ESTUDIO DE SECCIONES ESTRUCTURALES DEL AREA CONEJO, MINA EL CERREJON

Gigiola García Orduz

Plan de proyecto de la modalidad práctica empresarial presentado para optar el título:
GEÓLOGO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Facultad de Fisicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2010

ESTUDIO DE SECCIONES ESTRUCTURALES DEL AREA CONEJO, MINA EL CERREJON.

Gigiola García Orduz

Director:
PhD. Mario García González
Geólogo PhD.

Codirector:
Miguel Jimenez
Geólogo UIS

Tutor:
Fedor Tapias Royero
Geólogo Supervisor Especialista en Exploración
CERREJON COAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Facultad de Fisicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2010

DEDICATORIA

A Dios,
por ser esa luz que me guía
a través de un camino lleno
de bendiciones

A mi padres,
por todos los sacrificios realizados
para sacarme adelante,
por su apoyo incondicional y
por los valores inculcados

A todos aquellos presentes en mi formación,
gracias, porque por Uds. soy quien soy….

AGRADECIMIENTOS

Les doy mis más sinceros agradecimientos ya que sin ustedes no habría culminado esta etapa:

A Dios por todo y por hacer realidad esta meta

A mi familia mi mami, papi, hermanos por creer siempre y por su apoyo.

A mi hermosa sobrina Maria Camila por llegar a nuestro hogar a llenarnos de Felicidad.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

A todo el cuerpo docente de la Escuela de Geología de la UIS, especialmente a Mario García, Miguel Jiménez, Carlos García, Luis Carlos Mantilla, Juan Diego Colegial y Jorge Pinto por enseñarnos a amar lo que hacemos.

Al Cerrejón, en cabeza de Germán Hernández. Quienes me dieron la oportunidad de aprender y ratificar mi inclinación en la geología.

A los geólogos del Cerrejón Fedor Tapias, Ciro Fuentes, John Quintero, Carolina Martínez y a mi gran amigo Nicolás Arévalo, por toda su ayuda, paciencia y sabios consejos durante mi práctica.

A todos mis amigos por los momentos especiales ya que me brindaron más que su compañía en un aula de clases: DIANA, Yohana, Ladys, Maira, Yudy, Alexa, Natalia, Oscar, Mario, Migue, Cristian y a todas aquellas personas que de una u otra forma me ayudaron en este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 14
1. PRESENTACION DEL PROYECTOOBJETIVOS 15
1.1 OBJETIVOS 15
1.1.1 Objetivo General 15
1.1.2 Objetivos Específicos 15
2. MARCO GEOTECTONICO 16
3. GEOLOGÍA REGIONAL 19
3.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO 19
3.2ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO 20
3.2.1 Granulita de Los Mangos 20
3.2.2Formación Guatapuri y/o La Quinta: 20
3.2.3 Formación Rio Negro 20
3.2.4 Grupo Cogollo 21
3.2.9 Formación Cerrejón: 23
3.2.10 Formación Tabaco: 24
3.2.11 Formación Palmito. 24
3.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL 27
3.3.1 Principales fallas en el área 28
4. ANTECEDENTES 32
5. MARCO TEORICO 34
5.1 REGISTROS DIPMETER 34
5.2 CURVA DE POTENCIAL ESPONTANEO (SP): 35
5.3 REGISTRO DE GAMMA RAY (GR) 35
5.4 REGISTRO DE DENSIDAD 36
5.5 PLIEGUES 37
5.5.1 Fault-propagation Folds 37
5.5.2 Shear Fault bend Folds 39
6 METODOLOGIA 40
6.1 INTERPRETACION DE REGISTRO 40

6.1.1 Identificación de Mantos de Carbón a Partir de Registros de Densidad y Gamma Ray....40
6.1.2 Interpretación de Registros Dipmeter....41
6.2 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS....45
6.3 ELABORACION DE SECCIONES ESTRUCTURALES....46
7. RESULTADOS....50
7.1 CORTE GEOLÓGICO SIERRA DE PERIJÁ....50
7.2 DESCRIPCION DE PERFILES SISMICOS....52
7.2.1 línea sísmica cv-1989-1885....53
7.2.2 línea sísmica cv-1989-1100....55
7.3 SECCIONES....56
7.3.1 Sección 1....56
7.3.2 Sección 3....58
7.3.3 Sección 4....60
CONCLUSIONES....64
REFERENCIAS....67
ANEXOS....70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas de Fallas en la Cuenca César Rancheria. 17
Figura 2. Ubicación geográfica del Cerrejón. El área perteneciente al complejo minero se encuentra señalada en rojo.....19
Figura 3. Sección estratigráfica típica de la Formación Cerrejón.....25
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de las secuencias aflorantes en el área de estudio 26
Figura 5. Características comunes de los pligues tipo Fold porpagation Folds 38
Figura 6. Características comunes de los pligues tipo Shear Fault Bend Folds 39
Figura 7. Curvas de densidad que se interceptan a) en 1.8 gr/cc b) curva sinuosa donde se marcaria la intercepción y el inicio del manto.....41
Figura 8. a) correlación entre pozos, b) correlacion entre pozos después de introducir datos Dipmeter 42
Figura 9. Interpretación datos Dipmeter;.....44
Figura 10 Determinación de continuidad, amplitud, y frecuencia de las reflexiones sísmicas.....45
Figura 11. Mapa geológico simplificado del área de estudio, note la localización del Corte A-A' y Líneas símicas CV_1989-1885, CV-1989-1100 utilizadas en el estudio. Para convenciones véase anexo 2 47
Figura 12 Ubicación de Pozos y Secciones Interpretadas (Sección 1, sección 3 y Sección 4). 49
Figura 13 Corte geológico A-A´ transversal, escala 1:20.000 (Mapa geológico Figura 9, anexo 2).....52
Figura 14. LINEA SISMICA CV-1989-1885 Izquierda sin interpretar, en la cual se identifican las estructuras. Derecha sección Interpretada.....54

Figura 15. LINEA SISMICA CV-1989-1100. Izquierda sin interpretar.
Derecha sección Interpretada. 56
Figura 16. Correlación de los Mantos de Carbón de la Sección No 1. 58
Figura 17. Correlación de los Mantos de Carbón de la Sección No 3. 59
Figura 18. Correlación de los Mantos de Carbón de la Sección No 4.
Para mayor detalle ver Anexo 3 61
Figura 19. Bloques que conforman el área de estudio. 62

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE SECCIONES ESTRUCTURALES DEL AREA CONEJO, MINA EL CERREJON[1].

AUTOR: GARCIA ORDUZ, Gigiola[2]

DIRECTORES[3]: Mario García González,
Miguel Jiménez,
Fedor Tapias (Tutor)

Palabras claves: Bloque Conejo, registros Dipmeter, estilo estructural, deformación, correlación estructural.

El comportamiento estructural de una secuencia carbonífera es importante para definir dominios estructurales con el fin de analizar el comportamiento geométrico de las fallas presentes y como afectan estas la continuidad y espesor en dicha secuencia para poder evaluar nuevas y posibles áreas de desarrollo minero y su implicación en una posterior explotación.

La correlación y caracterización es un proceso necesario en la etapa de exploración en el sector minero, en especial en Minas de carbón y más cuando se trata de zonas complejas, replegadas y falladas, como es el caso del bloque Conejo, del cual para comprender y llegar a entender su geología se necesita utilizar todas las herramientas posibles. Los registros Dipmeter son una herramienta poco utilizada en el sector minero y muy valiosa; ya que con ellos es posible determinar la inclinación de estratos, el desplazamiento relativo de las capas y además permite obtener la desviación, el azimuth y el rumbo relativo del pozo.

Identificando y analizando los parámetros expuestos anteriormente pueden determinarse la presencia de estructuras y deformaciones en la zona, siendo importantes para realizar correlaciones a nivel local. A través del análisis de líneas sísmicas y de la correlación de cuatro secciones ubicadas en el área de Interés se estableció la continuidad de los mantos de carbón y se concluyó que la zona de estudio es un sistema conformado principalmente por tres bloques los cuales presentan diferencias en el buzamiento de sus capas y en el contenido de mantos de carbón y solo uno de ellos presenta paquetes de mantos económicamente explotables.

[1] Práctica empresarial realizada en la Mina “El Cerrejón”, Albania-Guajira.
[2] Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Geología.
[3] Director: PhD. Mario García González. Co-Director: Miguel Jiménez, Geólogo UIS. Tutor: Fedor Tapias, Cerrejón Coal.

ABSTRACT

TITULO: ANALYSIS OF STRUCTURAL CROSS-SECTIONS OF CONEJO BLOCK, EL CERREJON COAL MINE[4].

AUTHOR: GIGIOLA GARCIA ORDUZ[5]

ADVISORS[6]: Fedor Tapias (Tutor)
Mario García González,
Miguel Jimenez

Keywords: Conejo block, dipmeter logs, structural style (domain), deformation, structural correlation.

Structural behavior of a coal-bearing sequence is important to define structural domains in order to analyze the geometrical behavior of a set of geological faults and how these affect the continuity and thickness stratigraphic in that sequence in order to be able to evaluate new and feasible areas of mining and its implication in a subsequent exploitation.

Correlation and characterization (description) are a needed process in the stage of mining exploration specially in coal mines and even more when it is a geologically complex area: re-folded and faulted, such as it is Conejo block, which needs joining as many geophysical tools as possible in order to understand its geology. The dipmeter logs are a tool valuable because with the information provided for them it is possible to determine the dip and relative movement of seams and besides to get the deviation, the azimuth and the relative strike of seams but instead of this, these logs are barely used in mining industry.

Identifying and analyzing the parameters previously exposed geological structures and tectonic discontinuities in the area of study can be determined and therefore useful to carry out correlations to local scale. Through of study of seismic lines and correlation of four cross sections located in the area of study was proposed (determined) the continuity of coal seams and it was concluded that the area of study is a system chiefly conformed of three blocks which present variations in the dip of their seams and in coal compounds quality and only one of blocks presents a coal-bearing sequence economically exploitable.

[4] Práctica empresarial performed at “El Cerrejón”coal mine, Albania-Guajira.
[5] Faculty of Physic-Chemical Engineerings. School of Geology.
[6] Advisor: Mario García González (UIS). Co-advisor: Miguel Jiménez (UIS). Tutor: Fedor Tapias, (Cerrejón Coal).

INTRODUCCIÓN

La secuencia de mantos depositados durante el Paleoceno en la mina El Cerrejón asciende a un número mayor de 100 originando grandes cantidades de este mineral que generaron los depósitos que hoy explota la empresa Carbones del Cerrejón L.L.C. El bloque Conejo pertenece a una de las posibles zonas para desarrollo minero ya que gracias a estudios anteriores se ha encontrado una buena densidad de carbón en la zona. La secuencia carbonífera en el bloque Conejo presenta problemas de continuidad y espesor observados durante la operación exploratoria; no se conocía a ciencia cierta si el problema planteado es de tipo estratigráfico, estructural o una combinación de ambos. Este trabajo consiste en un análisis geométrico de la deformación del bloque Conejo utilizando los pozos asociados a las diferentes secciones a correlacionar, con el fin de identificar la disposición de los estratos y diferentes estructuras presentes en dichas secciones, así como el análisis de la información existente tal como; descripciones litológicas, fotografías de pozos corazonados y registros de cada pozo. El análisis geométrico de este bloque es posible con la información proporcionada por los registros dipmeter, herramienta que no ha sido muy utilizada en el área minera convirtiéndose en el tipo de información apropiada para contribuir al conocimiento de la cinemática de deformación en la zona. El marco tectónico regional donde se encuentra el depósito de carbón del Cerrejón es complejo debido a la presencia de las fallas de Oca y Cerrejón, que forman una “esquina tectónica” en donde la cinemática de deformación es difícil de interpretar. La geometría y posición del bloque Conejo es concordante con respecto a este marco tectónico, pero el buzamiento de las capas y de las estructuras presentes difieren un poco del modelo “clásico” al cual se ajusta el Cerrejón; el conocimiento del comportamiento de esta zona constituye un aporte al modelo geológico de la empresa y este a su vez influirá en la efectividad de la planeación de una nueva área de desarrollo minero

1. PRESENTACION DEL PROYECTOOBJETIVOS

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

- Estudiar las secciones estructurales del área Conejo del Cerrejón, basado en la Interpretación de secciones sísmicas y Registros Dipmeter.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Revisar la información geológica existente en la zona de estudio, recopilada a través de núcleos de perforación y registros de pozo.

- Realizar la interpretación de secciones sísmicas.

- Estudiar la geometría de los pliegues y fallas

- Analizar y depurar los datos Dipmeter pertenecientes a cada uno de los pozos que permitan una posterior interpretación.

- Caracterizar la deformación de los mantos y sus implicaciones en la explotación.

- Verificar la continuidad lateral de los mantos de carbón en el sector

2. MARCO GEOTECTONICO

El límite de la placa Caribe con la placa Sur Americana forma una gran zona de deformación transpresional lateral dextral activa, así como cabalgamientos, movimientos transcurrentes, y fenómenos de extensión “rifting” desarrollados a lo largo del Cenozoico (Pindell & Barrett, 1990). El bloque se ha visto sometido al desarrollo de zonas complejas de limites transcurrentes en el Caribe sur desde el Eoceno, asociado a la migración E de la placa Caribe, de acuerdo con la hipótesis de una proveniencia Pacifico. Adicionalmente la compresión entre Norte América y Sur América habría resultado en un periodo de deformación en toda la placa Caribe desde el Mioceno hasta hoy (Pindell & Barrett, 1990).

La cuenca Cesar-Ranchería en el área de la mina contiene principalmente rocas de la Formación Cerrejón cuya expresión topográfica es de colinas suaves y esta normalmente cubierto por depósitos aluviales; se puede considerar como la prolongación hacia el norte de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, esta cuenca inicia su configuración en el Paleozoico, pero su desarrollo estructural y geológico tal como hoy se conocen se concretó a finales del Terciario (Ecopetrol, 1989). La apertura de esta cuenca se dio por un evento de pivoteo de una gran placa rígida de dimensiones corticales, a lo largo de un eje horizontal de dirección NE-SW que simultáneamente levantó la Sierra Nevada de Santa Marta (Montes et al., 2005a).

El Valle del Cesar-Ranchería preserva una gruesa cuña de edad Paleoceno, correspondiente a las Formaciones Manantial y Cerrejón. Para explicar su formación y la presencia de un bloque de corteza fuera de equilibrio isostático, Montes et al., (2005) proponen un modelo geodinámico conceptual en el cual la rotación de una placa continental rígida a lo largo de un eje horizontal levanta la

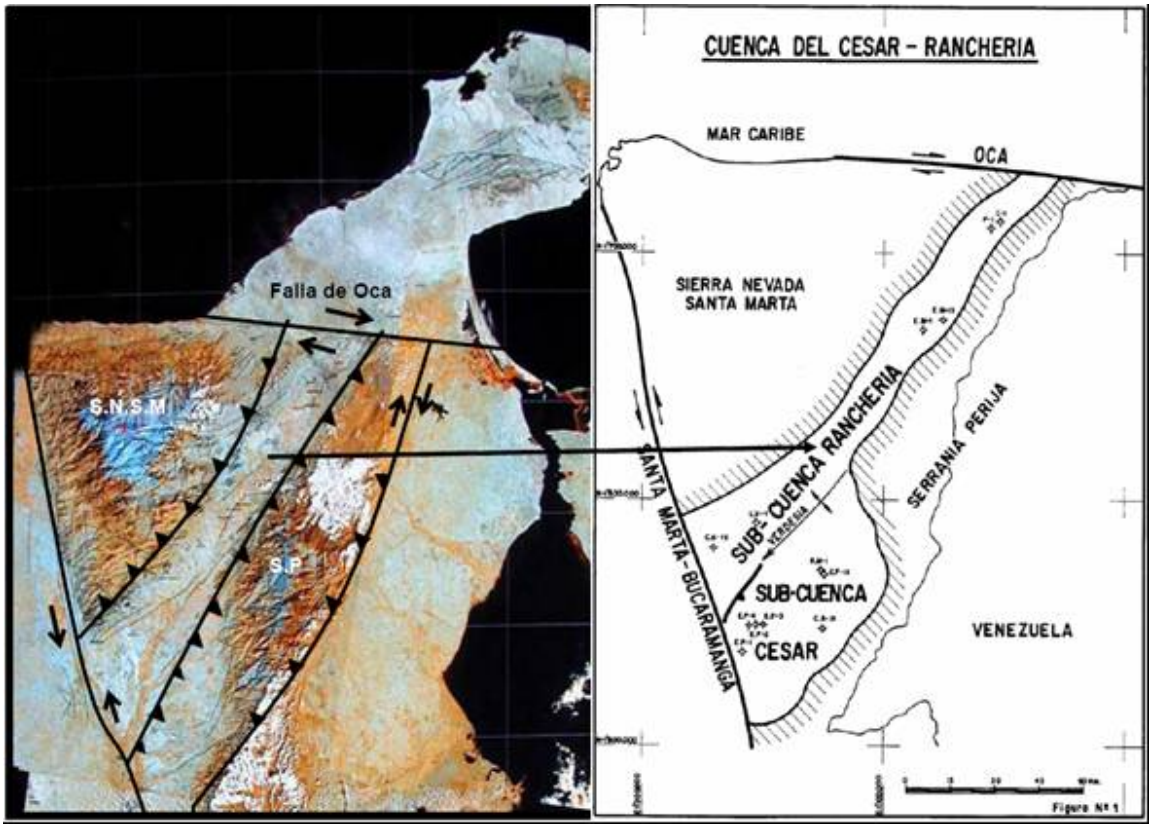
Sierra Nevada de Santa Marta y abre el espacio de acomodación en el Valle del Cesar-Ranchería de manera simultánea.

