbo de la estructura principal. Las 18 secciones se distribuyeron uniformemente a lo largo y ancho de la zona para llevar un seguimiento continuo (ver Anexo 1 y 2).

## 7.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

A nivel regional el complejo carbonífero del Cerrejón está localizado dentro de un cinturón de cabalgamiento y a pesar de que la secuencia carbonífera muestra los efectos de deformación a través de cabalgamientos internos, plegamientos y fallamientos, la secuencia relativa es simple, conservando una estructura monoclinal regional.

Por medio del análisis de las 18 secciones estructurales que se elaboraron para el área de Bruno, se pudieron identificar varios aspectos que no se habían tenido en cuenta en el modelo actual, estos son:

### 7.1.1 Fallas

- **Falla A:** Es una falla inversa de carácter local que tiene un ángulo de inclinación entre  $30^\circ$  y  $40^\circ$ , su trazo tiene una dirección SW – NE y un salto que no es mayor a los 20 m, la longitud aproximada en superficie es de 550 m. Esta falla aparece como tal en las secciones 9, 13, 14 y 15 y es inferida en las secciones 10 y 11 debido a la falta de información en ese sector (ver Anexos<sup>2</sup>).
- **Falla B:** Es una falla inversa que va en una dirección casi paralela a la Falla A, tiene una longitud aproximada en superficie de 250 m, su inclinación oscila entre los  $30^\circ$  y  $40^\circ$ . Esta falla aparece en las secciones 12, 13 y 14, tiene un desplazamiento vertical aproximado de 10 m (ver Anexos\*).
- **Falla C:** Falla inversa de carácter local que tiene una dirección SW – NE y un ángulo de inclinación aproximado de  $35^\circ$  a  $45^\circ$ , tiene un salto de 10 m

---

<sup>2</sup> Para el proyecto se elaboraron 18 secciones pero por confidencialidad de los datos en los anexos se presentan solo las secciones 1, 5, 9, 13, 16 y 18; así como el mapa del área de estudio y el mapa de secciones y pozos.

aproximadamente y una longitud en superficie de 350 m. Esta falla se observa en las secciones 8, 9 y 10 (ver Anexos\*).

- **Falla D (Falla Bruno):** Falla inversa que tiene un ángulo que oscila entre los 50° y 65° de inclinación, tiene un trazo irregular y una dirección SW – NE, su longitud aproximada es de 1200 m en superficie y su desplazamiento esta cerca de los 20 m. El trazo de esta falla va desde la sección 9 hasta la 18, es posible que continúe hacia el sur de la zona (ver Anexos\*).
- **Falla E:** Es una falla inversa que se encuentra en la parte más oriental de la zona, presenta una dirección SW – NE, tiene un alto ángulo de inclinación que varía entre los 70° y 75°, esta falla tiene un gran desplazamiento ya que pone en contacto los estratos de la Formación Cerrejón con calizas de la unidad infrayacente, tiene una longitud aproximada de 1700 m y posiblemente se extienda más hacia el sur de la zona (ver Anexos\*).

### 7.1.2 Pliegues

- **Sinclinal A:** Es un pliegue asimétrico cuyo eje tiene una dirección SW – NE y que tiene aproximadamente 2000 m de ancho por 2500 m de largo en superficie, es la estructura principal del área y sus flancos oscilan entre los 10° y lo 20° de inclinación (ver Anexos\*).
- **Anticlinal B:** Es un pliegue de arrastre generado por la Falla D, se presenta al Este del Sinclinal A, es asimétrico, el rango de buzamiento de sus flancos varía entre los 15° y los 25° y tiene 300 m de ancho por 2500 m de largo en superficie (ver Anexos\*).
- **Sinclinal C:** Es un pliegue asimétrico posiblemente generado por la falla F, el ángulo de inclinación del flanco Este es alto, varía entre 60° y 70°, lo que hace

que en los pozos se presenten mantos con espesores grandes. Sus dimensiones son 800 m de ancho por 2500 m de largo en superficie (ver Anexos).

Por último se realizó un cuadro comparativo entre el modelo actual del área de Bruno y el modelo alternativo elaborado en este proyecto para mostrar las principales diferencias y similitudes entre los dos modelos (ver Tabla 1).

