

**OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA INTERPRETATIVA DE REGISTROS  
GEOFÍSICOS EN EXPLORACIÓN CARBONÍFERA**

**ELIANA LIZETH GUTIERREZ RINCON**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA  
2013**

**OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA INTERPRETATIVA DE REGISTROS  
GEOFÍSICOS EN EXPLORACIÓN CARBONÍFERA**

**ELIANA LIZETH GUTIERREZ RINCON**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
GEÓLOGO  
Modalidad Práctica Empresarial**

**DIRECTOR  
SAIT KHURAMA  
Ms. Geofísica**

**CO-DIRECTOR  
FEDOR E. TAPIA ROYERO  
Supervisor de exploración**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **DEDICATORIA**

**A Dios por darme la oportunidad de cumplir una etapa más en mi vida.  
A mis padres Azucena Rincón y Ovidio Gutiérrez por su dedicación amor y  
apoyo incondicional, por que pensar en alto, en grande y trazarse metas se  
los debo a ustedes.**

**Mil gracias.**

**Le pido a Dios que los bendiga hoy y siempre ya que son mi motor para salir  
adelante.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a los profesores de la escuela de Geología por su orientación en el desarrollo de este trabajo, en especial al profesor Sait Khurama por sus consejos, asimismo a la compañía Carbones del Cerrejón por darme las facilidades para desarrollar este proyecto en sus instalaciones, finalmente a mi familia y amigos en especial a mi madre Azucena Rincón y a mis amigas María Alejandra Molina y María Fernanda Lozano por su apoyo incondicional.

## TABLA DE CONTENIDO

	PAG
INTRODUCCION.....	19
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. LOCALIZACIÓN.....	21
3. GENERALIDADES DE LA FORMACIÓN CERREJÓN.....	23
3.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	24
4. MARCO TEORICO.....	28
4.1 ¿QUE ES UN REGISTRO GEOFÍSICO?.....	28
4.1.1 Aplicaciones:.....	28
4.2 Generalidades de los registros geofísicos usados en la mina Carbones del Cerrejón.....	29
4.2.1 Registro Gamma Ray:.....	29
4.2.2 Registro Densidad:.....	31
4.2.3 Registro Sónico:.....	33
4.2.4 Registro Susceptibilidad Magnética:.....	36
4.2.5 Registro Dipmeter:.....	37
4.2.6 Registro Resistividad.....	51
4.2.7 Registro Caliper.....	52
5 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	54
5.1 Definición del área de estudio.....	54

5.2 Revisión Bibliográfica.....	54
5.3 Selección de registros Geofísicos.....	54
5.4 Reconocimiento de herramientas de toma de registros.....	55
5.5 Determinación de parámetros.....	55
5.6 Definición de la metodología.....	55
5.7 Presentación de los resultados e informe final. ....	56
6. OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA INTERPRETATIVA DE REGISTROS GEOFÍSICOS EN EXPLORACIÓN CARBONÍFERA .....	58
6.1 REGISTRO DIPMETER.....	58
7. REGISTRO LITOLÓGICO .....	85
7.1 Interpretación registro Gamma Ray y Densidad .....	85
7.2 Interpretación registro Resistividad.....	91
7.3 Interpretación registro Susceptibilidad Magnética.....	96
8. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	101
CONCLUSIONES .....	102
RECOMENDACIONES .....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXOS.....	108

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Localización del yacimiento carbonífero <i>Carbones del Cerrejón</i> .....	21
<b>Figura 2.</b> Columna estratigráfica detallada del yacimiento carbonífero el Cerrejón.....	24
<b>Figura 3.</b> Modelo estructural, corte NW - SE sector N Colombiano entre la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) y los Andes de Mérida (Venezuela).....	27
<b>Figura 4.</b> Herramienta para la toma del registro Gamma Ray.....	29
<b>Figura 5.</b> Respuesta típica de la curva gamma Ray en secuencias Sedimentarias.....	30
<b>Figura 6.</b> Herramienta para la toma del registro Densidad.....	31
<b>Figura 7.</b> Respuesta típica de la curva densidad en secuencias Sedimentarias.....	32
<b>Figura 8.</b> Herramienta para la toma del registro sínico.....	34
<b>Figura 9.</b> Respuesta típica de la curva sínica en secuencias sedimentarias.....	35
<b>Figura 10.</b> Herramienta para la toma de registro Susceptibilidad magnética.....	36
<b>Figura 11.</b> Herramienta para la toma de registro Dipmeter.....	37
<b>Figura 12.</b> Clasificación por colores en los patrones de los Tadpoles.....	39
<b>Figura 13.</b> Patrones idealizados de los Tadpoles en fracturas estratigráficas y estructurales.....	39
<b>Figura 14.</b> Representación gráfica de una falla inversa en un registro Dipmeter.....	40
<b>Figura 15.</b> Representación gráfica de una falla Normal en un registro Dipmeter.....	42
<b>Figura 16.</b> Representación gráfica de una falla de Rumbo en un registro Dipmeter.....	44
<b>Figura 17.</b> Representación gráfica de pliegues en un registro Dipmeter.....	45

<b>Figura 18.</b> Representación gráfica SCAT de la información del Dipmeter en una falla normal.....	48
<b>Figura 19.</b> Herramienta para la toma de registro resistividad.....	51
<b>Figura 20.</b> Herramienta para la toma de registro Caliper.....	52
<b>Figura 21.</b> Resumen de los valores dados en los registros geofísicos de diferentes litologías.....	53
<b>Figura 22.</b> Esquema de metodología.....	57
<b>Figura 23.</b> Registro Dipmeter interpretado.....	60
<b>Figura 24.</b> Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 68 metros.....	62
<b>Figura 25.</b> Interpretación de los datos de Dipmeter por la metodología del SCAT.....	63
<b>Figura 26.</b> Sección transversal en la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. Se observa repetición de la secuencia en el manto 3.....	64
<b>Figura 27.</b> Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 56 metros.....	65
<b>Figura 28.</b> Interpretación de los datos de Dipmeter por la metodología del SCAT.....	66
<b>Figura 29.</b> Sección transversal en la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. Se observa repetición de la secuencia en el manto 3.....	67
<b>Figura 30.</b> Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 137 metros.....	68
<b>Figura 31.</b> Interpretación de los datos de Dipmeter por la metodología del SCAT.....	69
<b>Figura 32.</b> Sección transversal en la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. Se observa repetición de la secuencia en el manto color negro.....	70
<b>Figura 33.</b> Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 75 metros.....	71
<b>Figura 34.</b> Interpretación de los datos del Dipmeter por la metodología del SCAT.....	72

<b>Figura 35.</b> Sección transversal en la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. Se observa repetición de la secuencia en el manto color amarillo.....	73
<b>Figura 36.</b> Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 90 metros.....	74
<b>Figura 37.</b> Interpretación de los datos del Dipmeter por la metodología del SCAT.....	75
<b>Figura 38.</b> Sección transversal en la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. Se observa repetición de la secuencia en el manto color amarillo.....	76
<b>Figura 39.</b> Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla de rumbo a 157 metros.....	78
<b>Figura 40.</b> Interpretación de los datos del Dipmeter por la metodología del SCAT.....	79
<b>Figura 41.</b> Sección transversal a la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. El pozo atraviesa la falla de Rumbo a 157 metros.....	80
<b>Figura 42.</b> Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla de rumbo a 160 metros.....	81
<b>Figura 43.</b> Interpretación de los datos del Dipmeter por la metodología del SCAT.....	82
<b>Figura 44.</b> Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa un pliegue.....	83
<b>Figura 45.</b> Interpretación de los datos del Dipmeter por la metodología del SCAT.....	84
<b>Figura 46.</b> Curvas de densidad que se intercepta en 1.8 g/cm <sup>3</sup> . La línea roja indica los límites de los mantos de carbón (limite estéril- carbón).....	86
<b>Figura 47.</b> Curvas de densidad que se interceptan por debajo de 1.8 g/cm <sup>3</sup> . La línea roja indica los límites de los mantos de carbón (limite estéril- carbón).....	87
<b>Figura 48.</b> Curva sinuosa, la línea roja marca donde se marcaría el límite del manto de carbón.....	88
<b>Figura 49.</b> Registro litológico a partir de las curvas Gamma Ray, Densidad y Caliper.....	90