Esta alternativa explica la mezcla de carbonatos y la cuña clástica sinorogénica en continuidad estructural con el flanco suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta. Así, una placa cortical rígida rotando a lo largo de un eje horizontal con orientación NE-SW ya mencionada, expondría la corteza profunda en las partes altas de la Sierra Nevada de Santa Marta mientras el Valle del Cesar-Ranchería se inclinaría al Sureste creando espacio de acomodación en el Valle del Cesar-Ranchería donde la agradación de una secuencia rica en carbón se depositó. La secuencia Paleocena de la Formación Manantial y los carbones de la cuña clástica pueden marcar el inicio de la inclinación del plano y la máxima sobreposición de esta cuña hacia la Sierra Nevada de Santa Marta puede restringir la localización del eje horizontal para este tiempo.

Diferencias litológicas y estructurales de la cuenca han dado lugar a que el área pueda dividirse en dos sub-cuencas bien definidas (figura 1), una en la parte sur (sub-cuenca Cesar) y otra en la parte norte (sub-cuenca de Ranchería) (Pindell et al., 1998), geográficamente esta cuenca limita al norte con la falla de Oca, al sur con la falla Santa Marta-Bucaramanga, al oriente con la Serranía del Perijá y al occidente con la Sierra Nevada de Santa Marta.

El bloque Conejo se encuentra afectado por las fallas Ranchería y Cerrejón la cual es producto del cabalgamiento en dirección NW que dio el origen estructural a la cadena montañosa del Perijá (Kellogg & Bonini, 1982). En el área de estudio el estilo estructural dominante es de fallas de cabalgamiento con vergencia al NW y pliegues asociados al fallamiento comúnmente paralelos y simétricos, fallas de rumbo de alto ángulo y estructuras en flor asociad

Figura 1. Sistemas de Fallas en la Cuenca César Rancheria.



Fuente: Arango, F; et al UNAL MEDELLIN

3. GEOLOGÍA REGIONAL

3.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio corresponde al sector sur del yacimiento de carbón en explotación de la mina del Cerrejón, cercano a los municipios de Barrancas y Fonseca al Sur del departamento de La Guajira. Se ubica en el Valle del Río Ranchería el cual fluye en dirección NE, limitado al oeste por la Sierra Nevada de Santa Marta y al este por la Serranía del Perijá. (Figura 2). A nivel regional predomina un relieve plano y ondulado, situado a 125 m de altitud, en el cual se destacan la vertiente occidental de la Serranía de Valledupar, el Cerro El Cerrejón y la Cuchilla de Palmarito.

Figura 2. Ubicación geográfica del Cerrejón. El área perteneciente al complejo minero se encuentra señalada en rojo.

Fuente Intranet Cerrejón Coal.

3.2ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Estructuras analizadas se encuentran en la Formación Cerrejón. Estratigráficamente dicha Formación es subyacida transcionalmente por las rocas calcáreas de la Formación Manantial y Formación Hato Nuevo y suprayacida discordantemente por la Formación Tabaco; con un espesor total que supera los 2 km (Figura 4).

3.2.1 Granulita de Los Mangos

La roca del Precámbrico cristalina que aflora en el Arroyo Las Vacas - Corral de Piedra, localidad de San Juan del Cesar, se caracteriza generalmente por presentar un aspecto néisico en el cual los minerales en forma de granos alargados, orientados paralelamente, se encuentran dispuestos en bandas. Este tipo de fábrica cristalina alterna cuarzo – feldespato (en mayor proporción) con hornblenda – biotita, el feldespato en mayor proporción le da el carácter de cuarzo – pertítica a esta granulita (Tschanz et. al.1969 en Ingeominas, 2003).

3.2.2Formación Guatapuri y/o La Quinta:

Son Rocas Mesozoicas volcánicas, lavas y piroclástos rojos y grises respectivamente, máficas a ultramáficas con texturas microporfiríticas a fluoidal, con microcristales de palgioclasa en matriz fina piroxénica. Predominan las rocas volcánicas lávicas sobre las tobas que se interestratifican (Kündig, 1938 en Ujueta, 1990)

3.2.3 Formación Rio Negro

Consiste en rocas sedimentarias clásticas del Cretáceo Inferior, con un espesor aproximado de 300 a 400 metros; su contacto basal es angular discordante, sobre rocas volcánicas jurásicas de la formación La Quinta y/o Guatapurí. Ocurren bancos de conglomerados de grava de 20 a 40 metros de espesor; predominan

fragmentos redondeados de lavas rojas y de piroclastos grises verdosos de composición máfica, en matriz guijarroso –arenosa, subarcósica (Hedberg, 1931en ingeominas, 2003).

3.2.4 Grupo Cogollo

3.2.4.1 Formación Lagunitas:

Rocas del Cretáceo Medio su espesor aproximado de 450 a 500 metros. Su contacto inferior con la Formación Río Negro es neto, sobre el conglomerado de gravas de composición polimíctica. Los 120 metros basales se caracterizan por presentar calizas micríticas grises claras a marrón claras, interestratificados en bancos de 10 a 12 metros con calizas arenosas finas, con estratificación ondular, en espesores de 3 metros, alternando con calizas micríticas en espesor de 3 a 6 metros. Sus contactos son netos (Garner ,1926 en Ingeominas, 2003).

3.2.4.2 Formación Aguas Blancas:

La secuencia de rocas sedimentarias carbonáticas, con un espesor aproximado de 300 metros, se dispone concordantemente con contacto neto sobre la Formación Lagunitas, en bancos de calizas esparíticas a calizas arenosas finas, color gris marrón claro, intercaladas con bancos de calizas fosilíferas con abundantes conchas de moluscos. Predominan las conchas de lamelibranquios gruesas y ornamentadas, y gasterópodos en menor proporción. Estos niveles son característicos por presentar estratificación ondular plana. Continúan en la sucesión de la secuencia algunos niveles de calizas microfosilíferas (Garner, 1926 en Ingeominas, 2003).

3.2.5 Formación La Luna.

Rocas sedimentarias clásticas del Cretáceo Superior y carbonáticas, con un espesor aproximado de 250 metros, están en contacto basal neto concordante con los estratos fosilíferos esparíticos marrones claros de la formación Aguas Blancas. Consiste en una secuencia de bancos de calizas limosas negras intercalados con areniscas finas subarcósico – calcareas, color gris a marrón claro, en canales con laminación ondular plana. Es común encontrar nódulos de chert microfosílifero negro en estratos calcareos – arenosos, al igual que grandes fósiles de amonoideos en calizas negras hacia la parte media de la secuencia (Garner, 1926 en Ingeominas, 2003).

3.2.6 Formación Molino.

Rocas sedimentarias clásticas finas del Cretáceo Superior desarrollan un espesor aproximado de 350 metros sobre un contacto basal transicional con la formación La Luna. Constituyen la parte basal de esta unidad de Lutitas calcáreas gris verdosas a gris claras, intercaladas con areniscas finas arcillosas grises claras en espesores de 1 a 3 metros, en secuencia alterna (Tschanz et. al. 1969 en Ingeominas, 2003).

3.2.7 Formación Hato Nuevo

Rocas sedimentarias clásticas finas del Paleoceno Inferior-Medio, con un espesor aproximado de 200 metros, ocurren en contacto basal transicional sobre las rocas de la formación Molino. Limolitas arcillosas, micáceas, marrón claras, con estratificación ondular, a veces alternando con shale gris, corresponden a los estratos basales (De Porta, 1974).

Formación Manantial.

Calizas esparíticas, grises claras a gris oscuras, fosilíferas, compuestas principalmente por conchas de lamelibranquios (Ostridos) caracterizan esta formación, cuyo espesor aproximado es de 300 a 350 metros y se disponen sobre la formación Hato Nuevo en contacto transicional. La secuencia basal inferior, consiste de calizas arenosas, gris verdosas, a veces esparíticas, en espesores de 1 a 3 metros que alternan con arcillolitas grises y limolitas calcáreas, verdosas (Bayona et al., 2004).

3.2.9 Formación Cerrejón:

Tiene ~ 1000 m de espesor (Ramos, 1990 en Bayona et al., 2004) y consiste predominantemente de areniscas de cuarzo arcillosas del Paleoceno Superior , de color oscuro, shales negros y mantos de carbón. La formación Cerrejón se ha dividido en tres miembros (Figura 3): un miembro inferior que consiste de shales negros fosilíferos y arcillolitas negras laminadas con delgadas láminas lenticulares de arenisca de cuarzo; también se presentan areniscas con laminación flaser. Todas estas capas subyacen o suprayacen mantos de carbón gruesos. El miembro medio se compone de lodolitas pobremente bioturbadas y areniscas con laminación flaser y heterolítica, restos de plantas dispersos y las secuencias grano crecientes y grano decrecientes son comunes.

El miembro superior está dominado por lodolitas y limolitas de grano muy fino, macizas, lenticulares, bioturbadas con abundantes restos de plantas; están intercaladas por areniscas macizas con estratificación cruzada gruesa a muy gruesa (Bayona et al., 2004).

Hacia la base la Formación Cerrejón presenta un contacto transicional con la Formación Manantial de edad Paleoceno, esta última buzando hacia el sureste,

mientras que hacia el techo presenta un contacto discordante con la Formación Tabaco (Palencia, 2007).

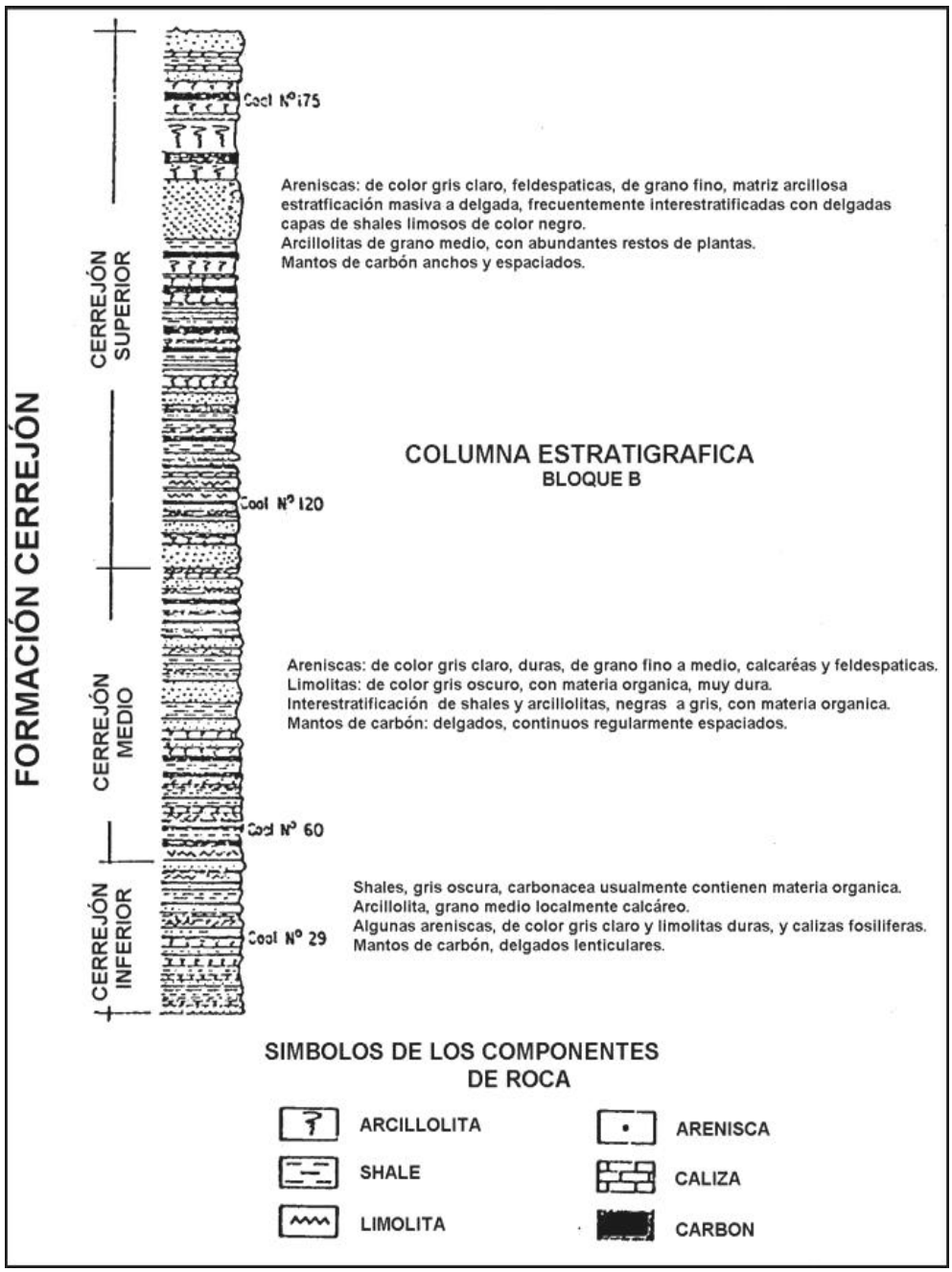
3.2.10 Formación Tabaco:

Descansa discordantemente sobre la Formación Cerrejón. Son rocas clásticas gruesas y conglomerados de grava basales, conformados por fragmentos redondeados de chert negro y cuarzo lechoso en matriz arenosa, arcósica y a veces carbonácea. La parte superior de la Formación está compuesta por arenas subarcósicas que hacia el tope se convierten en areniscas cuarzosas de grano fino (De Porta, 1974).

3.2.11 Formación Palmito.

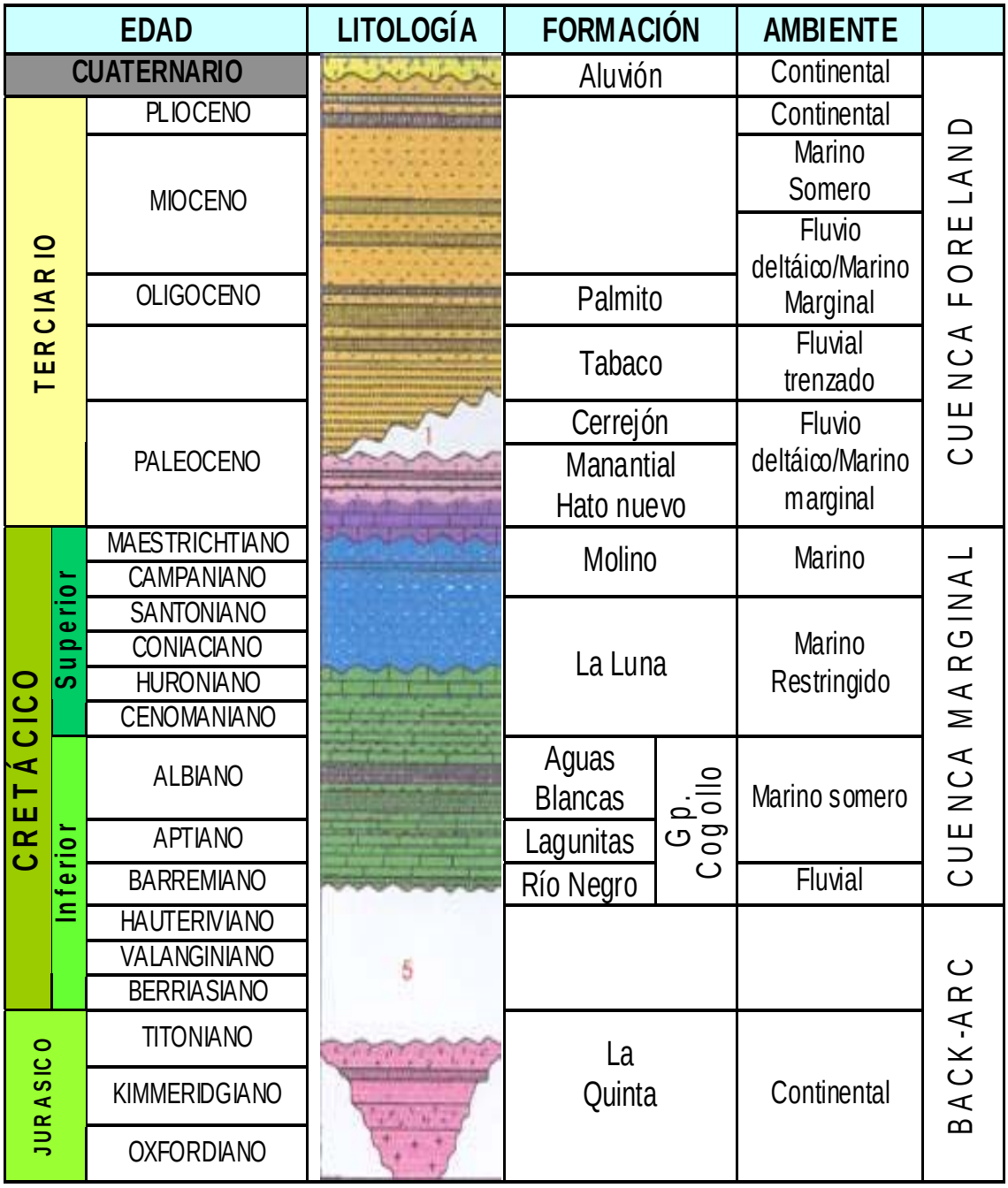
Rocas sedimentariasclásticas finasde edad MIoceno, con un espsor que oscila entre los 180 y los 300 metros. El contacto basal es transicional con la formación Tabaco, en la base de la secuencia encontramos areniscas arcillosas, de grano medio cuarzo feldespáticas a arcosas rosadas y amarillas rojizas con laminación cruzada, alternan canales de arcillolitas grises con laminación ondular discontínua. 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 (Christ,1927 en Ingeominas, 2003).