**Tabla 1. Cuadro comparativo entre los dos modelos para el área de Bruno.**

<b>MODELO ACTUAL</b>	<b>MODELO ALTERNATIVO</b>
El modelo muestra una estructura sinclinal – falla inversa – anticlinal. Estas estructuras se pueden enmarcar dentro de un modelo de fallamiento de tipo cabalgamiento.	En general el modelo muestra una estructura sinclinal – falla inversa – anticlinal (pliegue de arrastre) – sinclinal. Estas estructuras se pueden enmarcar dentro de un modelo de fallamiento de tipo cabalgamiento.
El modelo muestra la continuidad de los mantos de carbón en toda la zona.	El modelo muestra mantos de carbón que no son continuos en toda la zona.
La estructura principal es un sinclinal simétrico con un eje que tiene una dirección NW – SE.	La estructura principal es un sinclinal asimétrico con un eje que tiene una dirección NW – SE.
La Falla Bruno es una falla de alto ángulo que no genera pliegue de arrastre.	La Falla Bruno es una falla inversa que genera un pliegue de arrastre (anticlinal).
El modelo solo presenta una falla (Falla Bruno) que se extiende por toda el área de SW a NW.	El modelo presenta 5 fallas inversas, la Falla Bruno (Falla D) no se extiende por toda la zona, se va disipando hacia el NW. Las otras 4 fallas que se presentan son menores y su extensión en planta no es mayor a 2 km.

## 8. CONCLUSIONES

La revisión de la interpretación geológica de la secuencia carbonífera de la Formación Cerrejón en el área de Bruno, a través de la correlación y el análisis de secciones elaboradas pozo a pozo, permitió establecer la definición de un modelo geológico estructural alternativo que contribuye al mejoramiento del actual modelo que se tiene para la zona. En general, las estructuras observadas se pueden enmarcar dentro de un modelo de fallamiento de tipo cabalgamiento.

La complejidad en la geología estructural en la zona aumenta en sentido NW – SE, debido que está afectada por la cercanía de la Falla Cerrejón. Esto se ve reflejado en la desaparición de ciertos mantos y en los altos buzamientos a causa del fallamiento y el plegamiento.

La nueva interpretación permitió replantear el cambio de posición de la Falla Bruno (Falla D) y definir otras fallas menores y pliegues que no estaban presentes en el modelo.

Al plasmar la información obtenida de las secciones en el mapa, los datos de rumbo y buzamiento de las capas y la localización del eje de los pliegues, se pudo definir la dirección de las estructuras.

Con la revisión de las interpretaciones de las líneas sísmicas, se obtuvo una idea global de la zona y se pudo contribuir al mejoramiento del modelo alternativo, ya que esta herramienta es muy útil a la hora de conocer la geología estructural en el subsuelo.

El desarrollo de la práctica empresarial permitió la aplicación de los conocimientos adquiridos durante la carrera universitaria. A través del proyecto realizado y las actividades complementarias, se pudo ampliar la visión del trabajo geológico en las áreas de exploración y modelamiento de carbón. La experiencia que se obtiene al trabajar con personas capacitadas y expertas en el área permite mejorar las nociones en el campo geológico y minero.

## 9. RECOMENDACIONES

Existen muchas zonas con deficiencia de información en las que no se pudo definir con total certidumbre el modelo propuesto, este debería ser ajustado de acuerdo a la información obtenida de pozos que podrían realizarse en futuros planes de exploración en la zona en las áreas donde existe dicha limitante. Esto podrá determinar si el modelo realmente se ajusta a la disposición de los mantos en el subsuelo. También se podría requerir un monitoreo detallado de campo que se encamine a buscar datos físicos (toma de rumbo y buzamiento de las capas), para definir con exactitud zonas de fallas.

Con el muestreo que se realiza en los mantos de carbón, se podrían realizar mapas de diferentes características y ver como varían éstas en el yacimiento, tanto de manera vertical como horizontal.