<b>Figura 50.</b> Respuesta del registro Gamma Ray, Resistividad y Densidad en carbones con Parting.....	92
<b>Figura 51.</b> Respuesta del registro Gamma Ray, Resistividad y Densidad en carbones con fracturamiento.....	93
<b>Figura 52.</b> Registro de resistividad de un manto de carbón meteorizado.....	94
<b>Figura 53.</b> Registro de resistividad donde se identifican en los mantos de carbón contaminados o fracturados.....	95
<b>Figura 54.</b> Registro de Susceptibilidad magnética en una zona de Clinker.....	97

## LISTA DE TABLAS

	PAG.
<b>Tabla 1.</b> Valores promedios de las propiedades físicas para los carbones en el yacimiento <i>Carbones del Cerrejón</i> .....	96
<b>Tabla 2.</b> Valores promedios de las propiedades físicas para las areniscas en el yacimiento <i>Carbones del Cerrejón</i> .....	97
<b>Tabla 3.</b> Valores promedios de las propiedades físicas para las lodolitas en el yacimiento <i>Carbones del Cerrejón</i> .....	98

## LISTA DE ANEXOS

	PAG.
<b>Anexo A.</b> Fotografías manto de carbón fracturado.....	109
<b>Anexo B.</b> Fotografía manto de Carbón meteorizado.....	110
<b>Anexo C.</b> Fotografía material Clinker.....	111

## RESUMEN

### TÍTULO: OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA INTERPRETATIVA DE REGISTROS GEOFÍSICOS EN EXPLORACIÓN CARBONÍFERA

**AUTOR:** ELIANA LIZETH GUTIERREZ RINCON

**PALABRAS CLAVES:** Interpretación, Registros geofísicos, Exploración, Dipmeter, Gamma Ray, Densidad, Susceptibilidad Magnética, Resistividad.

### DESCRIPCIÓN:

El principal proceso de obtención de datos que actualiza el modelo geológico en la mina *Carbones del Cerrejón* es la interpretación de los registros geofísicos tomados allí. Los registros geofísicos tienen un papel muy importante en este modelo, es por eso que para su mayor aprovechamiento se requiere estandarizar y optimizar el proceso de interpretación de las diferentes curvas en los registros geofísicos, para la exploración y explotación de los mantos de carbón.

Para este trabajo se utilizan los registros geofísicos de Densidad, Gamma Ray, Resistividad, Susceptibilidad Magnética, Dipmeter y Caliper. En la interpretación Dipmeter se interpretaron los archivos .LAS por la metodología SCAT y los registros físicos se analizaron por la metodología de Tadpoles, ambos resultados fueron comparados para determinar cuál de los dos sería más útil, la Metodología SCAT provee más información además tiene más herramientas para el proceso de interpretación.

Mediante el estudio de los registros de Gamma Ray, Densidad, Resistividad, Susceptibilidad Magnética, núcleos y rípos de perforación, se determinaron parámetros de control que dieron como resultado los valores mínimos y máximos de dichos registros, con el fin de obtener los rangos de valores representativos para los mantos de carbón y las principales litologías asociadas en los tajos Patilla y Tabaco en la mina *Carbones del Cerrejón*. De esta manera se propuso la metodología de interpretación en siete pasos y de esta forma se estandarizó el proceso de obtención de los datos para la generación del modelo geológico.

---

\*Proyecto de Grado, Modalidad: Práctica Empresarial

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Director, Sait Khurama, Universidad Industrial de Santander; Codirector: Fedor Tapia, Carbones del Cerrejón Limited.

## ABSTRACT

**TITLE: OPTIMIZATION OF THE INTERPRETATIVE METHODOLOGY FOR GEOPHYSICS LOGS IN COAL EXPLORATION**

**AUTHOR: ELIANA LIZETH GUTIERREZ RINCON**

**KEY WORDS:** Interpretation, Geophysics logs, Exploration, Dipmeter, Gamma Ray, Density, Magnetic susceptibility, Resistivity.

### DESCRIPTION:

The principal data collection process to update the geological model in *Carbones del Cerrejón* mine is the interpretation of geophysical logs taken on field. The geophysical logs have a very important role in this model, for a better use we need standardize and optimized the interpretation process of the different curves in the geophysical logs, for exploration and exploitation of coal seams.

For this study, the geophysical logs used are Density, Gamma Ray, Resistivity, Magnetic susceptibility, Dipmeter & Caliper. In the Dipmeter interpretation the .LAS data files were processed by the SCAT methodology & the physical logs were analyzed by the tadpole methodology, both results were compared to determinate which one will be more useful, the SCAT methodology provides more information and has more tools for the interpretation process.

Through the study of the Density, Gamma Ray, Resistivity, Magnetic susceptibility, Dipmeter, Caliper logs, cores & drill cuttings, control parameters were determined, this gave like result minimum and maximum values for all these logs, in order to obtain the representative values ranges for coal seams and lithologies associated in the pits Tabaco & Patilla at the Cerrejón mine. In consequence a seven steps Methodology was proposed to standardize the obtaining data process for the geological model generation.

—

---

\* Graduation Project, Business Practice Mode \*\*Faculty of Engineering Physicochemical, School of Geology. Director, Sait Khurama, Universidad Industrial de Santander; Codirector: Fedor Tapia, Carbones del Cerrejón Limited.

## INTRODUCCION

El deposito *Carbones del Cerrejón* se ubica al sur del departamento de la Guajira, este proyecto se desarrolla dentro de su área minera en los tajos Patilla y Tabaco.

La concesión minera de Cerrejón la conforman tres zonas: Norte, Central y Sur. La zona Norte está situada al norte de la Falla Ranchería y comprende los tajos: Tabaco, La Puente y Patilla. La zona Central comprende los tajos: Comuneros, Oreganal y 100. La zona Sur comprende el área de Campo Alegre, Barrancon y Conejo.

Este trabajo tiene como objetivo optimizar la metodológica interpretativa de los registros geofísicos utilizados en la mina *Carbones del Cerrejón*, con el fin de obtener un mayor aprovechamiento de la información de dichos registros para la actualización del modelo geológico lo cual permitirá una mejor exploración y explotación de los mantos de carbón.

Para la interpretación de los registros geofísicos es necesario contar con toda la información geológica existente del área de estudio, sea a escala regional o local, empezando por una recopilación bibliográfica hasta los datos obtenidos en campo. En los datos de campo se tendrán en cuenta datos estructurales como planos de falla, pliegues, así mismo datos estratigráficos como discordancias y bandeamientos.