Figura 3. Sección estratigráfica típica de la Formación Cerrejón



Fuente: Martínez, 2006

Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de las secuencias aflorantes en el área de estudio



Fuente: Martínez, 2006

3.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

La Sierra de Perijá corresponde a una serranía alargada en dirección NNE-SSW, se ha venido elevando desde el Mioceno tardío al Reciente, durante la Orogenia Andina la compresión por la vergencia de las placas Caribe, Nazca y Suramericana produciendo fallamientos inversos de muy bajo ángulo, debido a la distancia a la cual se encuentra la zona de la serranía, respecto de donde se produce la triple conjunción (Ingeominas, 2003).

La estructura del campo carbonífero del Cerrejón es cinemáticamente compleja, está localizada dentro del cinturón de Cabalgamiento del Cerrejón – Ranchería y está dominado por los rasgos asociados a ellos que forman parte de los efectos de la orogenia Andina en la zona Norte de Suramérica. La Subcuenca del Cerrejón está formada por pliegues anticlinales y sinclinales suaves de dirección predominante SW-NE que forman el flanco occidental de la serranía de Perijá, hasta el extremo NE del área donde termina contra la Falla de Oca; sin embargo la estructura general del yacimiento corresponde a un monoclinal con rumbo NE definido por las colinas de la Formación Manantial al W y la Falla Cerrejón al E. La orientación general de los estratos es N60E, con buzamiento al SE de 10 a 15° (Kellogg & Bonini, 1982).

La mayoría de las fallas observadas en el área afectan a casi todas las rocas presentes, están parcialmente expuestas o han sido inferidas por la evidencia estratigráfica y topográfica que presentan. A pesar de que la Sierra Nevada de Santa Marta y la Sierra de Perijá son unidades geomorfológicamente independientes separadas por el Vale del César-Ranchería, se ha encontrado, al comparar la cartografía geológica de las dos sierras están afectadas por fracturamiento común. La fracturación que afecta el área de estudio ha sido agrupadas en las siguientes direcciones preferenciales:

Dirección Estructural NE
Dirección Estructural NNO-SSE
Dirección Estructural E-O
Dirección Estructural NO-SE

3.3.1 Principales fallas en el área

3.3.1.1 Dirección Estructural NE

En el flanco este de la Sierra de Perijá los rasgos estructurales más importantes estructuras de bloques (Horst y graben), están delimitados por fallas de dirección aproximada N30°E (Ortiz, 1977 en Ujueta, 1990). Las estructuras más importantes que siguen esta dirección son: las fallas de Perijá, El tigre y Cuiba y el sinclinal de Manuelote. Las siguientes fallas más representativas de dirección N35°E en el flanco occidental de la Sierra de Perijá: Falla Cerrejón, Falla Yaya, Falla las Minas, Falla Monte Lía y Falla la Colonia.

Falla Ranchería: De acuerdo con información de perfiles sísmicos a la Falla Ranchería tiene un buzamiento en superficie cercano a los 45º y se suaviza a cerca de 20 y 30º cerca de su base Cretácica. La Falla de Ranchería localizada ~ 8 Km al S del anticlinal de Tabaco, es de vital importancia económica ya que esta es la encargada de duplicar los mantos de Carbón de la Formación Cerrejón. Esta falla no es tan persistente como la Falla Cerrejón, pero expone una longitud ~ de 100 km. En el sur esta falla se ramifica en dos, Ranchería Superior y Ranchería Inferior (Van der Merwe, 2002).

Falla Cerrejón: Esta falla es un cabalgamiento que se localiza a lo largo del flanco W de la Serranía de Perijá. Tiene un rumbo SW-NE, con un ángulo bajo entre 9 y 12°, evidenciado porque su traza sigue los contornos topográficos. La
traza de la falla finaliza hacia el NE donde se encuentra con la falla de Oca, y donde también finaliza la Serranía de Perijá. La falla Cerrejón es responsable del

cabalgamiento de ~ 16-26 Km en dirección NW de sedimentos Mesozoicos sobre areniscas Terciarias y se interpreta como una estructura a escala cortical que llega hasta profundidades de 8 Km (Kellogg & Bonini, 1982).

Falla Las Minas: Es una falla de tipo inverso, de ángulo alto y buzamiento al este, de dirección aproximada N40°E, esta falla levanta en toda su extensión sedimentos Devonianos-Carbonianos que pone en contacto con sedimentos del grupo Girón (Ujueta, 1990).

Falla Yaya: Es una falla regional de tipo inverso, de alto ángulo de buzamiento y buzando al este, su dirección aproximada es N25°E, su traza se acerca a la traza de la Falla Cerrejón, hasta el arroyo Surimena al norte, su continuación hacia el norte puede estar relacionada con depósitos cuaternario presentes allí. Esta falla levanta de sur a norte, sedimentos del Devoniano-Carboniano sobre sedimentos del grupo Girón (Ujueta, 1990).

3.3.1.2 Dirección Estructural NNO-SSE

La falla de dirección NNO-SSE más importante, es la Falla de Santa Marta, tanto en la Sierra Nevada de Santa Marta como en la Sierra de Perijá hay varias fallas paralelas o subparalelas a la Falla de Santa Marta (Ujueta, 1990); sin embargo nuestra área está representada sólo por algunas fallas que aún cuando causan algunos desplazamientos o alcanzan a formar límites entre unidades, pero no son de mayor importancia, de las cuatro direcciones preferenciales mencionadas, esta dirección es la menos notoria en la zona de estudio.

3.3.1.3 Dirección Estructural E-O

La dirección E-O es una dirección importante en toda el área y está representada principalmente por las fallas de Occa y Cuisa, esta última está situada

aproximadamente a 80 km al norte de la Fala de Occa, dentro del trabajo realizado por Ujueta, (1990) se realizo la cartografía en el flanco occidental de la Sierra de Perijá asignándole nombre a las fallas encontradas: Falla Palma, Falla Sirimena, Falla Juan Simón, y falla Marimondas (Ujueta, 1990).

Falla de Oca: Esta falla se encuentra localizada al norte de la zona de estudio, tiene un rumbo E-W y un desplazamiento dextral estimado entre 90 y 100 km. Esta falla forma parte de un sistema de fallas transpresivas aparentemente se desplazó durante el Terciario Tardío como resultado del acortamiento en la Serranía del Perijá (Kellogg & Bonini, 1982).

3.3.1.4 Dirección Estructural NO-SE

En Ujueta, (1990) se encontró un juego de fallas transversales a la dirección predominante NE-SO que cruza toda la zona estudiada, estas fallas tiene una dirección comprendida entre N30°O y N50°O y constituyen un juego de fallas más recientes que las fallas de dirección NE a las cuales se desplazan o quizá pueda tratarse de fallas más antiguas que las fallas de dirección NE pero que fueron reactivadas posteriormente. En el flanco oriental de la Sierra de Perijá, un modelo de fallamiento de dirección aproximada N30°O que afecta a todas las estructuras presentes, las fallas más representativas de la dirección NO: Falla el Molino, Falla Villanueva, Falla Masterban y Falla Capuchino.

Falla El Molino: según Ujueta, (1990) Se inicia en la cresta de la Sierra de Perijá, controla por 2 km las cabeceras del río Molino el cual recibe su nombre y se extiende por 5 km más hasta aproximadamente la población del Molino.

Falla Masterban: Se extiende por aproximadamente 9 km desde la cresta de la Sierra de Perijá al este, hasta cerca de la localidad de Conejo al occidente, prácticamente en todo su recorrido controla en dirección NO el arroyo Masterban y luego, más al occidente controla también un tramo del arroyo conejo. Esta falla

corta de este a oeste la falla de Monte Lía, las Minas y Cerrejón, quizá esta falla sea la responsable del levantamiento de las rocas más antiguas que afloran en la región (Ujueta, 1990).

Fallas Capuchino: Es una falla importante que se extiende aproximadamente por 12 km desde el cerro Monte Cristo hasta el corregimiento Cañaverales, es una falla normal con el bloque NE levantado que pone en contacto rocas Devoniano-Carbonianas con rocas mesozoicas, esta falla junto con las fallas las Minas y Monte Lía delimitan y son responsables de levantar un bloque en dirección NE compuesto por las rocas más antiguas que afloran en la región. La falla Capuchino corta de este a oeste la Falla las Minas y desplaza la falla Cerrejón; en el SE, controla buen aparte del curso del río capuchino y en el NO, el arroyo Cañaverales, esta falla puede prolongarse regionalmente hacia el occidente siguiendo la misma dirección, atravesar el Valle del César –Ranchería e internarse en la Sierra Nevada de Santa Marta.

4. ANTECEDENTES

Para la realización del presente trabajo, se tuvieron en cuenta varios estudios anteriores efectuados, como base de datos informativos.

La Sierra de Perijá y su tectónica fue considerada por Miller (1962 en Palencia, 2007) quien hace anotaciones sobre los movimientos de la Falla de Oca, y también registra las discordancias existentes en el Eoceno superior. Edades radiométricas fueron establecidas por medio de la datación en biotitas, con métodos K-Ar y Rb-Sr, propuestas por Pinson, Hurley y otros (1962 en Palencia, 2007). Los neises precámbricos, al norte de Colombia, como el Neis de Dibula y la Granulita de los Mangos, presentaron edades radiométricas Rb-Sr de 1.400 m.a., según los trabajos realizados por MacDonald y Hurley (1969 en Palencia, 2007).

Campell (1965 en Palencia, 2007) nos habla de la actividad de la falla Santa Marta- Bucaramanga en el Pleistoceno, por la deformación presente en las terrazas del mismo período.

Los primeros trazos cartográficos de la F. Cerrejón los presentaron Castro y Orjuela (1970 en Palencia, 2007) quienes mencionan fallas de cabalgamiento de bajo ángulo, donde calizas del Cretáceo y areniscas rojas Jurásicas cabalgan hacia el NW sobre areniscas y carbones del Paleoceno. En el sector de Manaure, Forero (1972 en Palencia, 2007) hace la cartografía y menciona una discordancia basal para el Devónico y una discordancia basal para el carbonífero. Soeters (1972 en Palencia, 2007) a su vez se encarga de estudiar la geología y la geomorfología de los Montes de Oca.

La evolución geológica de la Sierra Nevada de Santa Marta es el tema que proponen Tschanz, Marvin y otros (1947 en Palencia, 2007) para establecer las edades radiométricas de las provincias de Santa Marta, Sevilla, de de Sierra Nevada y de Perijá y se encargan de establecer datación para la mayoría de rocas intrusivas por métodos K-Ar y Rb-Sr.

Los Montes de Oca fueron estudiados también por medio de análisis de imágenes Landsat por Arango (1980 en Palencia, 2007), quien estableció un bosquejo tectónico, para el valle del río Cesar.

El basamento de la Sierra del Perijá fue estudiado por Kellogg (1981 en Palencia, 2007), quien estimó ángulos de inclinación y desplazamientos relativos de las fallas de Cerrejón y de Oca. Kellogg y Bonini (1982 en Palencia, 2007) posteriormente efectúan homologación de los estilos estructurales de la sierra del Perijá y de los Andes de Venezuela.

Se conocen también algunos estudios petrográficos presentados por Alvarez y Gómez (1986 en Palencia, 2007) quienes establecen la asociación de basaltos (para lavas) con carbones y mencionan la ocurrencia de magnetita en proporción mayor que el 10% en las rocas asociadas. Ujueta y Llinás (1990 en Palencia, 2007) en secciones petrográficas delgadas encuentran al microscópico brechas calcáreas con fragmentos de biomicrita y arenisca (Devónico), arenitas subarcósicas calcáreas de grano fino (pérmico) y tobas riolíticas con pórfidos de feldespatos potásicos, plagioclasas macladas polisintéticas, y cuarzo en matriz de vidrio y microcristales (Jurásico superior).

5. MARCO TEORICO

5.1 REGISTROS DIPMETER

Los registros Dipmeter son registros microresistivos que miden la conductividad de la Formación por medio de electrodos montados en cuatro patines. Mediante la respuesta obtenida por estos electrodos, es posible determinar la inclinación de los estratos; el desplazamiento relativo, las posiciones acimutales y radiales de cada uno de los sensores es usado para calcular el buzamiento respecto a la herramienta y luego relativo a un sistema verdadero de coordenadas 3D. Además la herramienta cuenta con un cartucho mecánico que permite obtener la desviación, el azimuth y el rumbo relativo de pozo. También se obtiene el calibre del pozo. Para la realización de la medición se requiere de un medio conductivo (Cadena, 2007). Las mediciones de este tipo de registros proveen información como la presencia de microhorizontes, la dirección de cambios en algunos parámetros geológicos, cambios diagenéticos en los depósitos. Información sedimentológica como la determinación de la génesis y ambientes, geometría de los cuerpos arenosos, arcillosos o calcáreos, tipo de laminación, dirección del transporte de depositación.

En la parte estructural permite la determinación de estructuras formacionales, los componentes de las rocas que han sido cambiados térmicamente y datos de disposición de estratos. Permite adicionalmente la determinación de buzamientos pos depositacionales, tipo y dirección de las fallas, así como fallas cercanas y zonas de falla, incorformidades y discontinuidades, pliegues y zonas de fractura. Para la interpretación de los registros Dipmeter hay que tener en cuenta el tipo de información que se está tratando, ya que como vimos anteriormente estos registros pueden registrar diferente tipo de información. De manera general los planos que pueden ser leídos por el registro Dipmeter se puede dividir en tres:

técnicos, estructurales y sedimentarios. Por lo anterior se puede presentar información proveniente de estos tres tipos de planos se encuentren mezclados en el registro. Debido a esto la recopilación de datos demandaron especial cuidado para evitar una interpretación errónea de los mismos, tratando de descartar datos sedimentológicos de los estructurales y tectónicos; a pesar de la depuración realizada continúa una persistencia de dispersión en la información lo que requiere una representación de estos datos en las secciones a realizar para su validación. Las corridas que dieron origen a los registros Dipmeter utilizados datan de la época en la que cada uno de los pozos fue perforado, el más antiguo en 2000. Dichas corridas fueron realizadas por Reeves.

5.2 CURVA DE POTENCIAL ESPONTANEO (SP):

La curva de potencial espontáneo o SP ("Spontaneous-Potential") representa la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo fijo en la superficie y otro móvil dentro del pozo, medida en mv (milivolts). La escala de SP no tiene un valor cero absoluto; apenas se registran los cambios de potencial dentro del lodo al pasar la herramienta de registro frente a diferentes capas. El registro de SP puede aplicarse para:

- Localizar los contactos entre capas y
- Determinar la salinidad del agua de formación correlacionarlos con los otros registros
- Estimar el espesor de las capas
- Detectar capas permeables
- Evaluar la arcillosidad de las capas

5.3 REGISTRO DE GAMMA RAY (GR)

La curva de rayos gamma o GR ("Gamma-Ray") representa la radioactividad natural de las formaciones y es presentada en unidades API ("American-

Petroleum-Institute"); cada unidad API es definida como 1/200 de la respuesta generada por un calibrador patrón constituido por una formación artificial que contiene cantidades bien definidas de uranio, torio y potasio, mantenida por el API en Houston, Texas, USA. Generalmente, la curva de GR es presentada en la pista 1, junto a las curvas de SP y de calibrador, con escalas de 0 a 100 ó de 0 a 150 API. Al igual que la curva de SP, la de GR tiene su escala definida de manera tal que ambas curvas indican zonas permeables cuando están próximas del extremo inferior de la pista, y ambas indican lutitas o "shales" cuando están próximas del extremo superior de la pista (con el encabezado a la izquierda del observador). Este registro es muy útil para identificar zonas permeables debido a que los elemento radioactivos mencionados tienden a concentrarse en las lutitas o "shales" (impermeables), siendo muy poco frecuente encontrarlos en areniscas o carbonatos (permeables). El registro de GR puede aplicarse para:

- Determinar la arcillosidad de las capas
- Evaluar minerales radioactivos
- Definir los minerales radioactivos
- correlación con registros a pozo revestido
- Correlación pozo a pozo

5.4 REGISTRO DE DENSIDAD

Registros de densidad miden la densidad de los minerales así como los fluidos de poros de la roca. La técnica usa rayos gamma de colimados de mediana energía y dispersión Compton el cual es una función del número de electrones contenidos por los minerales. La profundidad de penetración es muy superficial (menos de 10 cm) pero la resolución de las capas es buena, 50 cm a un metro; una cuarcita limpia tendrá una densidad de 2,65 g/cm3 pero una arenisca saturada de agua porosa tiene sólo 2,49 g/cm3. Estos registros son consecuentemente usados para determinar la porosidad e indirectamente

también la densidad de hidrocarbono, Materia orgánica en lutitas normalmente decrece la densidad de tal manera que la roca de fuente de crudos y un alto contenido de ceniza en capas de carbón pueden ser determinadas de esta forma. Este es también un método útil para asistir en identificar la litología y mineralogía cuando es usada en combinación con un registro de neutrón. El carbón por ejemplo tiene una baja densidad (1,2 a 1,8 g/cm3).