## BIBLIOGRAFÍA

- **BRITISH GEOLOGICAL SURVEY.** 1999. BGS Rock classification scheme, volume 3: Classification of sediments and sedimentary rocks. British geological survey research report. Nottingham, UK.
- **BRITISH PETROLEUM,** 2004. Statistical Review of World Energy, [www.bp.com](http://www.bp.com)
- **CÁCERES, H. et. al.** 1992. The Geology of the Ranchería Basin. Geological Field Trips: 1980-1989. pp. 1-32. Colombian Society of Petroleum Geologist and Geophysicist. Bogotá, Colombia.
- **CARDOZO, L. & GÓMEZ, C.** 1980. Geología del depósito de carbón El Cerrejón en el sector Sarahita – Guajira. Tesis de grado, Fac. Ciencias, Univ. Nacional. Bogotá
- **CEDIEL, F.; MOJICA, J. & MACÍA, C.** 1981. Las Formaciones Luisa, Payandé, Saldaña. Sus columnas estratigráficas características. Geología Norandina 3:11-19.
- **CERREJÓN.** 2008. Cartografía Annex. Informe interno
- **FORERO, A.** 1972. El Paleozoico superior del flanco oriental de la Cordillera Central. Universidad Nacional. Geología Colombiana 7:139-144. Bogotá.

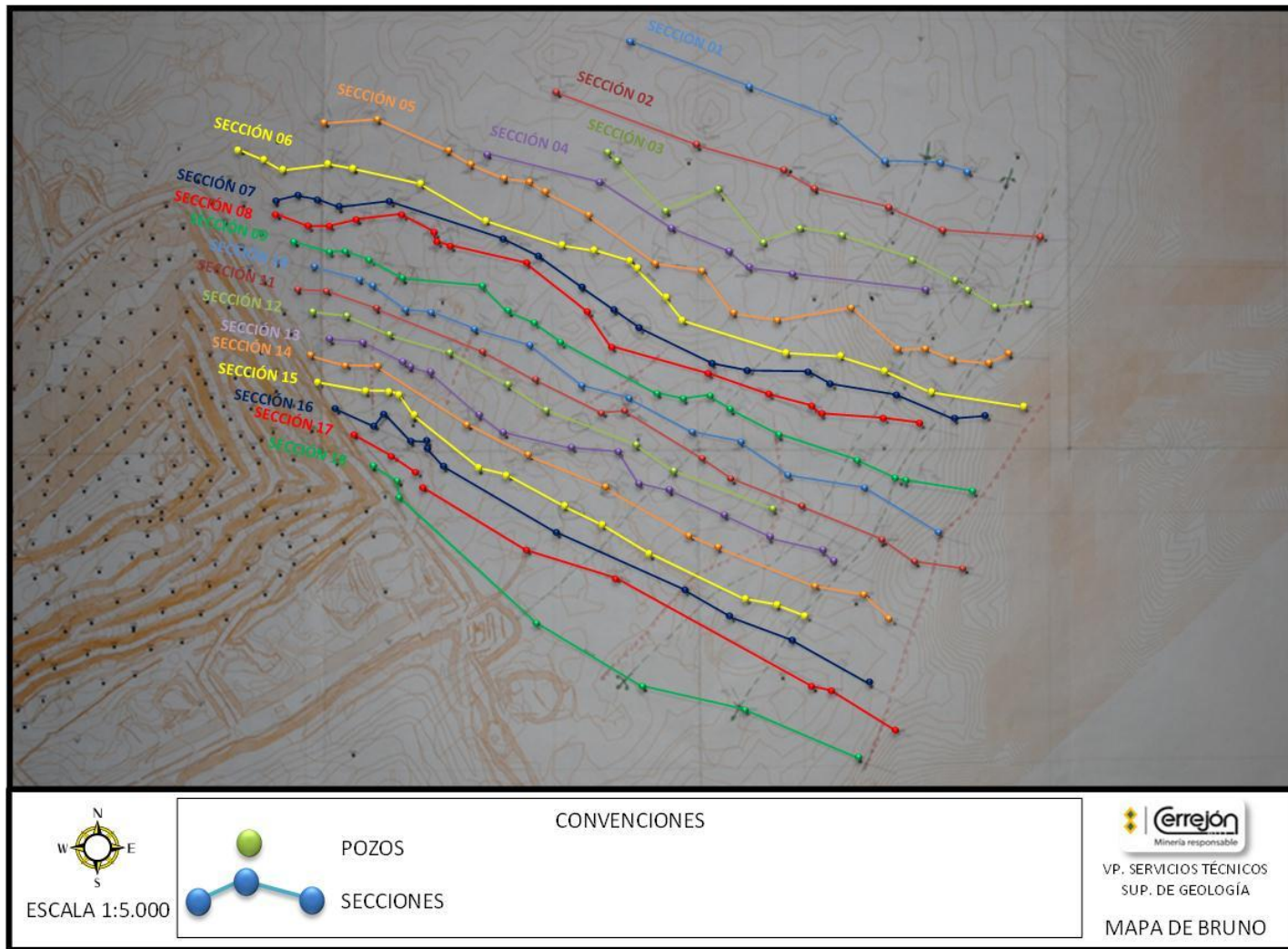
- **GARCÍA, C.** 1990. Proyecto Cesar-Ranchería. Tomo I: Informe Final. Ecopetrol, Bogotá. 151 pgs.
- **GOVEA, C. & DUEÑAS, E.** 1975. Informe geológico preliminar de la Cuenca del Cesar. ECOPETROL. Informe 390, 37p. Bogotá.
- **GLOVER, P.** 2000. PetrophysicsMsc course Notes.
- **GRIEM, W. & GRIEM, S.** 1999. Métodos geofísicos. Geología General. [www.geovirtial.cl](http://www.geovirtial.cl)
- **INGEOMINAS.** 1999. Mapa geológico generalizado del departamento del Cesar. Memoria explicativa. INGEOMINAS. 89p. Bogotá.
- **INGETEC.** 2007. Cartografía geológica del área del piedemonte en zona de Campoalegre. Carbones del Cerrejón LLC, informe interno. 241p. La Mina.
- **JULIVERT, M.** 1960. Geología de la región occidental de García Róvira (Cordillera Oriental de Colombia). Ibid 5:5-32. Bucaramanga.
- **KELLOG, J. & BONINI, W.** 1982. Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in overriding South American plate. Tectonics 1:251-276.
- **LAMUS, F.; BAYONA, G.; CAICEDO, J. & TCHEGLIAKOVA, N.** 2006. Análisis de procedencia de la sucesión Paleocena en el sector norte de la cuenca Cesar-Ranchería. Implicaciones en los modelos tectónicos de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá. Carbones del Cerrejón LLC, informe interno. 10p. La Mina.