El primer paso para el desarrollo de este trabajo fue la consulta de las bases teóricas de los diferentes registros geofísicos usados en el área del proyecto, una vez hecho esto, se procedió a identificar rangos de valores característicos para los diferentes tipos de litologías, esto solo pudo ser posible gracias a la combinación de los datos teóricos, interpretación de registros y los datos geológicos externos en los diferentes pozos perforados en el área de estudio.

La finalidad de este trabajo es hacer más simple, rápida y segura la interpretación de los datos en los registros geofísicos. Lo que conllevará a un modelo geológico y litológico más ajustado a la realidad en el área de estudio.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Optimizar la metodología de interpretación de los registros geofísicos utilizados en la mina *Carbones del Cerrejón* determinando los parámetros de control, con el fin de estandarizar el proceso de interpretación de las diferentes curvas usadas en el proceso de obtención de datos para la generación del modelo geológico.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Correlacionar los datos de los archivos .LAS mediante el uso de análisis comparativos y/o estadísticos; de esta manera obtener patrones de comparación para el registro Dipmeter en la Formación Cerrejón.

Definir los parámetros de control para los registros geofísicos usados en la mina *Carbones del Cerrejón*.

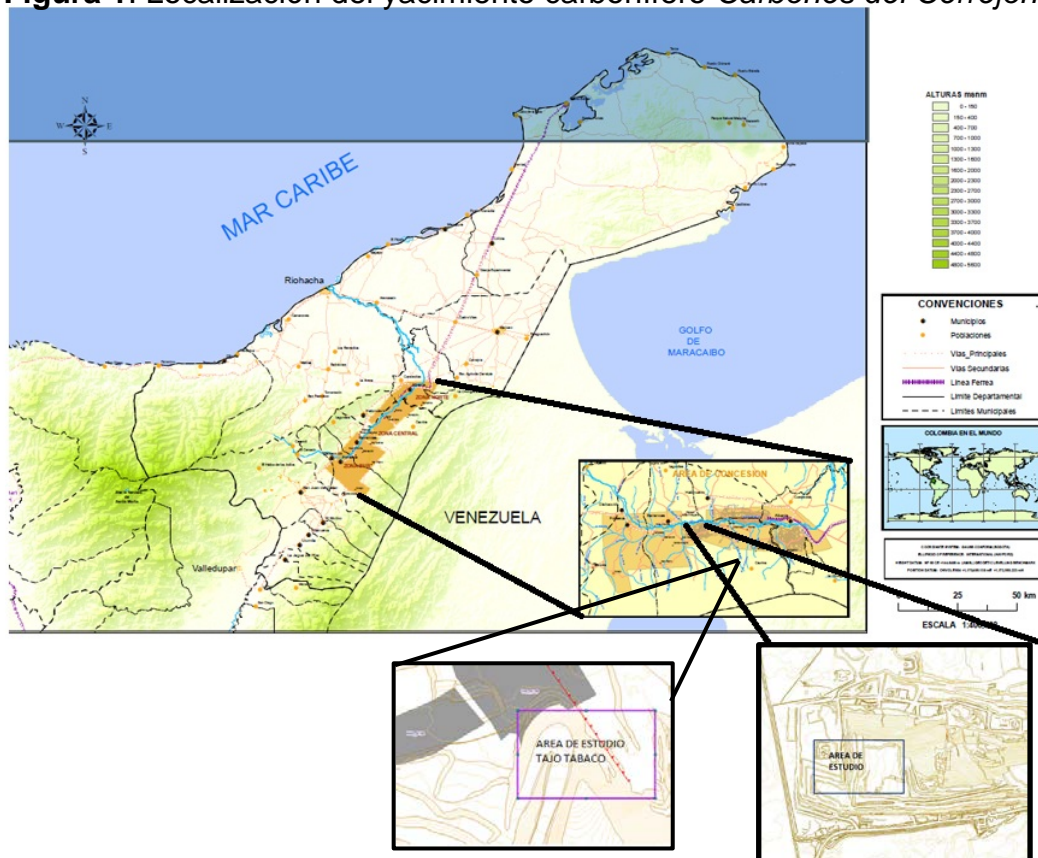
Generar una metodología de interpretación de los registros geofísicos usados en la mina *Carbones del Cerrejón*, por medio de los parámetros de control definidos y su aplicación.

## 2. LOCALIZACIÓN

El área de la concesión minera de Carbones del Cerrejón Limited se encuentra localizada en la esquina noreste de Colombia, límite con Venezuela, más exactamente al sur del Departamento de La Guajira y comprendiendo buena parte del valle del Rio Ranchería, limitada al suroeste por la Sierra Nevada de Santa Marta y al sureste por la Serranía de Perijá.

La concesión minera de Cerrejón la conforman tres zonas: Norte, Central y Sur. La zona Norte está situada al norte de la Falla Ranchería y comprende los tajos: Tabaco, La Puente y Patilla. La zona Central comprende los tajos: Oreganal y 100. La zona Sur comprende el área de Campo Alegre.

**Figura 1.** Localización del yacimiento carbonífero *Carbones del Cerrejón*.



**Fuente:** (<http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa/quienes-somos.aspx>)

Las áreas de estudio de este proyecto se encuentran ubicadas en la zona norte de la concesión minera, dentro del tajo Patilla y tajo Tabaco. Están delimitadas por las coordenadas:

**Tajo Patilla**

**1148180 E 1713893 N**

**1148952 E 1714677 N**

**1148643 E 1713435 N**

**1149414 E 1714221 N**

**Tajo Tabaco**

**1164883 E 1722341 N**

**1165198 E 1722341 N**

**1164883 E 1721977 N**

**1165198 E 1721977 N**

(Ver Figura 1)

### 3. GENERALIDADES DE LA FORMACIÓN CERREJÓN

El nombre de Formación Cerrejón se deriva del cerro Cerrejón, en el borde occidental de la serranía de Perijá. Está conformada por tres miembros: un miembro inferior que consiste de shales negros fosilíferos y arcillolitas negras laminadas con delgadas láminas lenticulares de arenisca; 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; las secuencias grano crecientes y grano decrecientes son comunes. El miembro superior está dominado por lodolitas y limolitas, 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, mientras que hacia el techo presenta un contacto discordante con la Formación Tabaco (Carbones del Cerrejón, 2005). Se depositó entre el Paleoceno y el Eoceno en un ambiente deltaico, subacuático, donde los sedimentos continentales y marinos se entrelazan en varias lagunas comunicadas entre sí. Su espesor puede variar entre 800 m y 1400 m. (Ver Figura 2).

**Figura 2.** Columna estratigráfica generalizada del yacimiento carbonífero el Cerrejón.

		LITOLOGÍA	FORMACIÓN	AMBIENTE	
CUATERNARIO			Aluvión	Continental	CUENCA FORELAND
TERCIARIO	PLIOCENO			Continental	
	MIOCENO			Marino Somero	
	OLIGOCENO		Palmito	Fluvio deltáico/Marino Marginal	
			Tabaco	Fluvial trezado	
	PALEOCENO		Cerrejón	Fluvio deltáico/Marino marginal	
		Manantial			
		Hato nuevo			
		Molino	Marino		
CRETÁCICO	MAESTRICHTIANO				
	CAMPANIANO				
	SANTONIANO		La Luna	Marino Restringido	
	CONIACIANO				
	HURONIANO				
	CENOMANIANO				
	ALBIANO		Aguas Blancas	Marino somero	
			Lagunitas		
			Rio Negro	Fluvial	
JURÁSICO	TITONIANO		La Quinta	Continental	BACK-ARC
	KIMMERIDGIANO				
	OXFORDIANO				

**Fuente:** Modificado de Davidson y Lowe (2000)

### 3.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

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

La Serranía de Perijá se caracteriza por presentarse alargada en direcciones NNE – SSW, que se ha elevado desde el Mioceno Tardío a la actualidad. La compresión por la convergencia de las placas Caribe, Nazca y Sudamericana durante la orogenia andina produjeron fallamientos inversos con muy bajo ángulo, debido a la distancia a la cual se encuentra la zona de la Serranía respecto a la triple conjunción.