5.5 PLIEGUES

Los pliegues son la mejor manifestación de deformación dúctil en las rocas y pueden ser consecuencia de una deformación primaria o consecuencia de deformación tectónica la orogénesis. Los pliegues primarios se desarrollan durante la formación de las rocas, mientras que los pliegues tectónicos se forman en respuesta al esfuerzo asociado con el movimiento de las placas y la formación de cadenas montañosas (Marshak & Mitra, 1988).

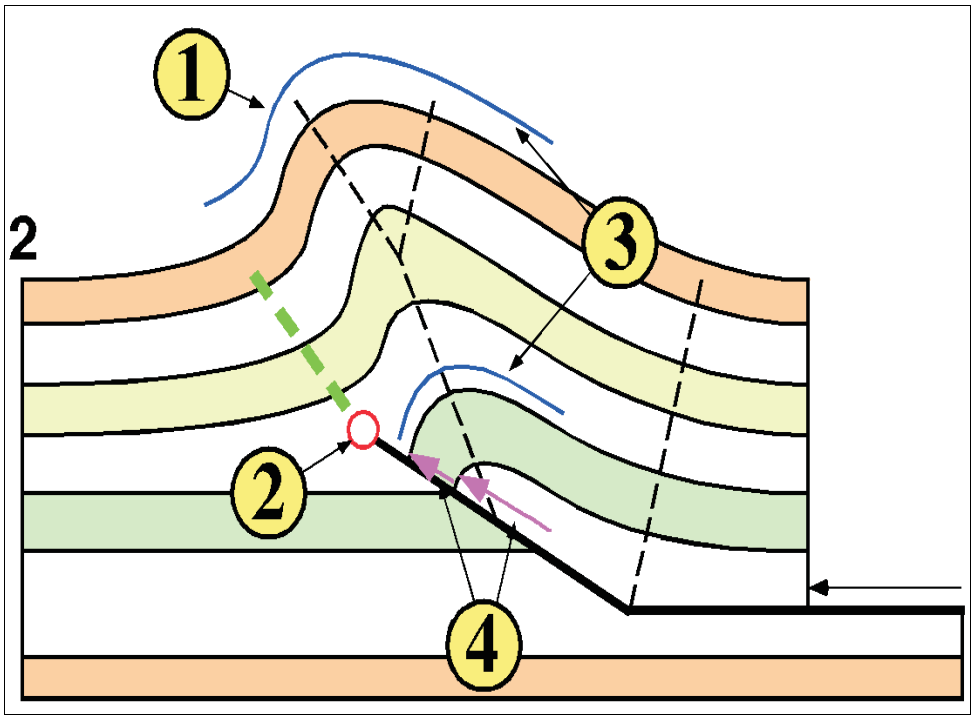
Los pliegues se pueden describir tanto geométricamente como genéticamente, partiendo del hecho de que la descripción geométrica se hace con base en la observación y la descripción cuidadosa y detallada de las estructuras en campo o en laboratorio, mientras que la descripción genética es puramente interpretativa y va de la mano con el mecanismo de plegamiento.

5.5.1 Fault-propagation Folds

Estos pliegues son formados gracias al movimiento o desplazamiento que causan las fallas, generalmente son asimétricos con flancos delanteros con mayor buzamiento que los flancos traseros. Los pliegues por propagación de fallas muestran un amplia gama de geometrías, varias características son comunes a la mayoría de las estructuras (figura 5), entre ellos:

1. Los pliegues son asimétricos, generalmente con flancos anteriores de mayor ángulo de buzamiento y más estrechos que sus flancos posteriores.
2. Sinclinales se fijan a los extremos de las fallas.
3. Pliegues apretados con la profundidad.
4. Deslizamiento sobre la falla disminuye hacia la superficie, finaliza dentro del pliegue.

Figura 5. Características comunes de los pligues tipo Fold porpagation Folds



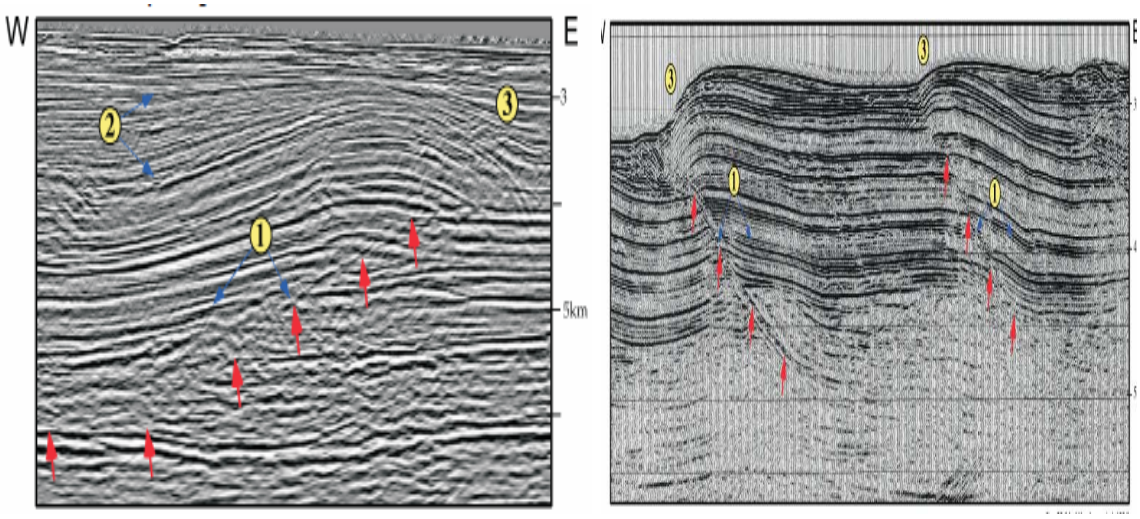
Fuente: Shaw, J.H et. al.,200

5.5.2 Shear Fault bend Folds

Rampa con formas muy distintivas que reflejan un componente importante de flexión y deslizamiento en la deformación, el estilo estructural suele mostrar largos flancos traseros con menor buzamiento que la rampa de falla, en contraste con fault-bend folding. El estilo estructural característico de estos pliegues, producidos por cizalla es tener flancos posteriores con bajo buzamiento, la rampa de falla:

1. Si una sección estratigráfica se deposita sobre el flanco posterior durante el crecimiento del pliegue, normalmente muestra evidencia de: “rotación del limbo.”
2. Estas rampas comúnmente muestran flanco frontales
3. Los flancos frontales son muy apretados en relación con sus largos flancos posteriores.

Figura 6. Características comunes de los pligues tipo Shear Fault Bend Folds



Fuente: Shaw, J.H et. al.,

6 METODOLOGIA

6.1 INTERPRETACION DE REGISTRO

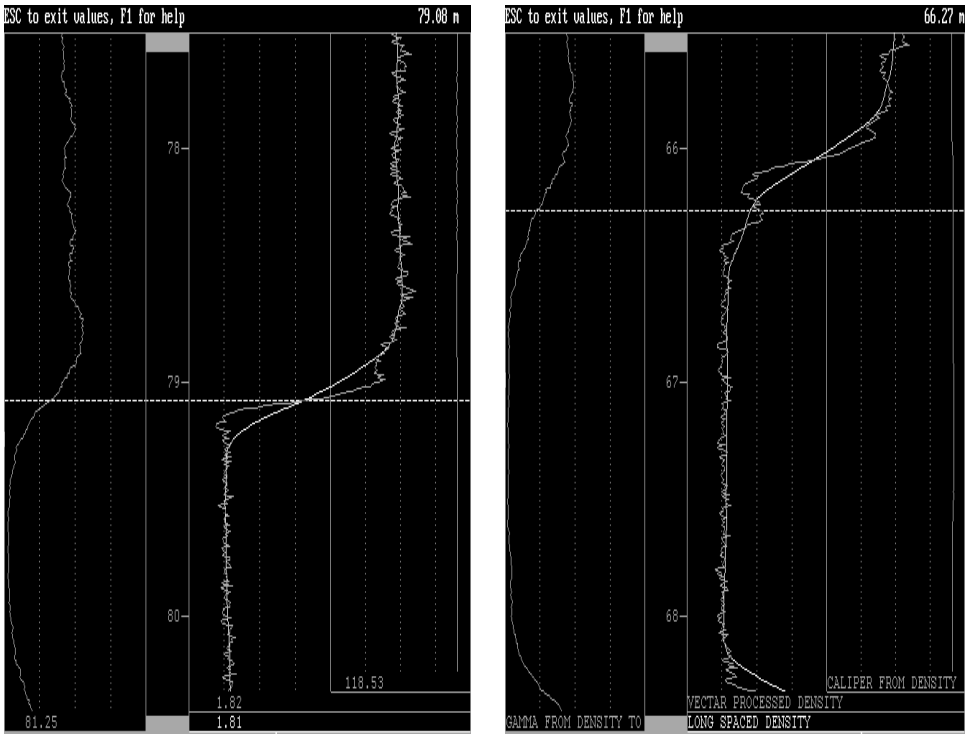
Para la correlación de los mantos presentes en la zona de estudio se realizo la revisión de datos tales como descripciones de núcleos corazonados, revisión de registros de Caliper, Gamma Ray, Densidad, y Dipmeter; a estos últimos se realizo la depuración de datos para una mejor interpretación. Los pozos a los cuales se les hizo este tratamiento de datos de buzamiento y dirección de buzamiento a partir de datos Dipmeter se encuentran geográficamente incluidos dentro de la licencia de la compañía y pertenecen a un campo en particular, las tablas producto de esta depuración tiene consignadas la siguiente información: sección, pozo, profundidad (m), azimuth y buzamiento (Anexo 1)

6.1.1 Identificación de Mantos de Carbón a Partir de Registros de Densidad y Gamma Ray

Los mantos de carbón en los registros se advierten claramente donde se presenta una fuerte disminución en los valores de la radiación Gamma y en la curva de densidad. En algunos registros se observa una marcada tendencia al aumento de la resistividad, pero no es constante en algunas ocasiones. Cuando el pozo presenta buenas condiciones en las paredes la curva que mejor define los límites de los mantos es la densidad. Las condiciones de las paredes se chequean observando la curva del Caliper; en general los pozos corazonados en los programas de perforación más reciente presentan mayor estabilidad en las paredes de los pozos (Figura 7). Los derrumbes de la pared en la zona de interfase carbón-estéril hacen inexacta la lectura en la curva de densidad, por tanto se debe recurrir al gamma, donde ocurren los cambios de valores. Cuando la

pared del pozo es estable la interfase se determina donde la curva de densidad alcance el valor de 1.8 gr/cc.

Figura 7. Curvas de densidad que se interceptan a) en 1.8 gr/cc b) curva sinuosa donde se marcaria la intercepción y el inicio del manto.

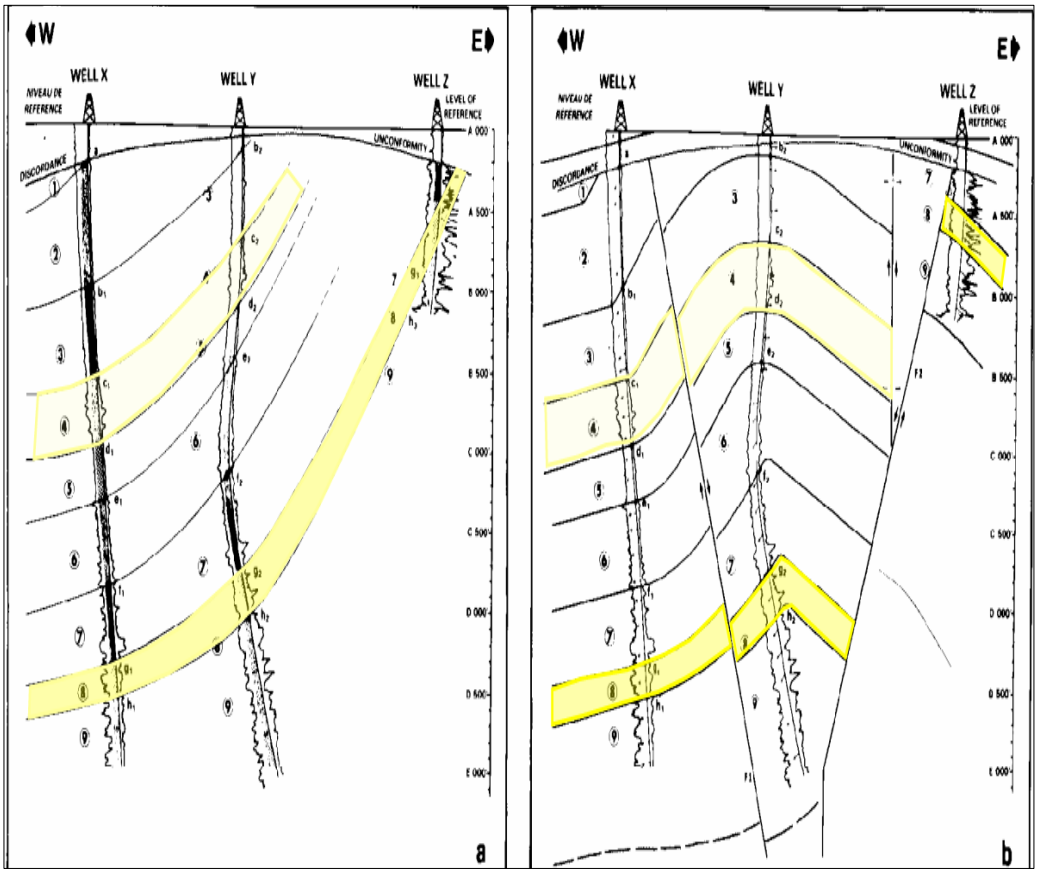


6.1.2 Interpretación de Registros Dipmeter

Es un registro geofísico que proporciona la información estructural del área donde sea perforado el pozo, los datos suministrados son ángulos de inclinación de las capas, dirección de esta inclinación, cambios bruscos de inclinación y dirección de las mismas en zonas de falla, brechamiento y en secuencias arenosas. La importancia del registro Dipmeter en áreas complejas tectónicamente es muy importante debido a que mejora la interpretación estructural en éstas; la Figura 8b muestra una excelente

correlación estratigráfica con datum en el nivel utilizando los datos de dipmeter los cuales mejoran la interpretación del corte estructural (Serra 1986, en Rubiano, 2009).

Figura 8. a) correlación entre pozos, b) correlacion entre pozos después de introducir datos Dipmeter .



Fuente: Serra 1986, en Rubiano, 2009

El procedimiento utilizado para la interpretación y manipulación de datos Dipmeter fue el siguiente propuesto por el grupo de geólogos de exploración, geólogos estructurales y geólogos de modelamiento en la mina Cerrejón:

- Seleccionar el o los pozos a interpretar. (la metodología utilizada para el análisis de datos Dipmeter en este trabajo es la metodología propuesta por el Dr E. R. Ross Crain)

- De la carpeta del pozo se extraen, el registro dipmeter, el density.

- Extender los registros de tal manera que coincidan las profundidades de los unos con los otros.

- El registro temperature se utiliza para detectar las zonas en las cuales hay cambios bruscos de temperatura ya que ello indica flujo de fluidos, lo que se puede asociar a fenómenos estructurales.

- El registro density sirve como apoyo para la identificación de mantos delgados que no son claros en el registro dipmeter y también para definir la litología, con la ayuda del registro gamma from density localizado al lado izquierdo del registro density.