- **MARTINEZ – ALVAREZ.** 1981. Tabla para Corrección de Buzamientos. Informe interno. La mina.
- **MARTINEZ, C.** 2006. Descripción de núcleos usando asociaciones litofaciales. Carbones de Cerrejón LLC, informe interno. 50p. La Mina.
- **MILLER, J.** 1960. Tectonic trends in sierra de Perijá and adjacent parts of Venezuela and Colombia. Bull. Am. Assoc. Pet-Geol. 46p
- **MONTES, C.; BAYONA, G.; JARAMILLO, C.; OJEDA, C.; MOLINA, M. & HERRERA, I.** 2005. Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar-Rancheria valley: Rigid-beam pivot model. 6<sup>a</sup> international symposium of Andean geodynamics memoir. pp520-523. La Mina.
- **OLIVELLA, A.** 2005. Cartografía geológica del tajo La Puente. Carbones del Cerrejón LLC, informe interno. 84p. La Mina.
- **SCRIBD INC.,** 2012. Perfilaje de Pozos. <http://es.scribd.com>
- **TSCHANZ, C.** Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta area, Colombia. Informe 1829. Preliminary report. INGEOMINAS. 228p.
- **UJUETA G. & LLINÁS R.** 1990. Reconocimiento geológico de la parte más septentrional de la sierra de Perijá. Geol. Colombiana No. 17.
- **UPME,** 2004. Boletín estadísticas internacionales minero energéticas; 1998 – 2003. 80 p., Bogotá. D.C. [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co)