Como ya se mencionado el área de estudio y en general el complejo carbonífero se encuentra estructuralmente definida por la presencia de pliegues y fallas dentro de los cuales son identificables dos grupo principales; el primero de estos orientado con rumbo al NE y el segundo orientado de E – W a NE – SE, compuesto por fallas de movimiento dextral y un componente vertical, que corta el grupo al NE (Saavedra, 2008).

La subcuenca del Cerrejón está formada por pliegues anticlinales y sinclinales suaves con dirección predominante al SW-NE, dichos pliegues componen el flanco W de la Serranía de Perijá, hasta el extremo NE donde termina chocando con la Falla de Oca. Sin embargo, la estructura general del yacimiento corresponde a un monoclinal con rumbo NE que está definido por las colinas de la Formación Manantial al W y la Falla Cerrejón al E. Se presentan entonces estratos con orientación predominante al N60E y con buzamientos al SE de 10° a 15° (Kellogg et al, 1982).

A continuación las principales Fallas regionales del área de estudio.

**Falla de Oca:** Se cataloga como falla de rumbo con desplazamiento dextral, presenta rumbo E – W y un desplazamiento estimado entre 90 y 100 Km (Montes et al., 2005). La Falla de Oca forma parte de un sistema de fallas transpresivas que aparentemente se desplazó durante el Paleógeno como resultado del acortamiento en la Serranía del Perijá (Kellogg & Bonini, 1982). La Falla de Oca limita la cuenca del Río Ranchería hacia el N, haciendo girar hacia el NE las formaciones Cretácicas del borde NW y truncando la Serranía de Perijá (Hidrogeocol, 2007).

**Falla Cerrejón:** El nombre de Falla Cerrejón fue tomado del Cerro Cerrejón posiblemente por geólogos de la Creole Petroleum Corporation quienes cartografiaron la falla en la zona sur del Cerrejón hasta el sitio El Molino en el año

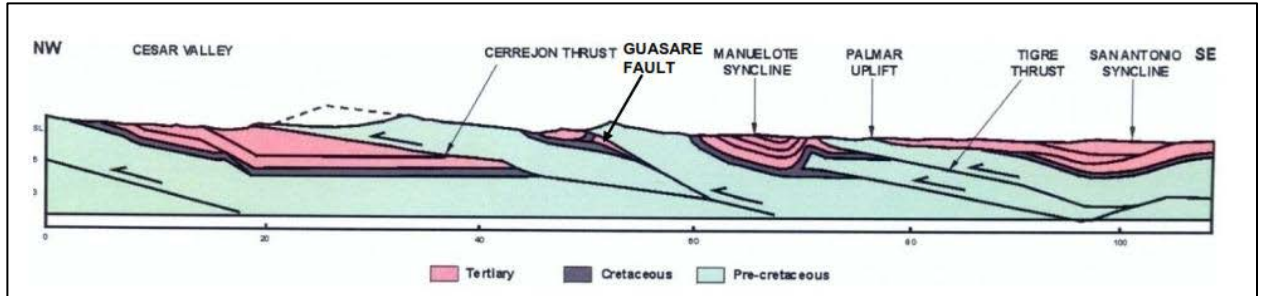
de 1961. La Falla Cerrejón se presenta como un cabalgamiento de bajo ángulo que afecta el basamento (Cerrejón, 2008) con vergencia al NW. Se localiza a lo largo del flanco W de la Serranía de Perijá. Según se reporta presenta un buzamiento de  $15^{\circ} \pm 10^{\circ}$  hacia el SE y un desplazamiento de  $1.7 \pm 0.6$  Km en la vertical y  $7.8 \pm 2$  Km en la horizontal (Kellogg, 1981).

La traza de la falla finaliza hacia el NE donde se encuentra con la Falla de Oca y donde a su vez finaliza la Serranía de Perijá. La Falla Cerrejón es responsable del cabalgamiento de 16 – 26 Km aproximadamente en una dirección NW (Figura 3) de sedimentos Mesozoicos, se interpreta como una estructura a escala cortical que llega hasta profundidades de 8 Km (Kellogg et al, 1982).

**Falla Samán:** La Falla Samán se reporta como una falla de rumbo que desplaza en vista de planta las trazas de mantos carbón y el eje del Anticlinal de Tabaco.

**Falla Tabaco:** Según la información reportada en Carbones del Cerrejón y su grupo de geólogos la Falla Tabaco es reportada como una falla inversa. Presenta una extensión que va desde la Falla Samán atravesando todo el Tajo Tabaco Uno. La Falla Tabaco se desplaza con una dirección predominante al EW, buzando alrededor de  $35^{\circ}$  al SSE con vergencia al NNO.

**Figura 3.** Modelo estructural, corte NW - SE sector N Colombiano entre la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) y los Andes de Mérida (Venezuela).



**Fuente:** Tomado de Kellog et al, 1982).

## 4. MARCO TEORICO

### 4.1 ¿QUE ES UN REGISTRO GEOFÍSICO?

Un registro geofísico en un pozo exploratorio es el resultado gráfico de la información capturada por métodos indirectos, por medio de detectores (sondas) que están diseñadas con dispositivos que permiten registrar las diferentes propiedades físicas, químicas, eléctricas, magnéticas, de los diferentes tipos de roca y minerales presentes en el depósito.

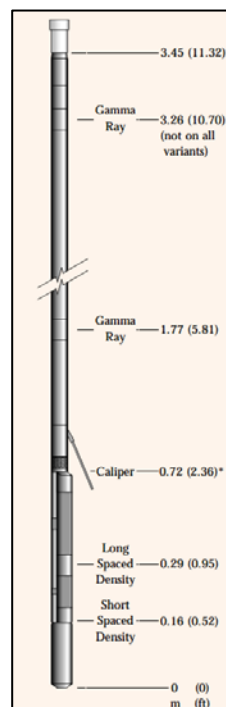
4.1.1 Aplicaciones: Las razones por la cual se toma un registro geofísico incluyen uno o más de los siguientes casos:

- Identificación litológica.
- Profundidad de los contactos litológicos.
- Correlación interna del pozo.
- Mapeo estructural.
- Determinación del buzamiento.
- Determinación de la dirección del buzamiento.
- Dureza de la roca.
- Frecuencia de fractura.
- Porosidad.
- Parámetros geomecánicos de las rocas.