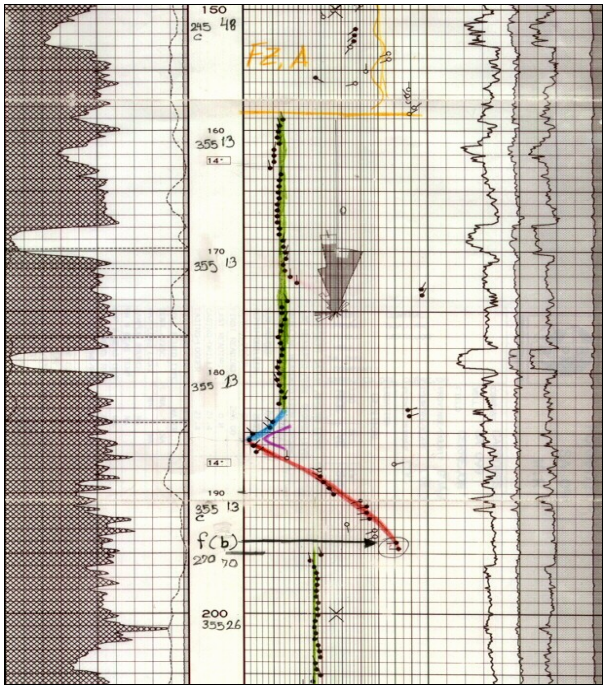
- En el registro dipmeter se marcan con lápiz de color verde las zonas que muestren y representen el buzamiento estructural de la secuencia sedimentaria, estas líneas siempre son rectas; con lápiz de color amarillo las zonas anómalas o caóticas, es decir, las zonas en las cuales la distribución de los buzamientos y/o direcciones de buzamiento sean erráticas y no se acomoden a ningún patrón; en color rojo las zonas en las cuales los buzamientos aumenten regularmente con la profundidad; en color azul las zonas en las cuales los buzamientos disminuyan regularmente con la profundidad y en color violeta las zonas con pliegues (Crain, 1992). (figura 9)

- Tomar los datos de dirección de buzamiento y buzamiento sobre el registro impreso del Dipmeter, para esto se utilizó el criterio geológico del autor para obtener los datos promedios más representativos del pozo teniendo en cuenta que esta herramienta es muy sensible y toma datos no solo de buzamiento o

fracturas sino también otras características como estructuras sedimentarias (estratificación plana, cruzada etc) las cuales pueden generar ruido en la interpretación, para esta depuración en zonas anómalas se recurrió a la descripción de los pozos y fotos de éstos.

- Seguido de esto se marcan los rasgos estructurales identificables, tales como fallas o pliegues y en la medida de lo posible obtener el dato de dicha estructura.

Figura 9. Interpretación datos Dipmeter;



Fuente: metodología propuesta por Crain, 1992.

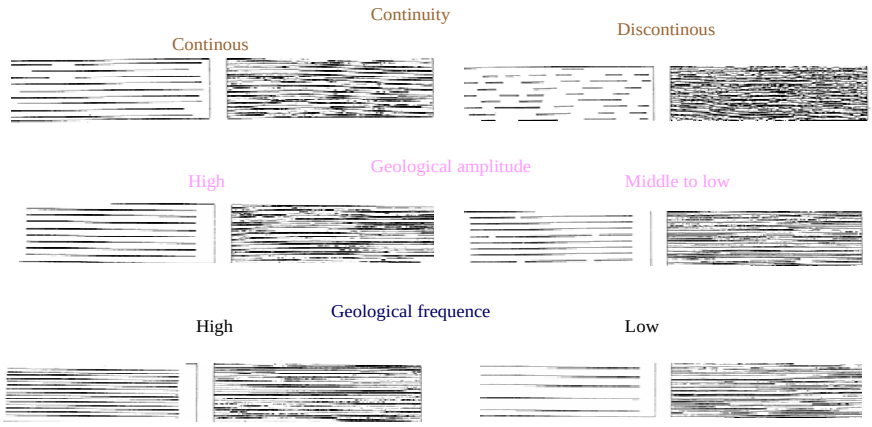
- Los datos se tomaron con un intervalo de 10 metros; en el caso de que dentro del intervalo se encuentre un subintervalo con aptitud diferente, se debe tomar el dato para la base interpretativa.

- En el registro se escriben primero los datos de la dirección de buzamiento que se da de manera azimutal y posteriormente los datos de la cantidad de buzamiento. Además se debe anotar la confiabilidad del dato; se anota A cuando es un dato confiable, B cuando esta es de medio o bajo rango, y C cuando el dato aparte de ser poco confiable se le considera anómalo dentro de la secuencia (Anexo 1).

6.2 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS

La interpretación de los registros sísmicos se llevó a cabo con ayuda del programa de interpretación "Petrel, 2007"; las líneas sísmicas utilizadas para este trabajo son la línea de Buzamiento PERIJA 89 CV-1989-1885 y la línea de rumbo PERIJA CV-1989-1100 las cuales fueron elegidas por ser las que brindan mayor información del área de interés (Figura 11).

Figura 10 Determinación de continuidad, amplitud, y frecuencia de las reflexiones sísmicas



Fuente**:** Tomado de Sangree y Widmier (1977).

La identificación de secuencias sísmicas y la interpretación de facies sísmicas se realizo a partir de las terminaciones de las reflexiones genéticamente relacionados limitados por inconformidades o sus conformidades relativas. Para el análisis de facies sísmicas se toman en cuenta criterios como amplitud de las reflexiones, continuidad de las reflexiones, frecuencia de las reflexiones (Figura 11) y la forma externa dominante en la secuencia.

En síntesis para la interpretación sísmica se siguieron los siguientes pasos:

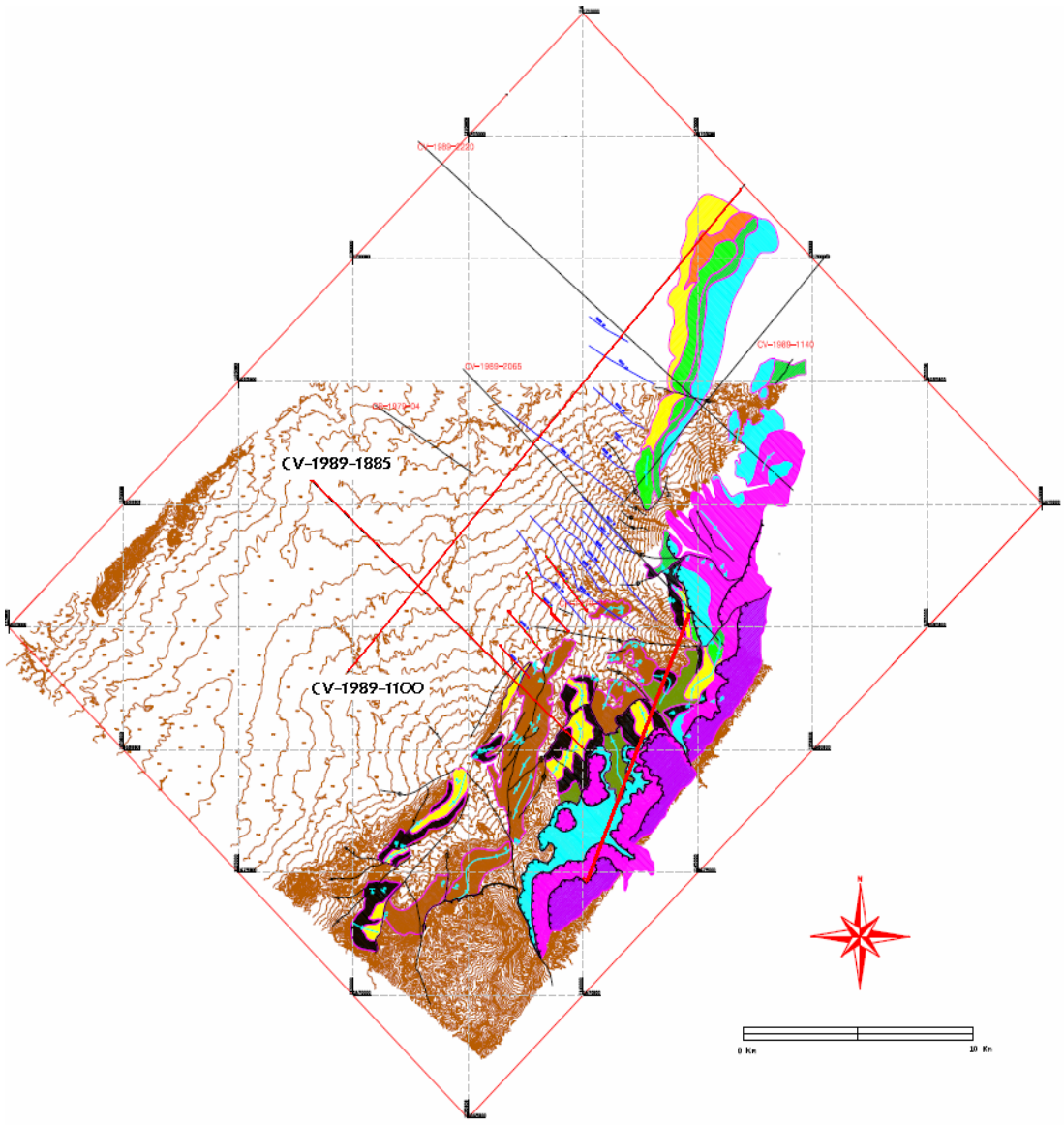
1. Inventario de las líneas sísmicas disponibles en medio magnético.
2. Carga de la información de las líneas sísmicas disponibles del área de estudio en el sistema Petrel, 2007.
3. Selección de las líneas sísmicas a interpretar (en medio magnético), se interpretaron dos líneas sísmicas (de Rumbo y Buzamiento).
4. Identificación y marcación de horizontes.
5. Identificación y marcación de Fallas.
6. Correlación e integración de la información.

6.3 ELABORACION DE SECCIONES ESTRUCTURALES

Para llevar a cabo esta interpretación se tuvo en cuenta la información de registros de pozos, fotos y descripciones de núcleos corazonados. La interpretación de cada una de las secciones se divide en dos partes: La primera incluye la revisión de descripciones de cada uno de los pozos pertenecientes a estas secciones, comportamientos de los espesores, relacionándolo junto con el análisis Dipmeter asociado.

La segunda parte corresponde a la descripción e identificación de los diferentes estilos estructurales encontrados y rasgos relevantes dentro de cada sección. Para cada una de las secciones se construyó en el sentido del buzamiento general mostrado en los Dipmeter, obteniéndose de esta forma rasgos estructurales en las trayectorias de los pozos que permitieran una posterior interpretación y correlación de los mantos de carbón

Figura 11. Mapa geológico simplificado del área de estudio, note la localización del Corte A-A' y Líneas símicas CV_1989-1885, CV-1989-1100 utilizadas en el estudio. Para convenciones véase anexo 2



Logrando así la correlación entre secciones (tres secciones) mostradas en la Figura 12, las cuales contienen un total de 34 pozos plasmando la disposición de los estratos y mantos de carbón con el fin de evaluar la posible continuidad lateral de los mantos de carbón en el área.

Cabe resaltar que éstos pozos fueron perforados por el Cerrejón dentro de su campaña de exploración hacia el 2000; en la cual perforaron pozos corazonados y abiertos; los cuales fueron registrados con herramientas geofísicas estándar con muestreo discreto cada centímetro (rayos gamma, densidad, resistividad), toda la información existente tal como; descripciones litológicas, fotografías de pozos corazonados, registros Dipmeter y registros de Densidad de cada pozo fue previamente revisada.

Para evitar inconvenientes o ruidos generados en la interpretación se trabajó con datos y valores confiables los cuales se almacenaron en bases de datos (Anexo 1) para llevar un buen control de la información; la correlación e integración de los datos seleccionados como datos Dipmeter pertenecientes a cada uno de los pozos, tuvo un amarre o ajuste con las descripciones de pozos corazonados y registros de roca que permitieron además de eliminar datos en el Dipmeter proporcionados por estructuras sedimentarias y no por el buzamiento real de los mantos, correlacionar los mantos de carbón según sus propiedades litológicas.

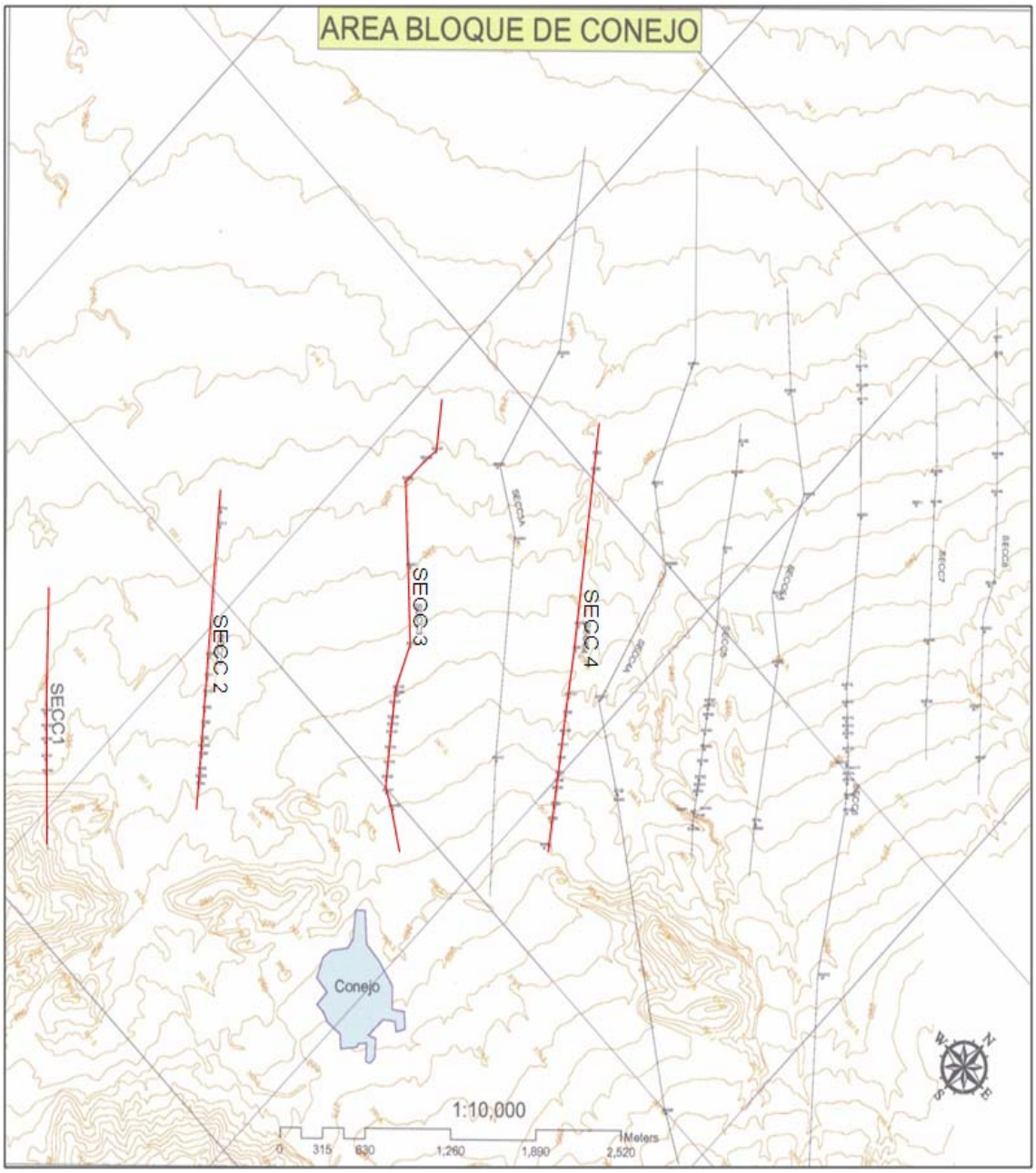


Figura 12 Ubicación de Pozos y Secciones Interpretadas (Sección 1, sección 3 y Sección 4).

7. RESULTADOS

7.1 CORTE GEOLÓGICO SIERRA DE PERIJÁ

La Sierra de Perijá expone rocas antiguas como esquistos grafitosos, filitas y cuarcitas del Cambro-Ordoviciano. La mayor parte del área está cubierta por rocas Jurásicas y Devoniano-Carbonianas; de la primeras, en la parte norte del área se encuentra una gruesa sección, desde el borde occidental y hacia el oriente de la sierra están expuestas, primero, rocas del Terciario Inferior y luego, rocas del Cretáceo.