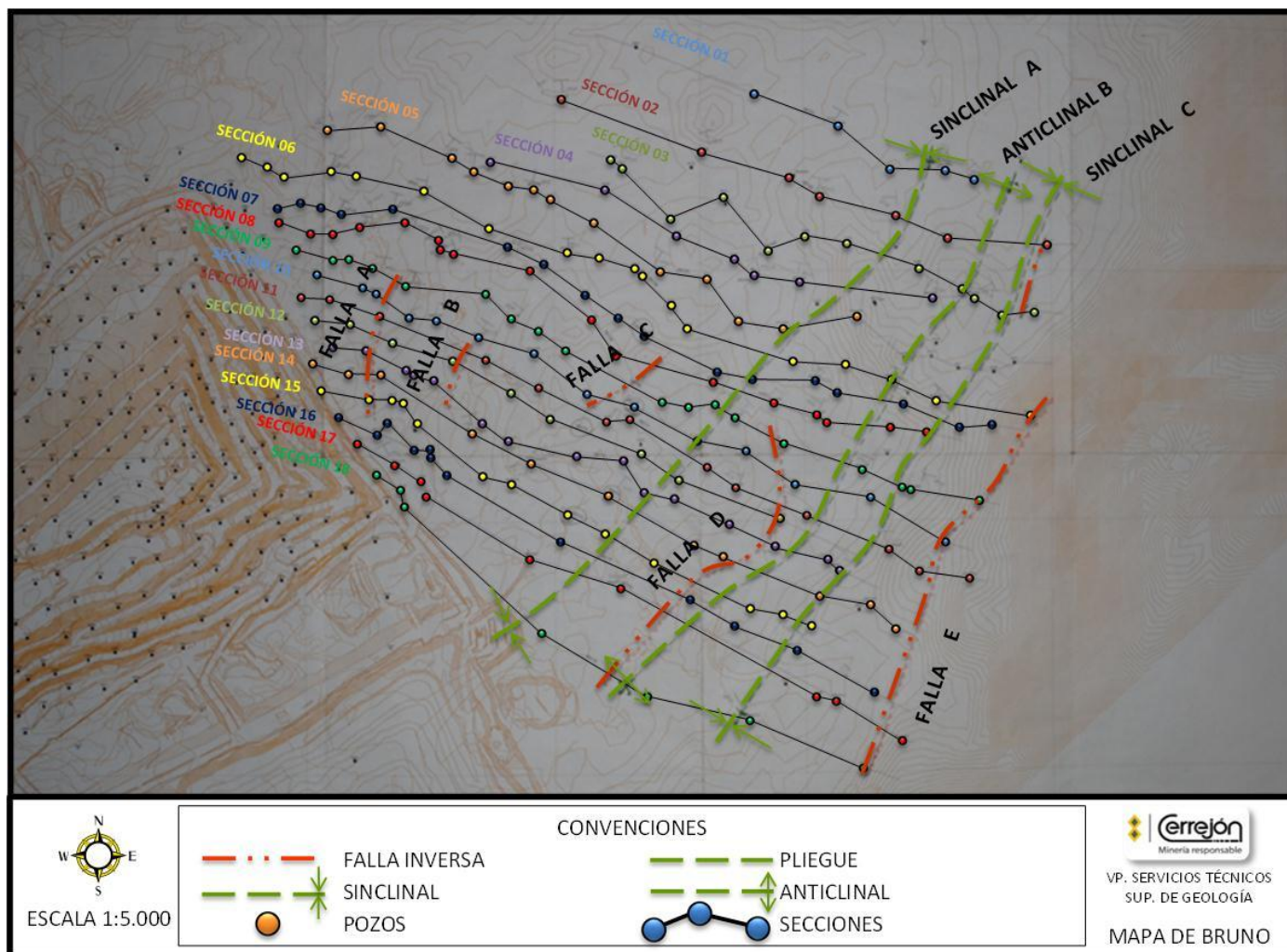
- **U.S. International Energy Agency (IEA), 2004.** Coal Information CD Rom - 2004.
- **VAN DER MERWE, S, 1999.** Guide lines for dipmeter logging whit special reference to the Cerrejon coal field. Albania.
- **www.cerrejón.com**
- **WARD, D.; GOLDSMITH, R.; CRUZ, J. & RESTREPO, H. 1973.** Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. INGEOMINAS. Boletín Geológico 21:1-132. Bogotá.
- **WOKITTEL, R. 1957.** Bosquejo geográfico y geológico de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá.

# ANEXOS

## ANEXO A. SECCIONES ESTRUCTURALES AREA DE BRUNO



## ANEXO B. MAPA DEL AREA DE BRUNO



## ANEXO C. SECCION ESTRUCTURAL AREA DE BRUNO