## 4.2 GENERALIDADES DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS USADOS EN LA MINA CARBONES DEL CERREJÓN

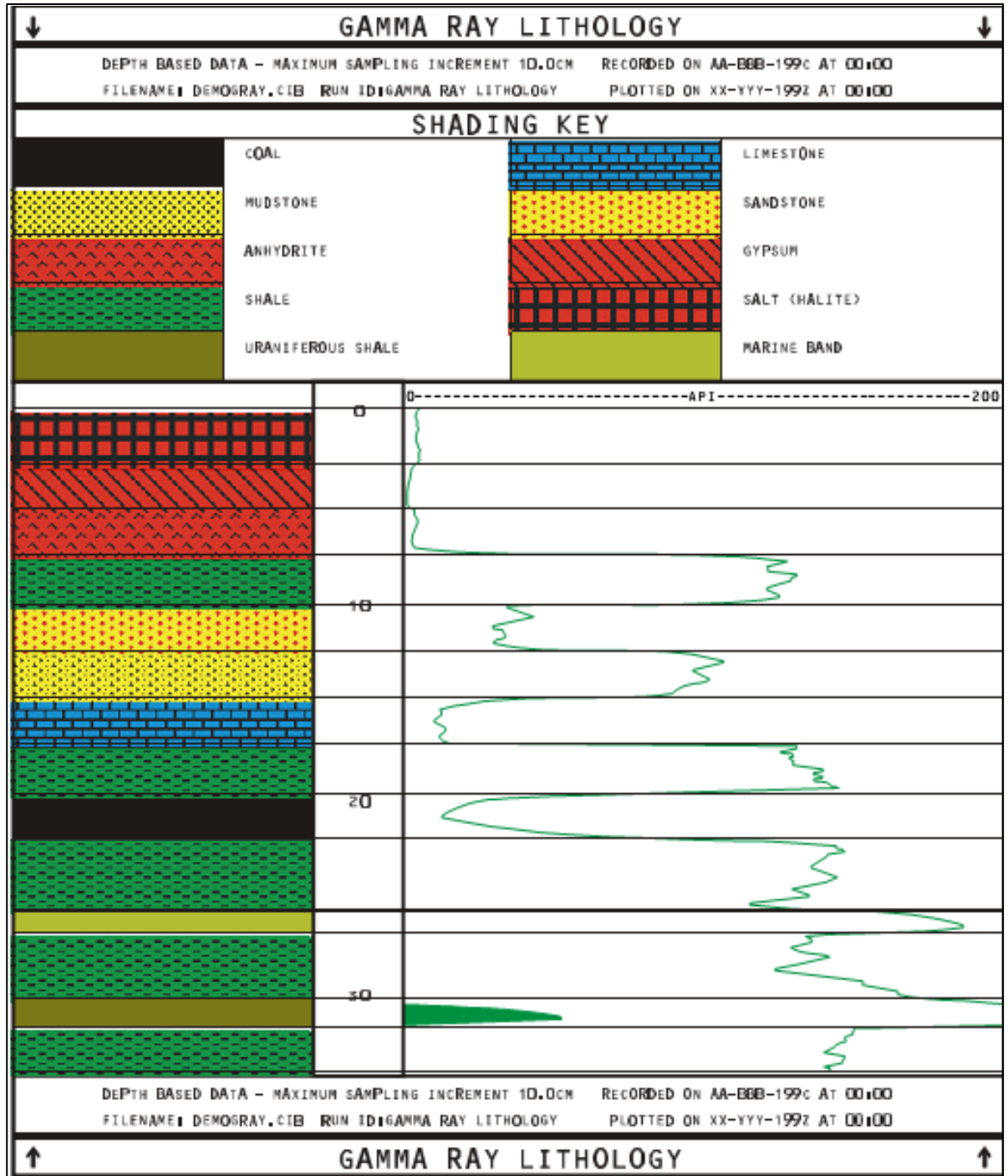
4.2.1 Registro Gamma Ray: El registro de Gamma Ray es una medición de la radiactividad natural de las rocas. En las formaciones sedimentarias el registro normalmente refleja el contenido de arcilla de las formaciones porque los elementos radiactivos tienden a concentrarse en las arcillas y Lutitas. Las formaciones limpias generalmente tienen un nivel muy bajo de radiactividad, a menos que contaminantes radiactivos como cenizas volcánicas o residuos de granito estén presentes o que las aguas de formación contengan sales radiactivas disueltas. (Ver figura 5). En la figura 4 se observa la herramienta para la toma del registro Gamma Ray.

**Figura 4:** Herramienta para la toma del registro Gamma Ray.



**Fuente:** tomado de Revees wireline services, (1999).

Figura 5: Respuesta típica de la curva gamma Ray en secuencias sedimentarias.

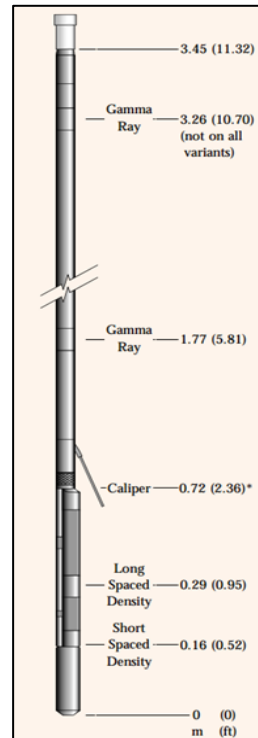


Fuente: tomado de Firth D. (1994).

4.2.2 Registro Densidad: El principio consiste en una fuente radiactiva, colocada en la parte inferior de la sonda (Ver Figura 6); Esta fuente emite rayos gamma hacia la formación, que son como partículas de alta velocidad que chocan con los electrones en la formación. Con cada choque, los rayos gamma pierden algo de su energía; aunque no toda, la ceden al electrón y continúan con energía disminuida. Esta clase de interacción se conoce como efecto Compton. Los rayos gamma dispersos que llegan al detector, que está a una distancia fija de la fuente, se cuentan para indicar la densidad de la formación. El número de colisiones en el efecto Compton está directamente relacionado con el número de electrones de la formación.

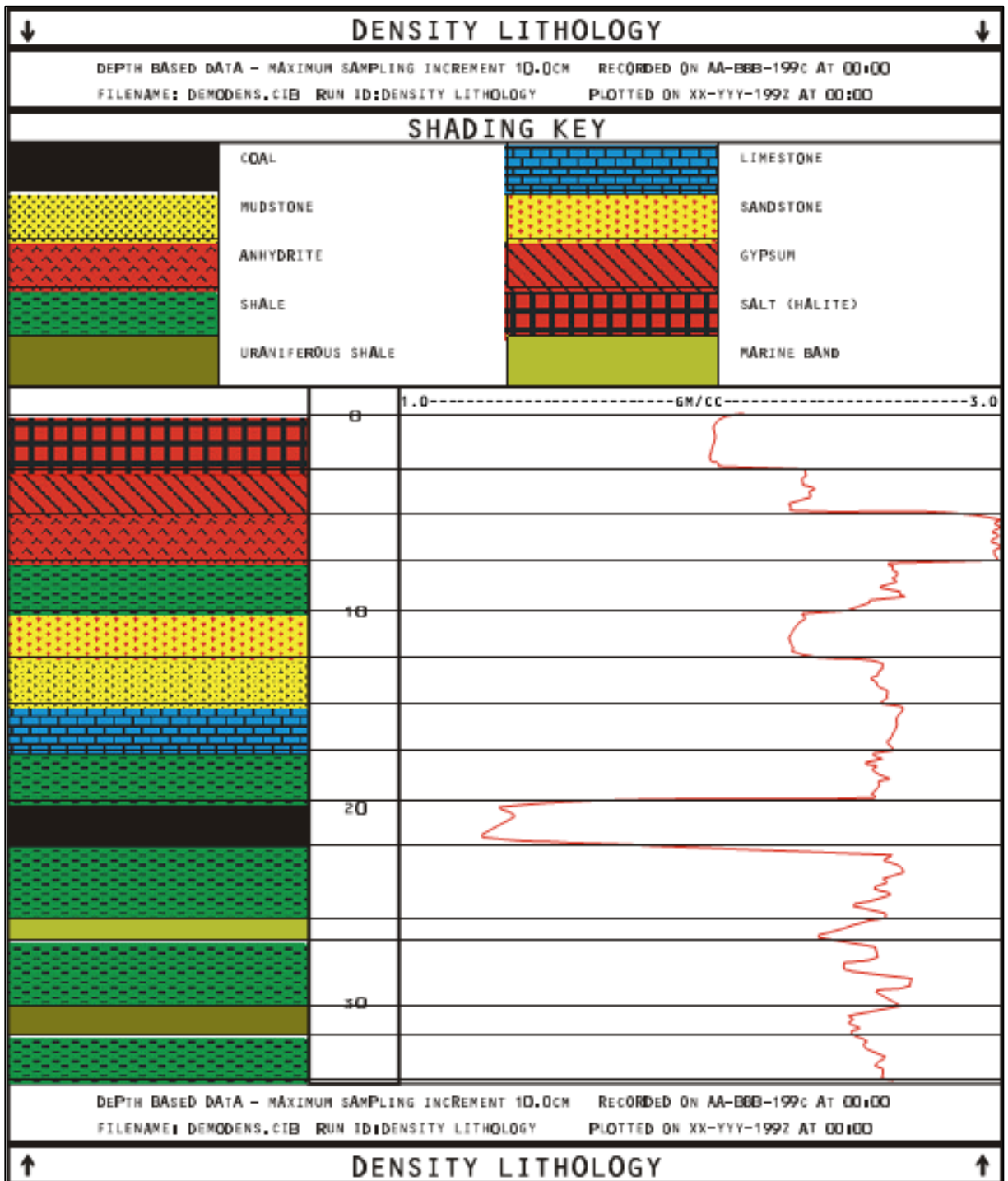
En la figura 7 se puede observar la Respuesta típica de la curva Densidad en secuencias sedimentarias.