Según Ujueta, et al., 1990 el esquema básico estructural del flanco occidental de la parte más septentrional de la Sierra de Perijá comparado en forma amplia con las características estructurales presentes desde la Cuenca de Maracaibo hasta la Sierra Nevada de Santa Marta exponen ciertas fracturas principales presentes en la sierra las cuales han sido agrupadas en las siguientes direcciones preferenciales:

- Dirección estructural NE (predominantes en el corte geológico)
- Dirección Estructural NNO-SSE
- Dirección Estructural NO-SE
- Dirección estructural NO

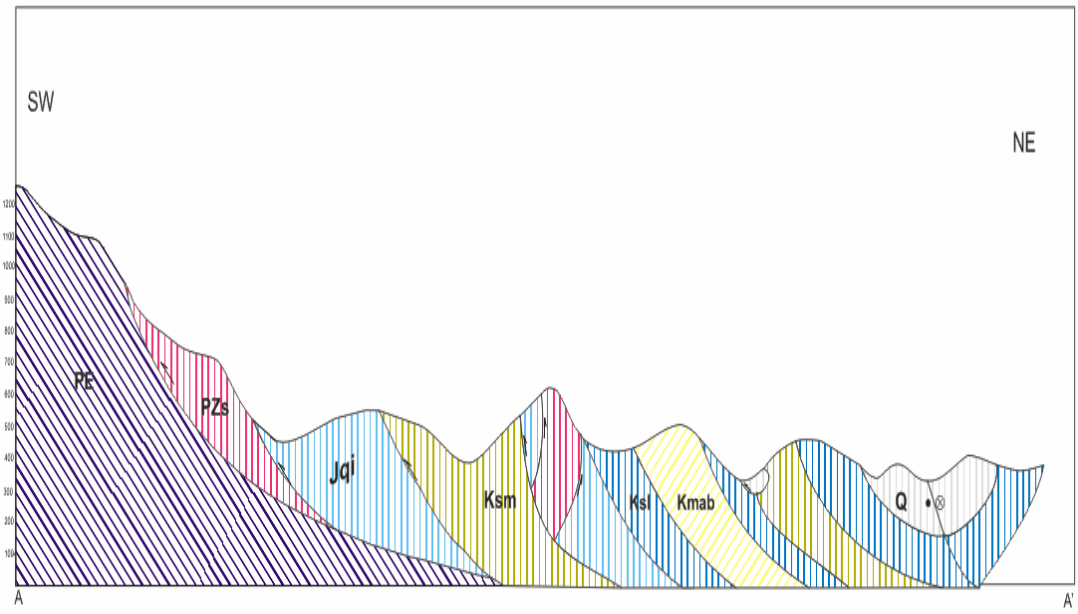
Las rocas presentes en el área de estudio fluctúan en edad entre el Cambro-Ordovicico y el Terciario Inferior e incluyen sedimentitas, rocas volcánicas explosivas, rocas metamórficas y rocas intrusivas. Mediante discordancia angular, reposa sobre el Cambro-Ordovicico el Devoniano, que está representado por orcas clásticas finas calcáreas en el techo. Discordantemente sobre el Devoniano

reposan rocas sedimentarias de facies marinas del Carboniano representadas por un conjunto arenoso inferior y un conjunto calcáreo superior.
El Pérmico está representado en su mitad inferior por areniscas, shales y areniscas calcáreas y en la mitad superior por margas y calizas; discordantemente sobre la unidad anterior se depositó un conjunto de gran espesor de rocas jurásicas, entre las cuales se reconocen rocas asociadas con vulcanismo conocidas como Formación La Quinta en Venezuela. Mediante discordancia en el techo de la Quinta podría aparecer la Formación Río Negro; sin embargo, hasta ahora no se ha comprobado su existencia. Se reconocen luego el Grupo Cogollo, la Formación La Luna y La Formación Molino (Formación Colón en los departamentos de Santander y Norte de Santander y en Venezuela).

En el área de estudio el Cretáceo es discordante sobre sedimentos paleozoicos. Finalmente, concordantes con los sedimentos del Terciario Inferior representados por la Formación Hato Nuevo y las Formaciones Manantial, Cerrejón y Aguas Nuevas de edad Eoceno. En la figura 13 se observa claramente como rocas sedimentarias Paleozoicas cabalgan sobre rocas metamórficas del Precámbrico y las brechas volcánicas del Jurásico de la Formación La Quinta se encuentran en contacto fallado cabalgante con rocas sedimentarias Paleozoicas y del Cretáceo Superior de la Formación Molino.

Hacia el cerro de las Bestias al NE, las areniscas y las limolitas arcósicas rojas, los conglomerados marrones y las calizas grises micríticas del Paleozoico están plegadas y falladas con dirección NE y junto con las lavas máficas rojas y las brechas volcánicas del Jurásico de la Formación La Quinta que a su vez cabalgan sobre las calizas limosas negras con chert de la formación Molino y areniscas intercaladas del Cretáceo superior de la formación La Luna, las cuales están afectadas por fallas de rumbo este-oeste.

Figura 13 Corte geológico A-A´ transversal, escala 1:20.000 (Mapa geológico Figura 9, anexo 2).



STANDARD NOMENLATURE	MAP SYMBOL	TYPICAL DESCRIPTION
ALLUVIAL FAN	Q	SILTY, SANDY AND PEBBLY, GRAVEL CONGLOMERATE PLEISTOCENE – PLIOCENE
MOLINO FM	Ksm	GREY TO BROWN SLIGHTLY CALCAREOUS SHALE AND LIMESTONE WHIE TO GREY CALCAREOUS SILTSTONE UPPER CRETACEOUS
AGUAS BLANCAS FM	Kmab	BROWNISH GREY SPHARITEC LIMESSTONE FOSSILIFEROUS SANDY LIMESTONE MIDDLE CRETACEOUS
LA QUINTA FM	Jqi	RED AND BLACK MAFIC LAVAS VOLCANIC BRECCIAS, TUFFACEUS SANDSTONE JURASSIC
SEDIMENTARY PALEOZOIC	Pzs	RED SANDSTONE AND SILSTONE WITH OCC. BROWNISH ORANGE CONGLOMERATES, LIMESTONE PERMIAN
LOS MANGOS GRANULITE	PE	AMPHIBOLITES / GRANULITES PRECAMBRIAN

7.2 DESCRIPCION DE PERFILES SISMICOS

A partir de la interpretación sísmica se pueden identificar varios estilos estructurales para diferentes edades en estas provincias, pudiéndose separar de acuerdo con las discordancias regionales presentes en la sísmica. La correlación sismo-estratigráfica de los horizontes de reflexión, se lleva a cabo con base en datos de modelamiento geosísmico. Este tipo de correlación se considera el más exacto. Desafortunadamente, para este trabajo no se tuvo la oportunidad de hacer

esta clase de trabajo, por no contar, con al menos, algunos datos de pozos profundos para realizar el amarre de la sísmica a un pozo.

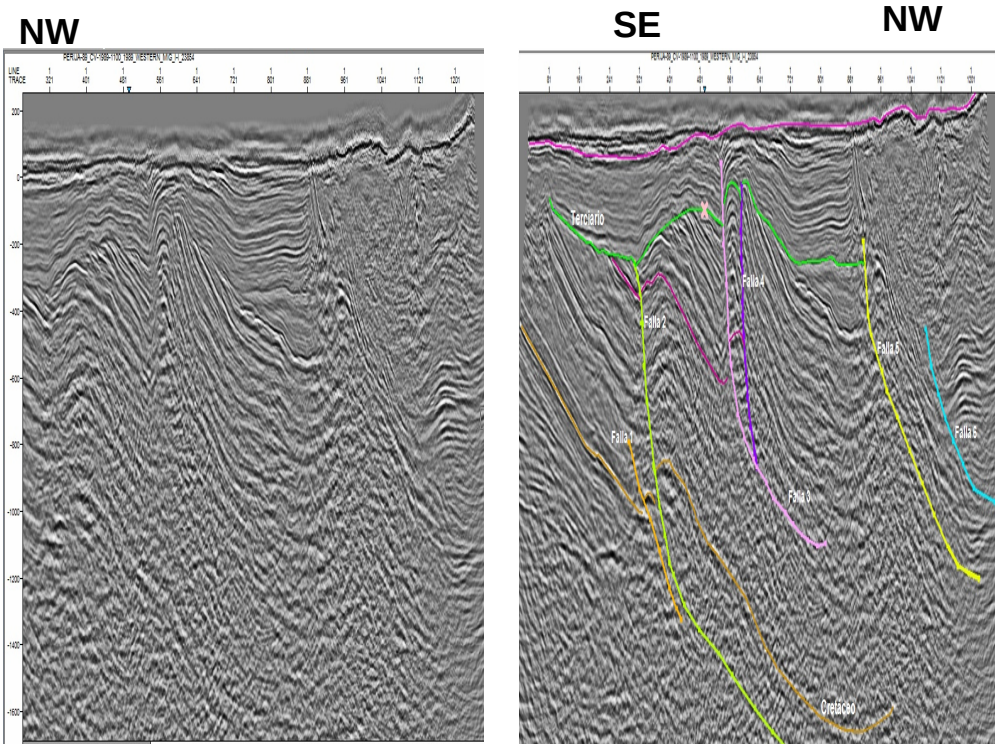
La correlación de horizontes, se hizo con base en el mapa geológico, comparando los contactos de distribución de los sedimentos del Cretácico y Terciario basándose en las evidencias a priori sobre la forma estructural del área investigada.

A pesar de las complicaciones antes mencionadas, se pudieron corregir algunos paquetes de ondas sísmicas. Se debe advertir que la correlación en este caso no es de fase sino de grupo, es decir, de acuerdo al grupo de reflexión (paquete).

7.2.1 línea sísmica cv-1989-1885

Esta línea sísmica de buzamiento registra 6 fallas, comportándose como un sistema de Fallas Inversas con buzamiento al SE, concordante con el estilo estructural dominante presente en la zona, Fallas El Molino, Masterban, Villanueva y Capuchino, las cuales cruzan toda el área de estudio responsables del levantamiento de las rocas aflorantes mas antiguas en la región (Ujueta, 1990). Básicamente se pueden identificar tres etapas de deformación de edad Cretácica, Terciaria y una deformación más reciente.

Figura 14. LINEA SISMICA CV-1989-1885 Izquierda sin interpretar, en la cual se identifican las estructuras. Derecha sección Interpretada.



Fuente ANH, por intermedio del Grupo de Investigación en hidrocarburos UIS

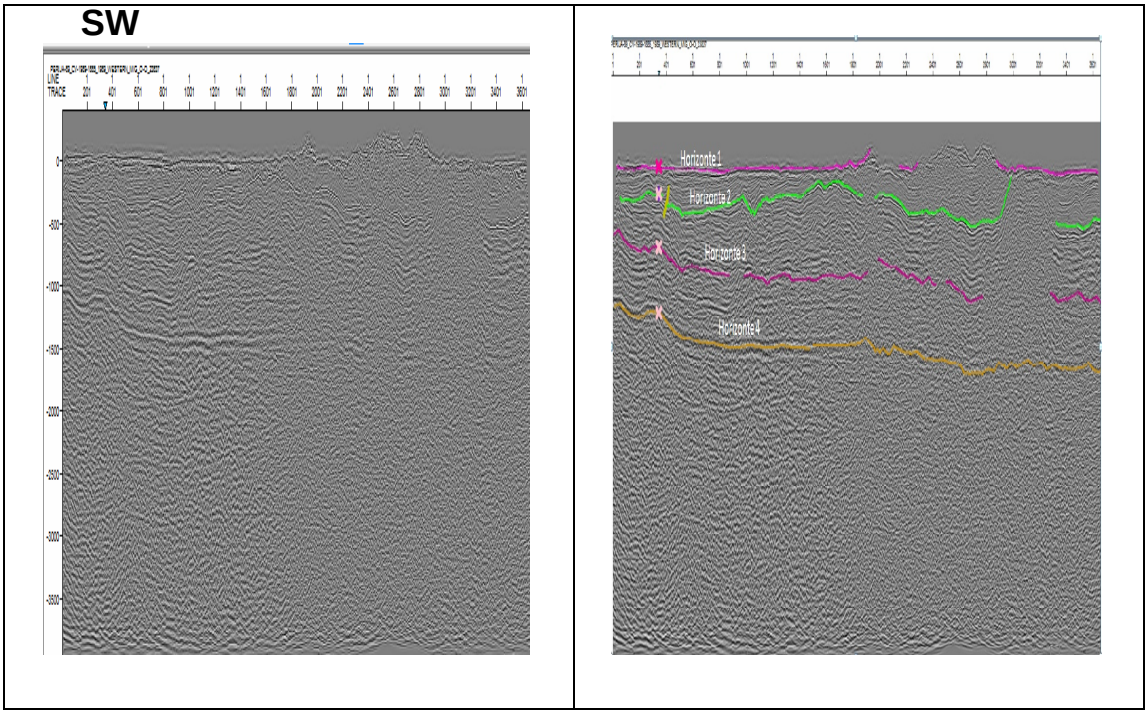
La deformación más reciente presenta retrocabalgamientos (Falla 4); geometrías de inversión tectónica se han observado en cuencas como rifts o intracratónicas y en cordilleras de plegamiento donde las cuencas pueden estar suave o fuertemente invertidas formando estos retrocabalgamientos en el bloque superior de la falla invertida. La siguiente deformación es representada por fallas más largas, algunas aflorantes (falla 3), éstas presentan una expresión geométrica Lístrica (disminuyen el manteo con la profundidad) con una rampa de falla que se propaga hacia arriba desde un despegue adquiriendo mayor buzamiento (Fallas 2,3 y 5). Fallas más antiguas no afloran, tienen geometrías más rectas y modelan los pliegues más viejos (falla 1).

Las Fallas 1,2,5 y 6 modelan pliegues de tipo “Fault-propagation folds” antiformes con pliegues asimétricos (son subparalelas unas a otras). El flanco W presenta un mayor acortamiento, por su parte el flanco E de estos pliegues son más largos, buzan al SE y su inclinación es mayor. La Falla 3 posiblemente modela un pliegue tipo “Shear fault-bend folds” los cuales tienen un flanco con menor inclinación el cual se ve afectado por la falla de retrocabalgamiento 4 la cual podría estar activa.

7.2.2 línea sísmica cv-1989-1100

Como se mencionó anteriormente la correlación en este caso no es de fase sino de grupo, es decir, de acuerdo al grupo de reflexión (paquetes). El paquete número uno está relacionado con el horizonte condicional de reflexión K, base de los sedimentos cretácicos. Los siguientes paquetes de reflexión, los cuales se pudieron seguir en la sección, están relacionados, también con horizontes pertenecientes al Cretáceo, posiblemente, se trata de los horizontes pertenecientes a la Formación Molino (del Cretáceo Superior) la cual se encuentra en contacto discordante con los sedimentos del Terciario. (Figura 14). Esta Línea de rumbo (Figura 15) muestra claramente reflectores truncados por la discordancia (horizonte 2); la cual identifica el límite entre sedimentos de edad Cretácea de los de edad Terciaria.

Figura 15. LINEA SISMICA CV-1989-1100. Izquierda sin interpretar. Derecha sección Interpretada.



Fuente ANH, por intermedio del Grupo de Investigación en hidrocarburos UIS.

7.3 SECCIONES

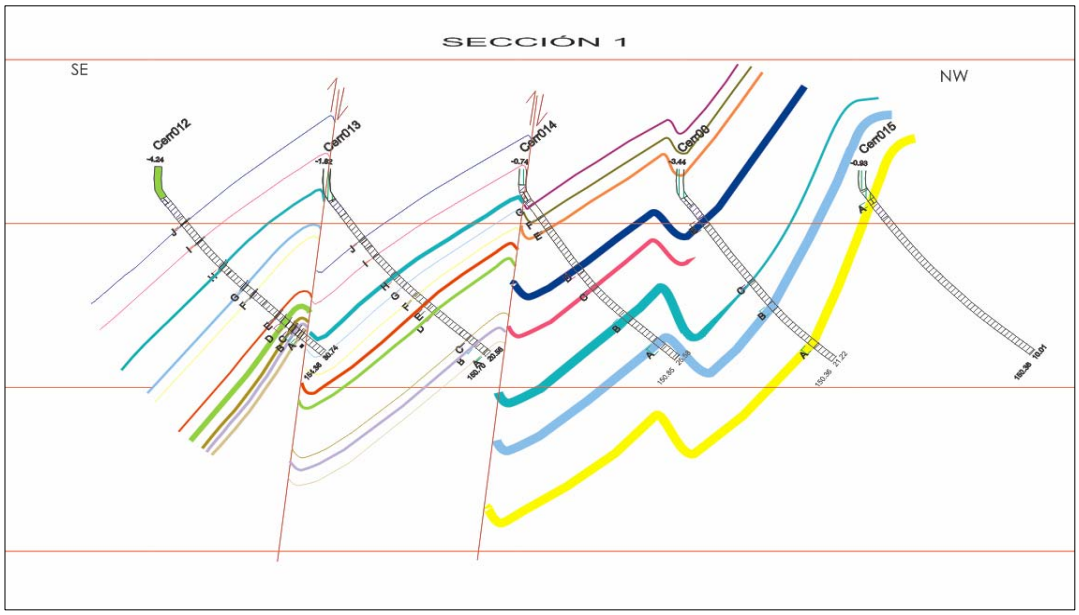
En este capítulo se presenta la interpretación estructural de las tres secciones elaboradas en este informe (Figura 12), incluyendo la correlación de mantos de carbón presentes en el área de estudio.

7.3.1 Sección 1

En esta sección se interpretaron 5 pozos los cuales se incluyeron en la correlación. Los pozos pertenecientes a esta sección son: CERR012, CERR013, CERR014 Y CERR015 (Figura 16). El Pozo Cerr0012 es aquel cuya trayectoria está ubicado hacia la parte más SE de la sección; los datos Dipmeter asociados a este pozo presentan poca dispersión de los mismos durante todo el pozo pero también se pueden identificar datos anómalos registrados por la herramienta y que

fueron interpretados como planos de estratificación, dichos datos indican un aumento en la densidad de fracturas en la zona perforada, lo cual facilita el reconocimiento del trazo de falla la cual corta este pozo, pues los datos fueron verificados con las descripciones y fotos del pozo para descartar la presencia de estructuras sedimentarias. Dentro de las estructuras identificadas en la sección se destacan dos fallas, que marcan la interrupción en la continuidad de los mantos de carbón. Se identifica que estas fallas son subparalelas y buzan al SE, el comportamiento de estas fallas es inverso y al parecer presentan un alto grado de buzamiento. Para esta primera sección es posibles que los datos medidos están asociados a sólo un flanco de la estructura (la cual es un pliegue) que presenta cierta vergencia al NW y la tendencia general del buzamiento en los pozos está alrededor de 60°-75°. Todo lo anterior concordante con los resultados mostrados en las tendencias regionales del área de estudio. La correlación de mantos de carbón en la Figura 16 muestra un paquete inicial de 10 mantos en el pozo Cerr012 (de base a techo A-J) los cuales han sido levantados por la falla inversa interrumpiendo su continuidad. Este paquete de carbón se puede apreciar en el pozo Cerr013, (para la identificación y correlación de cada manto de carbón fue necesario hacer uso de registro de Densidad).