**Figura 6:** Herramienta para la toma del registro Densidad.



**Fuente:** tomado de Revees wireline services, (1999)

Figura 7: Respuesta típica de la curva densidad en secuencias sedimentarias.



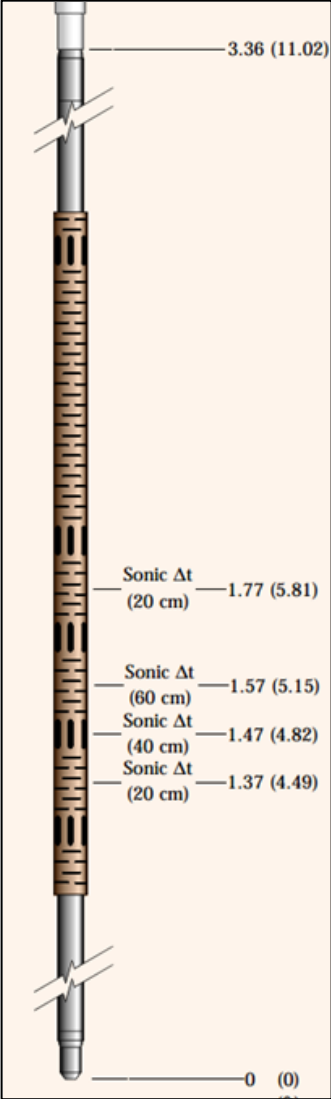
Fuente: tomado de Firth D. (1994)

4.2.3 Registro Sónico: La herramienta usada para la toma del registro sónico, es la sonda sónica, la cual consiste en un transmisor que emite pulsos sónicos de alta frecuencia que se transmiten a través del fluido y de las formaciones (Ver Figura 8). Las ondas refractadas son detectadas por los receptores situados en la sonda a diferentes distancias respecto al transmisor. La configuración de esta sonda incluye un transmisor de pulsos y dos receptores, permitiendo el registro de las ondas compresionales (P), de cizalla (S) y Stoneley.

Una vez obtenidos los datos de los receptores se efectúa el procesado de los mismos. Para cada tren de ondas registrado se calculan los tiempos de llegada de cada tipo de onda a cada receptor. Con estos tiempos y la distancia entre los receptores se obtiene el retardo de los diferentes tipos de onda. A partir de los retardos se calculan las velocidades de propagación de las ondas en las litologías. Conociendo las velocidades de las ondas P y S se puede obtener el coeficiente de Poisson. Además, si se dispone de la densidad de los materiales, se puede calcular los diferentes parámetros geomecánicos como: Módulo de elasticidad, módulo de cizalla, etc. (Borelog, 2006).

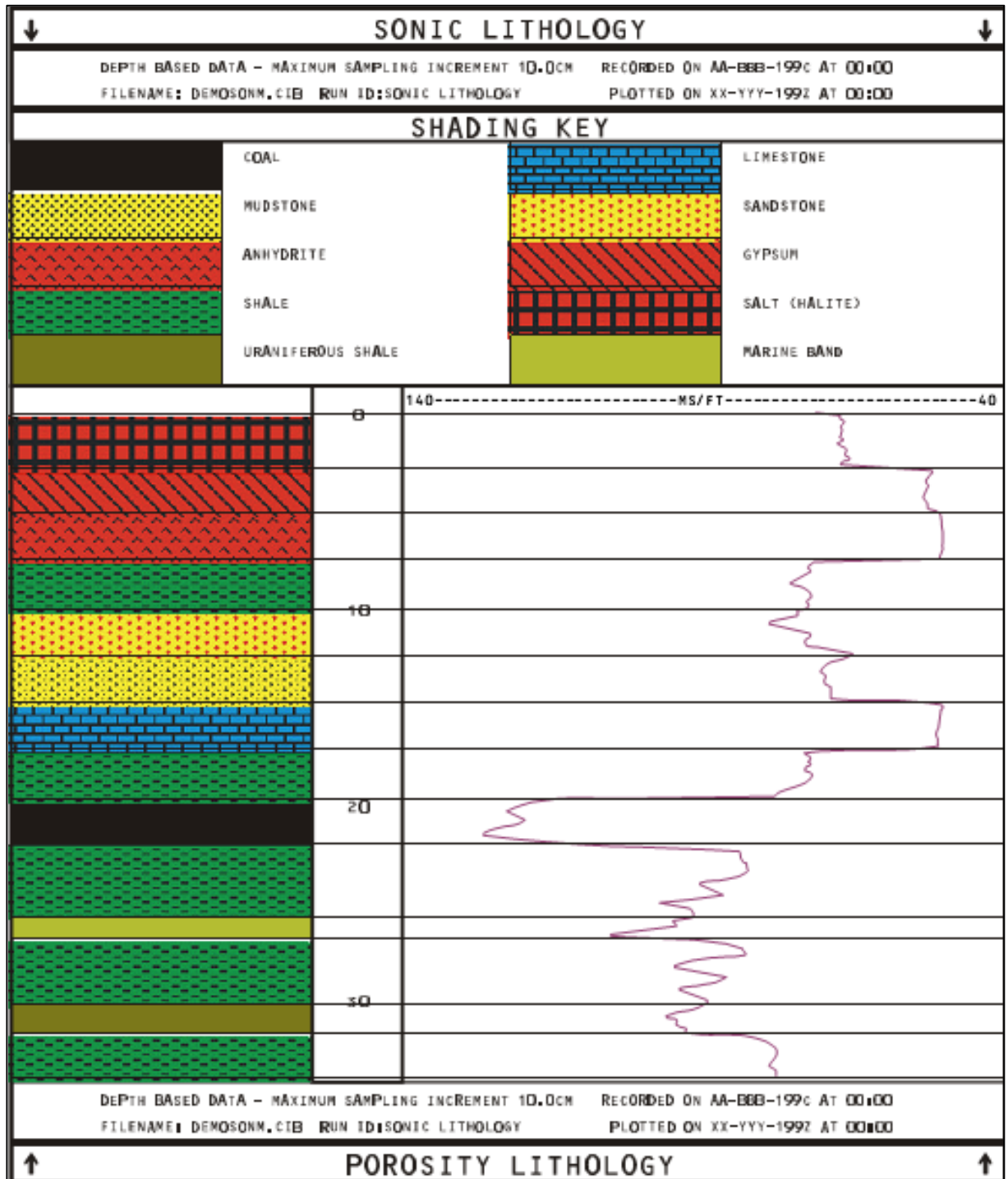
En la figura 9 se puede observar la Respuesta típica de la curva Sónico en secuencias sedimentarias.