Figura 16. Correlación de los Mantos de Carbón de la Sección No 1.
Para mayor detalle ver Anexo 3



pero en los pozos Cerr014, Cerr00 y Cerr015 aparecen 5 mantos de la parte superior de este paquete y sobre ellos 3 nuevo mantos; cabe resaltar que el espesor de los mantos aumenta con la profundidad y hacia el NW de la sección. Para una mejor visualización de la secuencia carbonífera cada manto tiene un color específico que lo identifica del otro.

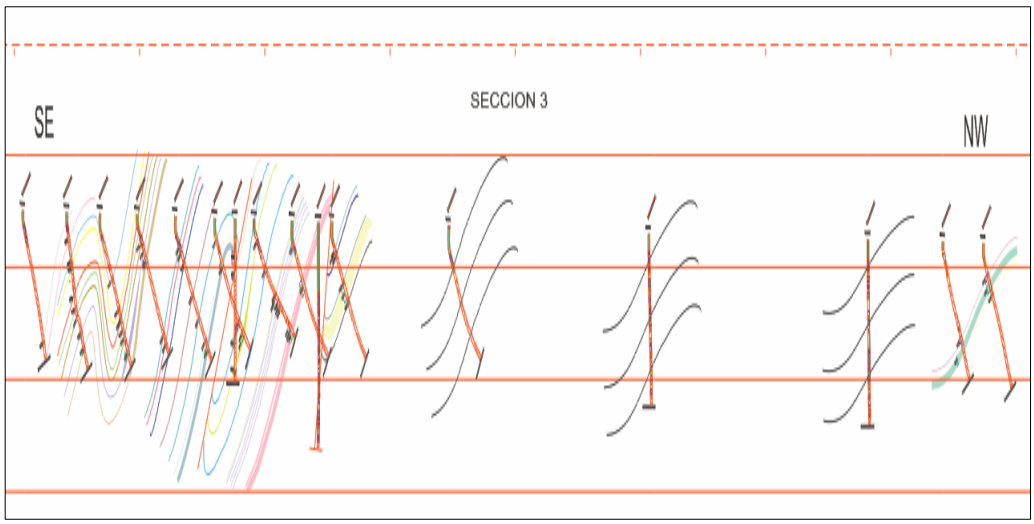
7.3.2 Sección 3

En esta sección se interpretaron 16 pozos los cuales se incluyeron en la correlación. Los pozos pertenecientes a esta sección son: CERR016, CERR017, CERR018, CERR019, CERR020, CERR021, CERR022, CERR023, CERR024, CERR025, CERR026, CERR027, CERR028, CERR029, CERR030 y CERR031 (Figura 17). En la sección No 3 se pueden identificar datos anómalos registrados por los Dipmeter indicando de nuevo un aumento en la densidad de fracturas en

la zona perforada, lo cual facilita el reconocimiento del trazo de las fallas las cuales cortan los pozos CERR018, CERR066, CERR020 y CERR021, como se mencionó anteriormente estos datos fueron verificados con las descripciones y fotos del pozo para descartar la presencia de estructuras sedimentarias.

Dentro de las estructuras identificadas en la sección de nuevo se destacan dos fallas, que marcan la interrupción en la continuidad de los mantos de carbón; estas fallas son subparalelas y buzan al SE, presentan un comportamiento inverso y alto grado de buzamiento. En esta sección los datos medidos muestran una estructura más compleja con capas replegadas hacia el SE de la sección a sólo un flanco de la estructura y la tendencia general del buzamiento en los pozos está alrededor de 60°-75°, pero al NW de la sección (pozos CERR027 y CERR028) los mantos de carbón presentan un buzamiento más suave entre 35 y 50 grados de buzamiento además de un comportamiento menos dúctil. La correlación de mantos de carbón en la Figura 15 muestra un paquete inicial de 9 mantos entre los pozos CERR023, CERR024, CERR025 y CERR026 (nombrados de base a techo A-H) los cuales han sido levantados por la falla inversa interrumpiendo su continuidad.

Figura 17. Correlación de los Mantos de Carbón de la Sección No 3.
Para mayor detalle ver Anexo 3

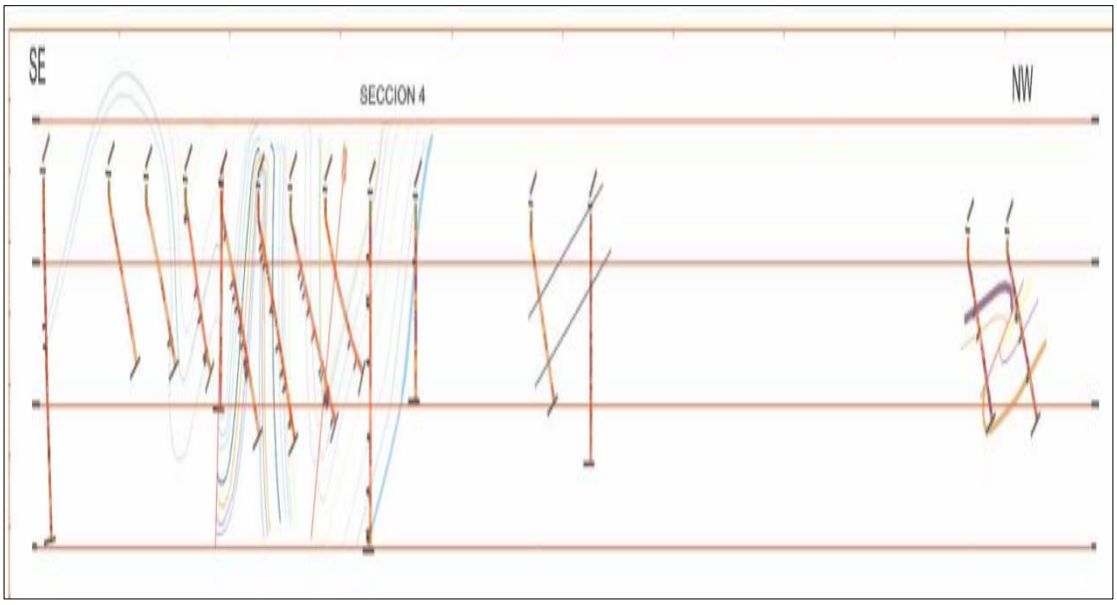


A Partir del pozo CERR022 y hacia el NW aparece un nuevo paquete de 7 mantos los cuales subyacen el primer paquete ya mencionado (para una mejor visulización de la secuencia carbonífera cada manto tiene un color específico que lo identifica del otro); los pozos CERR016 y CERR017 se destacan por la ausencia de mantos de carbón.

7.3.3 Sección 4

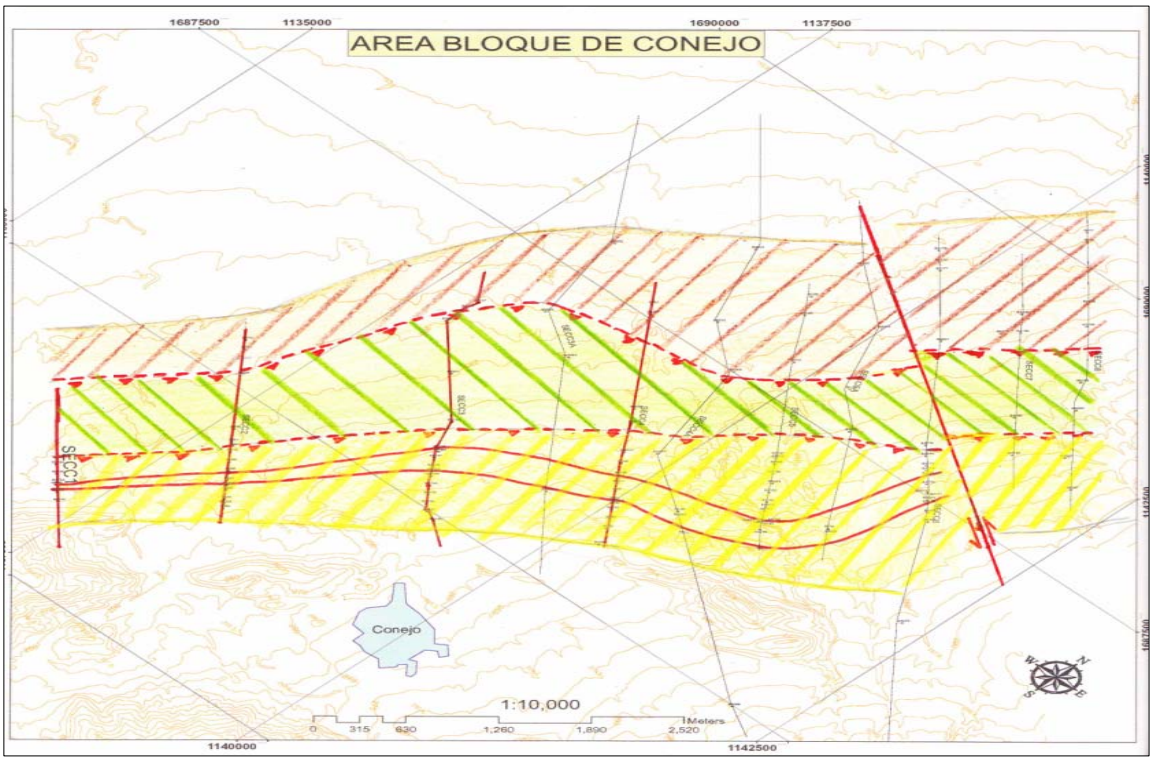
En esta sección se interpretaron 14 pozos los cuales se incluyeron en la correlación. Los pozos pertenecientes a esta sección son: CERR032, CERR03 CERR034, CERR035, CERR036, CERR037, CERR038, CERR039, CERR0CERR041, CERR042, CERR043, CERR044, y CERR045, (Figura 18). En la sección se identifica el trazo de las fallas cortando los pozos CERR036 y CERR037, las cuales interrumpen la continuidad de los mantos de carbón; estas fallas son subparalelas y buzan al SE, presentan un comportamiento inverso y alto grado de buzamiento. En esta sección los datos medidos muestran una la estructura más compleja on capas replegadas hacia el SE de la sección con tendencia general del buzamiento en los pozos está alrededor de 65°-85°, en los pozos CERR032, CERR033 los estratos están dispuestos en un buzamiento de 85° (casi verticales) los cuales se suavizan de nuevo hacia el NW de igual manera como se comportan los mantos al NW de la sección anterior (pozos CERR041, CERR042 y CERR044) los mantos de carbón presentan un buzamiento más suave entre 35 y 50 grados de buzamiento además de un comportamiento menos dúctil, también encontramos ausencia de carbón en los pozos CERR041 Y CERR046. La correlación de mantos de carbón en la Figura 18 muestra un paquete inicial de 5 mantos entre los pozos los cuales se ven replegados y fallados a lo largo de la sección. La sección 4 muestra un pliegue anticlinal asimétrico con vergencia al NW asociado a un sinclinal también asimétrico, los flancos de estas estructuras presentan un buzamiento alto debido las fallaspresentes en la zona.

Figura 18. Correlación de los Mantos de Carbón de la Sección No 4. Para mayor detalle ver Anexo 3



Gracias a la información arrojada por cada una de las secciones y a rasgos estructurales en las trayectorias de los pozos se procedió a establecer la continuidad lateral que presentan los mantos de carbón agrupando las características correspondientes como el buzamiento de los paquetes de carbón y las fallas presentes que atraviesan cada una de las secciones y dividen el área en 3 bloques fallados.

Figura 19. Bloques que conforman el área de estudio.



Estos bloques se encuentran distribuidos de SE a NW (Figura 19) de la siguiente manera:

I) Este bloque se encuentra ubicado al SE del área de estudio es la zona más cercana a la Serranía del Perijá, está conformado por mantos de carbón los cuales presentan buzamientos muy altos entre 70º y 85º acompañados de una gran deformación.

II) Bloque ubicado en el área central de nuestra zona de estudio, en este bloque predomina la ausencia de mantos de carbón; las capas en esta zona presentan un buzamiento que varía entre 60º-70º.

III) Este bloque al NW de nuestra zona, aparentemente es el más estable ya que presenta buzamientos más bajos (40º) y aunque presenta un paquete de mantos de carbón mas pequeño con respecto al primer bloque se considera el bloque de mayor interés económico, ya que su buzamiento y el espaciamiento entre los mantos hacen factible su explotación.

CONCLUSIONES

- La Correlación estructural realizada en el sector de Conejo, por medio de registros Dipmeter, interpretación de Líneas sísmicas y cortes Geológicos para identificar el comportamiento regional, deja un aporte al modelo geológico y a su vez influye en la planeación de un nuevo prospecto para desarrollo minero. Este estudio inicialmente muestra a conejo como un sector bastante próspero para la explotación minera de carbón; teniendo en cuenta que las actividades exploratorias hasta el momento no son suficientes, se puede llegar a encontrar que no toda el área de estudio sería un buen prospecto para el desarrollo minero.

- El estilo estructural observado en el desarrollo de este estudio es de fallas inversas con buzamiento SE, y vergencia NW concordante con el sistema de lineamientos mencionado por Arango (1980 en Ingeominas, 2006) a nivel regional que controlan los contornos de las serranías y los cursos de los cauces principales en la cuenca. Estas fallas están afectadas por la presencia de pliegues con un alto fracturamiento sugiriendo la influencia de una deformación frágil para la zona de estudio, resultado del plegamiento por compresión.

- Las unidades pertenecientes a la zona de estudio hacen parte de los depósitos que se acumularon en una cuenca de sedimentación Paleógena (Ujueta, 1990), que luego, por los esfuerzos compresivos que también controlaron el levantamiento de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá, ocupando las cuencas altas de los ríos Ranchería y

Cesar, producidos por la tectónica de bloques en compresión con fallamientos inversos.

- Los registros Dipmeter resultan una excelente herramienta para la identificación de rasgos estructurales y disposición de los estratos, pero debido al hecho de ser una herramienta muy sensible (porque no solo toma datos de buzamiento sino también fracturas y ciertas características sedimentarias); el análisis de estos datos debe ir acompañado de otras herramientas más confiables como son las descripciones litológicas las cuales ayudan a eliminar datos erróneos que pueden generar ruido en la interpretación.

- Los pliegues encontrados en la zona de estudio son apretados, asimétricos, moderadamente inclinados y presentan vergencia suave al NW y se encuentran asociados a sinclinales abiertos a cerrados. Estos pliegues están altamente afectados por deformación frágil la cual se hace más evidente en las secciones tres y cuatro.

- El área Conejo es principalmente, un sistema conformado de tres bloques individuales, que presentan ciertas características de SE a NW. Hacia el SE del área presenta mantos de carbón altamente deformados y fallados consecuencia de esto es el alto grado de buzamiento que presentan sus capas (70°-85°); hacia el centro del área encontramos el segundo bloque el cual presenta estratos menos inclinados con respecto al primer bloque (60°-70°de buzamiento) y menor deformación; el tercer bloque ubicado al NW del área presenta buzamientos más suaves (40°) y menor deformación con respecto a los bloques anteriores.

- El bloque que presenta mayor deformación (bloque I) aparentemente contiene mayor concentración de mantos de carbón, pero esto es producto de la deformación allí presente, por el contrario el bloque III contiene un depósito de carbón económicamente viable debido al buzamiento suave de sus capas y el espacio entre los mantos de carbón.

- Debido a la complejidad estructural del área se recomienda aumentar la perforación de pozos corazonados a profundidades mayores de 300 mts (sobre todo en el bloque III) y aumentar la interpretación de líneas sísmicas no convencionales que aporten datos claves a la interpretación

REFERENCIAS

ARANGO, F., BLANDÓN, A. Carbones y Lutitas carbonosas como rocas fuentes de hidrocarburos Terciarios en la Cuenca Cesar-Ranchería Colombia: evidencias petrológicas y geoquímicas. Unal, Medellín.

BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., PARDO, A., CHRISTIE, A., HERNÁNDEZ, G. (2004). Important Paleotectonic and chronostratigraphic considerations of the late Paleocene in the Northernmost Andes as constrained bypaleocene rocks in the Cerrejón Coal Mine, Guajira, Colombia, Reporte interno Cerrejón. 14 p.

CADENA, Andrea. (2007). Validación de un Modelo Estrucutral Alternativo por Medio de la Técnica de Balanceo de Secciones Estructurales para los Campos de la Licencia Piedemonte de BP Exploration Colombia en el Piedemonte Llanero. Universidad Industrial de Santander. Tesis de Grado.

CASE, J.E., SHAGAM, R., GIEGENGACK, R.F. (1990). Geology of the northern Andes; an overview in Dengo, G., and Case, J.E., eds., The Caribbean región Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America, vol H.