**Figura 8:** Herramienta para la toma del registro sónico.



**Fuente:** tomado de Revees wireline services, (1999).

**Figura 9:** Respuesta típica de la curva sónico en secuencias sedimentarias.

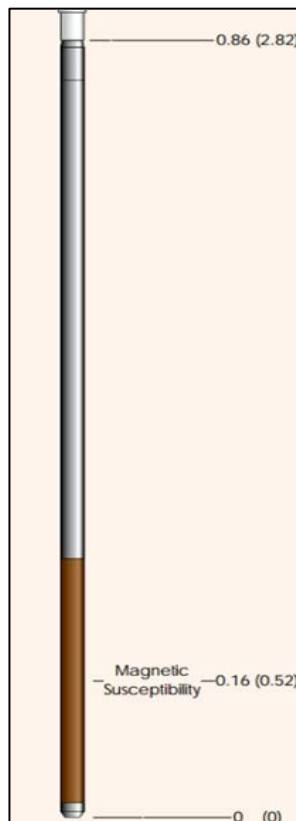


**Fuente:** tomado de Firth D. (1994).

4.2.4 Registro Susceptibilidad Magnética: El registro de susceptibilidad magnética se basa en los principios de inducción electromagnética. Se compone de un transmisor y un receptor equilibrado, configurado de modo que la señal de acoplamiento del transmisor se cancele cuando la herramienta este en un ambiente homogéneo. La proximidad de materiales magnéticos produce desequilibrios mutuos cuyas magnitudes dependen en parte de la susceptibilidad magnética de la formación, en los cuales se ven reflejados en la curva reportada. (David Firth, 1999).

En la figura 10 se puede observar un esquema de la herramienta para la toma del registro Susceptibilidad magnética.

**Figura 10:** Herramienta para la toma de registro Susceptibilidad magnética.

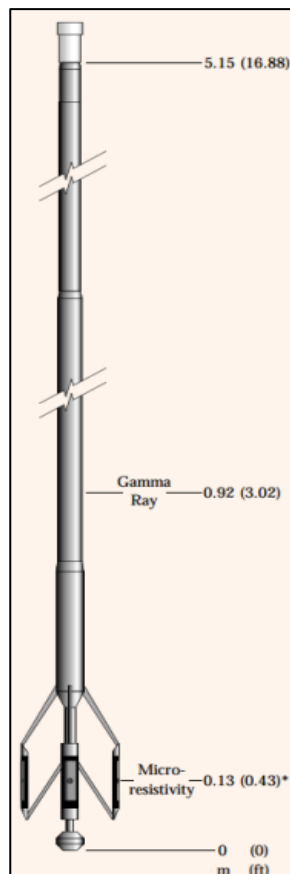


**Fuente:** tomado de Revees wireline services, (1999)

4.2.5 Registro Dipmeter: El registro Dipmeter proporciona cuatro mediciones de microresistividad focalizadas que ayudan a obtener la orientación, buzamiento de la estratificación y la trayectoria del pozo. Análisis de los patrones generados por buzamientos sucesivos proporcionan información importante acerca de los ambientes sedimentarios y estructurales.

Las mediciones de microresistividad se hacen por pequeños electrodos incrustados en cuatro pads en dos pares de brazos del Caliper ortogonales. (Revees wireline services, 1999). (Ver figura 11).

**Figura 11:** Herramienta para la toma de registro Dipmeter.



**Fuente:** tomado de Revees wireline services, (1999).

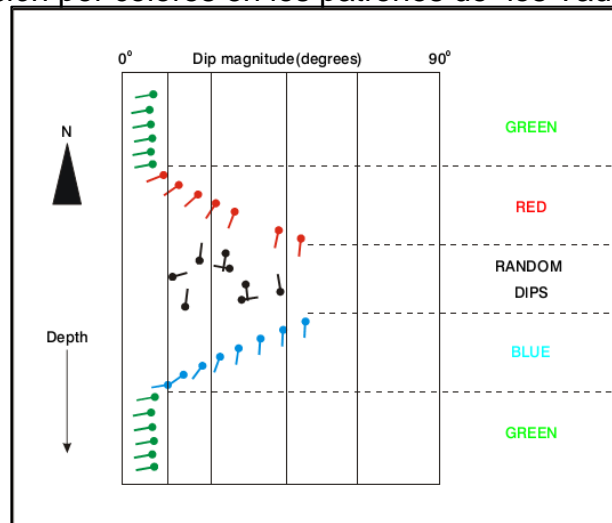
4.2.5.1 Análisis estructural y estratigráfico en el registro Dipmeter por el método tradicional: La orientación de buzamientos estructurales es originada por cambios pos-de posicionales por tectonismo o eventos estructurales locales. Esto es útil para determinar su magnitud y dirección y pueden ser extraídos de los buzamientos observados y así revelar los patrones de buzamiento en el tiempo de la depositación.

Los buzamientos estratigráficos requieren que características a pequeña escala sea correlacionada para producir buzamientos representativos de características sedimentarias formadas en el tiempo de la depositación como canales, reefs, disconformidades, fallas y estratificación.

La identificación de ambientes de depositación se puede comparar con modelos generados de estructuras actuales como los deltas, ríos, playas, dunas, etc. Estas interpretaciones deben ser comparadas contra los datos litológicos de otros registros y corazonces si están disponibles.

El resultado es presentado en un registro de vectores más conocido como registro Tadpole, este es llamado así por el símbolo usado que consta de un círculo o cabeza y una flecha o cola, el círculo o cabeza representa en el eje vertical la profundidad y en el eje horizontal la magnitud de buzamiento, la flecha indica la dirección de buzamiento en azimut. La agrupación de patrones coherentes reflejara variaciones en el buzamiento de las unidades en el pozo. En la figura 12 se observa la clasificación por colores en los patrones de los Tadpoles. (Firth D. 1994).