DE PORTA, J. (1974). Lexique stratigraphique: Colombie, tertiaire et quaternaire. Volume V, Fascicule 4b. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique.

E. R. (ROSS) CRAIN. (1992). Analysis Of Dipmeter Logs Part 1 - Evolution Of Dipmeter Tools, Canadian Well Logging Society Journal.

E. R. (ROSS) CRAIN. Analysis of Dipmeter Logs Part 2 - Computer Displays of Dipmeters, Chapter 27 of Crain's Petrophysical Handbook.

ECOPETROL. (1989). Estudio de la cuenca sedimentaria Cesar-Ranchería. Informe interno, 51pp.

INGEOMINAS. (2003). Mapa Geologico del Departamento De La Guajira, Memoria Explicativa**.**

INGEOMINAS-EMDUPAR. (2005): Evaluación Tectónica Y Sismológica Y Despliegue De La Red Sismológica Portátil En El Área Del Proyecto Multipropósito Los besotes.

J. DE PORTA. (1974). Lexique stratigraphique: Colombie, tertiaire et quaternaire. Volume V, Fascicule 4 b. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique.

KELLOGG, J.N. (1982). Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overriding South American plate. Tectonics 1, pp. 251-276.

LOPEZ, E.D. (2005). Evolución Tectónica de la Región Caribe de Colombia. Ingeominas.

MARSHAK, S., MITRA, G. (1988). Basic Methods of Structural Geology. Prentice hall, Upper Saddle river, New Jersey. 446pp.

MARTINEZ, Carolina. (2006). Análisis y descripción de núcleos usando asociaciones litofaciales en la mina el Cerrejón, Guajira-Colombia. Universidad Industrial de Santander. Tesis de grado.

MONTES, C., BAYONA, G., JARAMILLO, C., OJEDA, C., MOLINA, M., HERRERA, F. (2005 a). Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar-Rancheria valley: Rigid-beam pívot model. 6th International Symposium on Andean Geodynamics, ISAG, Barcelona. pp. 520-523.

PALENCIA, JULIO. (2007). Interpretación Estructural y Cinemática del Anticlinal de Tabaco en la Mina El Cerrejón, Guajira. Universidad Eafit. Tesis de Pregrado.

PINDELL, J., GEORGE, R.P., KENNAN, L., HIGGS, R., CRISTANCHO, J. (1998**).** The Colombian hydrocarbon habitat: Integrated sedimentology, geochemistry, paleogeographic evolution, geodynamics, petroleum geology, and basin analysis. Tectonic Analysis INC. –Ecopetrol, 958 p.

PINDELL, J.L., BARRETT, S.F. (1990). Geological evolution of the Caribbean region; a plate-tectonic perspective in Dengo, G., and Case, J.E., eds., The Caribbean region: Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America, vol H.

RAMOS, J. (1990). Ambientes de depósito relacionados con los parámetros de calidad de lso carbones del Cerrejón “Bloque B”. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. Tesis de Grado. 158 pp.

RUBEANO, J. (2009). Interpretación Geológica de los Datos Obtenidos a partir de lso Registros Dipmeter, Usando el Programa SCAT. Ecopetrol-ICP.

SHAW, J.H., CONNORS, C., SUPPE, J. Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds. AAPG Seismic Atlas Studies in Geology No. 53. Oklahoma, U.S.A.

TSCHANZ, C., MARVIN, R., CRUZ, J., MENNERT,H., CEBULA, E. (1974). Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta. Geological Society of América Bulletin, v. 85. P. 262-284.

UJUETA, G. & LLINAS, R. (1990). Reconocimiento Geológico de la Parte más Septentrional de la Sierra de Perijá. Geología Colombiana, 17, pp. 197-209, 2 figs., 5 micrografías, Bogotá.

VAN DER MERWE, S. (1999). Geotectonic Development of a Sedimentation in the Northwestern part of South American During the Mesozoic and Cenozoic. Carbones del Cerrejón, Reporte interno, Feasibility Study, Volume 3: Geology and Reserves – Geology, 18 pp.

ANEXOS

ANEXO I. BUZAMIENTO Y AZIMUTH DE POZOS

(B) DATOS ANOMALOS

(C) DATOS POCO CONFIABLES

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
1	CERR012	50	155	78
1	CERR012	60	145	71
1	CERR012	65	152	65
1	CERR012	70	61	76
1	CERR012	75	160	60
1	CERR012	80	155	70
1	CERR012	90	155	65
1	CERR012	100	155	64
1	CERR012	110	140	84

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
1	CERR013	30		
1	CERR013	40	336	80
1	CERR013	50		
1	CERR013	60	160	75
1	CERR013	70		
1	CERR013	80	140	75
1	CERR013	90	135	66
1	CERR013	100	140	
1	CERR013	110	145	60
1	CERR013	120	153	70
1	CERR013	130	152	54
1	CERR013	140	145	50
1	CERR013	150	147	50

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
1	CERR014	20-30	130	45
1	CERR014	30-40	134	54
1	CERR014	40-50	132	38
1	CERR014	50-60	133	65

1	CERR014	60-70	127	55
1	CERR014	70-80	310	60
1	CERR014	80-90	129	60
1	CERR014	90-100	135	65
1	CERR014	100-110	135	70
1	CERR014	110-120	137	70
1	CERR014	120-130	130	32
1	CERR014	130-140	131	67
1	CERR014	140-150	150	46

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
1	CERR015	20-30	145	50
1	CERR015	30-40		
1	CERR015	40-50	158	58
1	CERR015	50-60		
1	CERR015	60-70		
1	CERR015	70-80	135	75
1	CERR015	80-90	140	60
1	CERR015	90-100		
1	CERR015	100-110		
1	CERR015	110-120		
1	CERR015	120-130	130	75
1	CERR015	130-140		
1	CERR015	140-150		

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR016	20	167	30
3	CERR016	30	167	30
3	CERR016	40	167	30
3	CERR016	50	167	30
3	CERR016	60	154	26
3	CERR016	70	154	26
3	CERR016	80	154	30
3	CERR016	90	154	32
3	CERR016	100	154	32
3	CERR016	110	146	26
3	CERR016	120	146	26
3	CERR016	130	146	26

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR017	30	303	68
3	CERR017	40	130	60
3	CERR017	50		
3	CERR017	60		
3	CERR017	70		
3	CERR017	80	140	60
3	CERR017	90	140	70
3	CERR017	100	140	67
3	CERR017	110	135	60
3	CERR017	120	135	60
3	CERR017	130	145	60
3	CERR017	140	145	65

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR018	25	135	75
3	CERR018	30	125	79
3	CERR018	35	135	75
3	CERR018	37	165	70
3	CERR018	45	165	70
3	CERR018	50	137	56
3	CERR018	60		80-90
3	CERR018	70		80-90
3	CERR018	80		80-90
3	CERR018	90		80-90
3	CERR018	100		80-90
3	CERR018	105	155	75
3	CERR018	110	155	75
3	CERR018	120	155	75
3	CERR018	130	155	75s
3	CERR018	140	150	72

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR019	20		
3	CERR019	30	142	75
3	CERR019	40	142	70

3	CERR019	50	142	80
3	CERR019	60	142	75
3	CERR019	70	142	75
3	CERR019	80	142	75
3	CERR019	90	135	75
3	CERR019	100	142	70
3	CERR019	110	150	75
3	CERR019	120	142	80
3	CERR019	128	135	80
3	CERR019	130		
3	CERR019	140	135	66

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR020	20	135	75
3	CERR020	25	135	75
3	CERR020	30		
3	CERR020	40		

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR021	25	140	40
3	CERR021	35	140	45
3	CERR021	40	135	54
3	CERR021	50	145	54
3	CERR021	60		
3	CERR021	70		
3	CERR021	80		
3	CERR021	90	135	59
3	CERR021	100	135	59
3	CERR021	110		
3	CERR021	120	340	87
3	CERR021	130		
3	CERR021	140	335	89

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR022	20	145	60
3	CERR022	30	145	65
3	CERR022	40	135	58
3	CERR022	50	140	67

3	CERR022	60	140	67
3	CERR022	70		
3	CERR022	80	126	50
3	CERR022	90	140	60
3	CERR022	100		
3	CERR022	110	138	40
3	CERR022	120	130	56
3	CERR022	130	160	70
3	CERR022	140	160	75
3	CERR022	150	153	90

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR023	20	144	85
3	CERR023	30		
3	CERR023	40	135	85
3	CERR023	50		
3	CERR023	60	305	85
3	CERR023	70	140	85
3	CERR023	80	145	90
3	CERR023	90	145	90
3	CERR023	100		
3	CERR023	110		
3	CERR023	120	145	80
3	CERR023	130	145	85
3	CERR023	140	45	75

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR024	25	325	70
3	CERR024	35	325	70
3	CERR024	40		
3	CERR024	50		
3	CERR024	60		
3	CERR024	70		
3	CERR024	80	325	80
3	CERR024	90	160	77
3	CERR024	100		
3	CERR024	110		
3	CERR024	125	150	67
3	CERR024	140	323	80
3	CERR024	145	135	80
3	CERR024	150	315	87

3	CERR024	153	340	84

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR025	20	158	62
3	CERR025	30	137	64
3	CERR025	40	140	50
3	CERR025	45	135	43
3	CERR025	60		
3	CERR025	70		
3	CERR025	80	167	85
3	CERR025	90	195	84
3	CERR025	100		
3	CERR025	110	335	83
3	CERR025	120		
3	CERR025	130		
3	CERR025	140	145	87

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR026	225	297	80
3	CERR026	30		
3	CERR026	40		
3	CERR026	50		
3	CERR026	65	163	70
3	CERR026	70		
3	CERR026	80		
3	CERR026	90	140	30
3	CERR026	100	140	50
3	CERR026	115	142	65
3	CERR026	125	143	40
3	CERR026	135	155	30

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR027	20	155	35
3	CERR027	30	155	35
3	CERR027	40	155	35
3	CERR027	50	155	35
3	CERR027	60		
3	CERR027	70		
3	CERR027	80		

3	CERR027	90		
3	CERR027	100	175	32
3	CERR027	110	175	32
3	CERR027	120		
3	CERR027	130		
3	CERR027	140	155	38

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR028	20	180	34
3	CERR028	30	150	55
3	CERR028	40	155	40
3	CERR028	50	157	50
3	CERR028	60	155	48
3	CERR028	70	155	40
3	CERR028	80	155	40
3	CERR028	90	155	40
3	CERR028	100	150	35
3	CERR028	110		
3	CERR028	120	155	54
3	CERR028	130		
3	CERR028	140		

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR029	68	150	70
3	CERR029	96	95	56
3	CERR029	101	210	75

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR030	20	150	77
3	CERR030	30	150	77
3	CERR030	40	152	76
3	CERR030	50	145	72
3	CERR030	60	140	70
3	CERR030	75	150	62
3	CERR030	80	143	60-80
3	CERR030	85	145	77
3	CERR030	90	142	75

3	CERR030	100	145	70

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
3	CERR031	50	50	34
3	CERR031	70	20	50
3	CERR031	100	20	58
3	CERR031	145	205	30

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR032	30	127	80
4	CERR032	40	137	80
4	CERR032	50	135	85
4	CERR032	60	137	85
4	CERR032	70	140	85
4	CERR032	80	140	85
4	CERR032	85	140	85
4	CERR032	90	138	85
4	CERR032	100	143	85
4	CERR032	110	143	85
4	CERR032	120	143	85
4	CERR032	130	143	85

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR033	50	135	70
4	CERR033	60	140	80
4	CERR033	70	140	85
4	CERR033	80	135	85
4	CERR033	90	135	85
4	CERR033	100	135	85
4	CERR033	110	135	85
4	CERR033	120	130	80
4	CERR033	130	135	80
4	CERR033	140	328	80
4	CERR033	150	328	80
4	CERR033	160	328	80
4	CERR033	170	135	85
4	CERR033	180	140	85
4	CERR033	190	135	85
4	CERR033	200	135	85
4	CERR033	210	135	85

4	CERR033	220	140	85
4	CERR033	230	140	85
4	CERR033	240	140	85

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR034	30	135	80
4	CERR034	40	145	80
4	CERR034	50	135	80
4	CERR034	60		
4	CERR034	70	135	85
4	CERR034	80	140	85
4	CERR034	90	140	85
4	CERR034	100	140	85
4	CERR034	110	130	80
4	CERR034	120	130	80
4	CERR034	130	130	80
4	CERR034	140	130	80
4	CERR034	150	130	80
4	CERR034	160	130	85
4	CERR034	170		
4	CERR034	180	140	65
4	CERR034	190	135	85
4	CERR034	200	140	85

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR035	30	138	75
4	CERR035	40	144	76
4	CERR035	50	143	74
4	CERR035	60	135	75
4	CERR035	70	144	77
4	CERR035	80	140	74
4	CERR035	90	144	80
4	CERR035	100	143	79
4	CERR035	110	147	79
4	CERR035	120	144	80
4	CERR035	130	139	60
4	CERR035	140	144	73
4	CERR035	150	142	76
4	CERR035	160	144	76
4	CERR035	170	133	65
4	CERR035	180	140	76
4	CERR035	190	145	77
4	CERR035	200	140	79

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR036	20	120	60
4	CERR036	30		
4	CERR036	40	125	54
4	CERR036	50	125	40
4	CERR036	60	125	45
4	CERR036	70	125	43
4	CERR036	80	125	53
4	CERR036	90	135	56
4	CERR036	100	145	56
4	CERR036	110		
4	CERR036	115	120	60
4	CERR036	120		
4	CERR036	135	145	58

CERR046 DIPMETER ANOMALO

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR037	20	285	80
4	CERR037	30	285	80
4	CERR037	40	309	80
4	CERR037	50	343	80
4	CERR037		343	44
4	CERR037	60	300	70
4	CERR037	70	319	70
4	CERR037	80	319	80
4	CERR037	90	319	80
4	CERR037	100	228	48
4	CERR037	110	310	80
4	CERR037	120	310	80
4	CERR037	130	310	80
4	CERR037	140	210	80
4	CERR037	150	30	85

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR038	35	145	48
4	CERR038	40		
4	CERR038	50	325	80
4	CERR038	60	325	80
4	CERR038	70	325	77
4	CERR038	80	325	80
4	CERR038	90		
4	CERR038	100	330	85

4	CERR038	110	330	85
4	CERR038	120	325	85
4	CERR038	130	325	85
4	CERR038	140	325	82

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR039	30	105	28
4	CERR039	40		
4	CERR039	50	55	24
4	CERR039	55	90	16
4	CERR039	60		
4	CERR039	72	340	20
4	CERR039	80	215	12
4	CERR039	90		
4	CERR039	100		
4	CERR039	110		
4	CERR039	120	75	11
4	CERR039	125	135	19
4	CERR039	130	180	38
4	CERR039	140	165	30

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR040	30	40	2
4	CERR040	40	165	60
4	CERR040	50	165	60
4	CERR040	60	170	60
4	CERR040	70	150	70
4	CERR040	80	180	35
4	CERR040	90	140	30
4	CERR040	100	135	45
4	CERR040	110	115	40
4	CERR040	120	65	54
4	CERR040	130	150	20
4	CERR040	140	150	35

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR041	30		
4	CERR041	40	154	34
4	CERR041	50	145	34
4	CERR041	60	108	30
4	CERR041	70	128	34

4	CERR041	80	95	34
4	CERR041	90	135	26
4	CERR041	100		
4	CERR041	110	152	52
4	CERR041	120	135	70
4	CERR041	130		
4	CERR041	140		

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR042	30	145	28
4	CERR042	40	145	28
4	CERR042	50	175	25
4	CERR042	60	175	25
4	CERR042	70	145	20
4	CERR042	75	160	20
4	CERR042	80		
4	CERR042	95	170	24
4	CERR042	100	170	24
4	CERR042	110		
4	CERR042	120		
4	CERR042	130	150	20
4	CERR042	140	149	30

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR043	30	140	85
4	CERR043	40	140	85
4	CERR043	50	135	85
4	CERR043	60	135	80
4	CERR043	70	135	86
4	CERR043	80	135	86
4	CERR043	90	145	86
4	CERR043	100	145	86
4	CERR043	110	145	86
4	CERR043	120	145	86
4	CERR043	130	145	86
4	CERR043	140	145	86
4	CERR043	150	145	86
4	CERR043	160	145	86
4	CERR043	170	145	86
4	CERR043	180	145	86
4	CERR043	190	145	86
4	CERR043	200	145	86

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR044	25	165	65
4	CERR044	33	153	58
4	CERR044	40	165	48
4	CERR044	57	165	65
4	CERR044	60		
4	CERR044	70		
4	CERR044	80	180	50
4	CERR044	90		
4	CERR044	100	175	36
4	CERR044	110	180	48

SECCION	POZO	PROFUNDIDAD (m)	AZIMUTH	BUZAMIENTO
4	CERR045	20	340	85
4	CERR045	30	230	75
4	CERR045	40	65	60
4	CERR045	50		
4	CERR045	60	235	58
4	CERR045	70		
4	CERR045	80		
4	CERR045	90		
4	CERR045	100	140	80
4	CERR045	110		
4	CERR045	120		
4	CERR045	130	145	60
4	CERR045	145	135	65