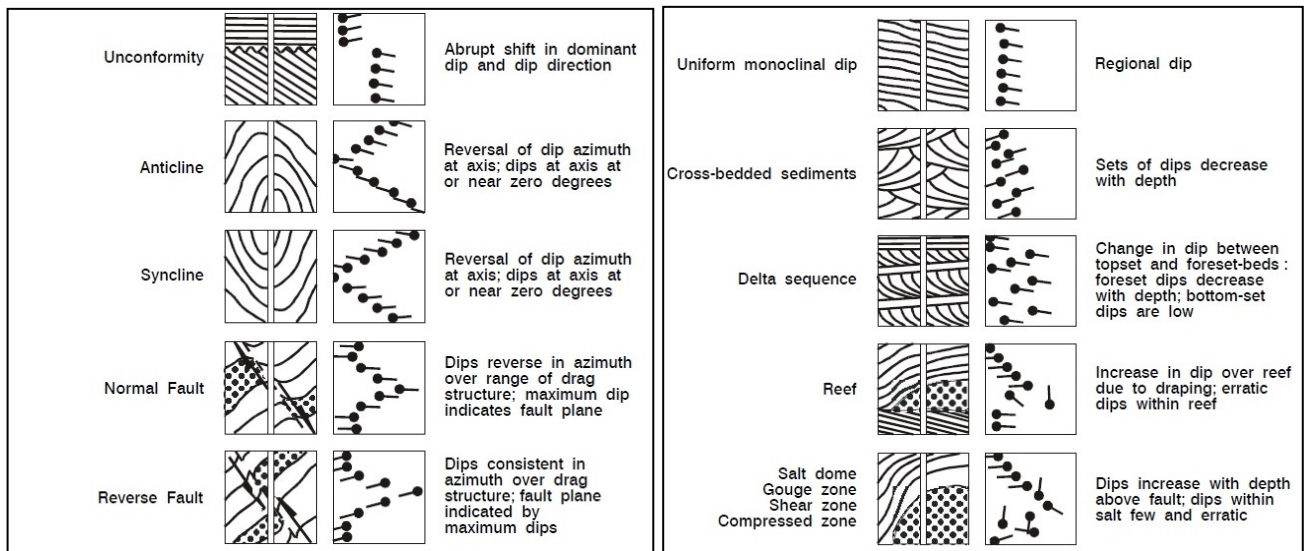
**Figura 12:** clasificación por colores en los patrones de los Tadpoles.



**Fuente:** tomado de Firth D. (1994).

A continuación patrones idealizados de los Tadpoles en fracturas estratigráficas y estructurales. (Ver figura 13).

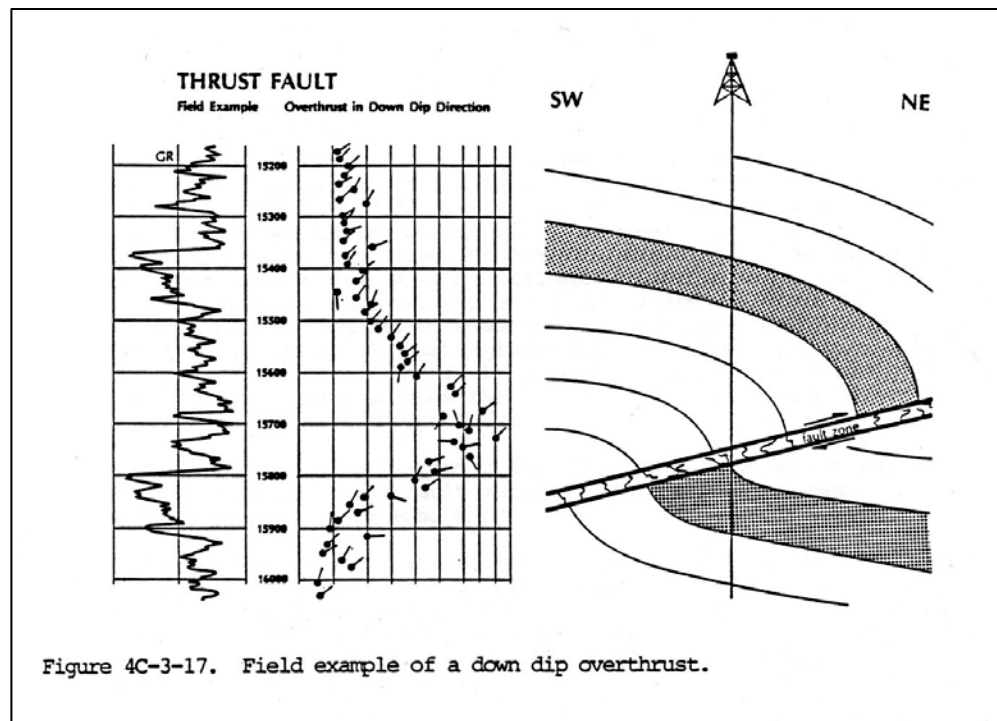
**Figura 13:** Patrones idealizados de los Tadpoles en fracturas estratigráficas y estructurales.



**Fuente:** tomado de Firth D. (1994).

4.2.5.1.1 Representación de Fallas inversas: La falla inversa es una Falla en la que el bloque superior ha sido levantado con relación al bloque inferior. En el registro Dipmeter la configuración de los Tadpoles se parece a una falla Normal, exceptuando los buzamientos del plano de falla, que normalmente no se pueden determinar a partir del perfil del Dipmeter. Para poder determinar qué tipo de falla muestra el registro Dipmeter, se debe hacer una correlación estratigráfica de perfiles; la presencia de fallas inversas muestra una parte de la secuencia repetida, mientras que para las fallas normales hay una pérdida de la misma. A continuación se muestran diferentes configuraciones para una falla inversa en el registro Dipmeter. (Ver figura 14).

**Figura 14:** Representación gráfica de una falla inversa en un registro Dipmeter.



**Fuente:** Schlumberger (1970)

Figura 14 (Continuación)

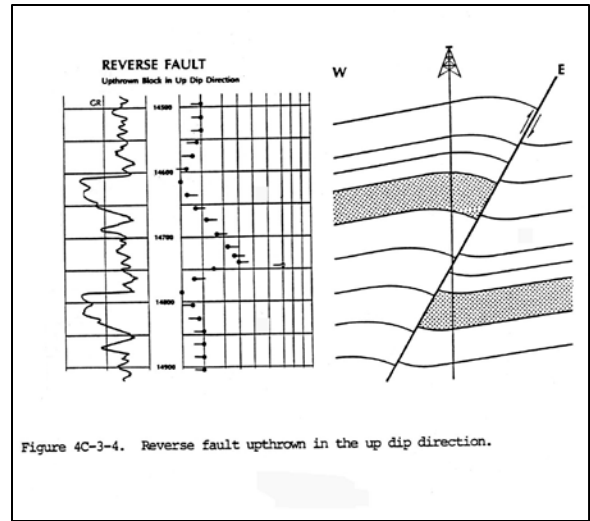
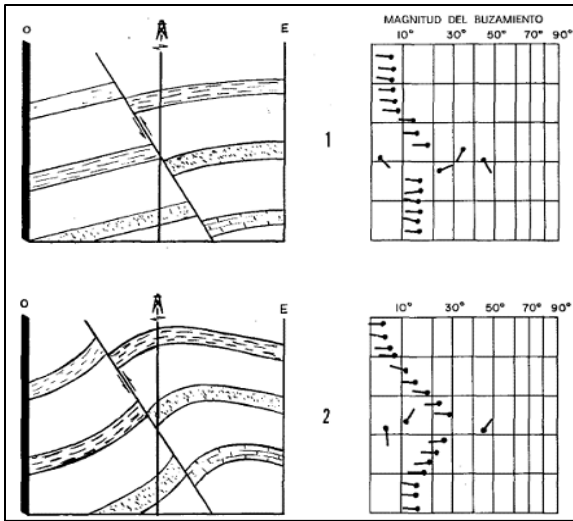


Figure 4C-3-4. Reverse fault upthrown in the up dip direction.

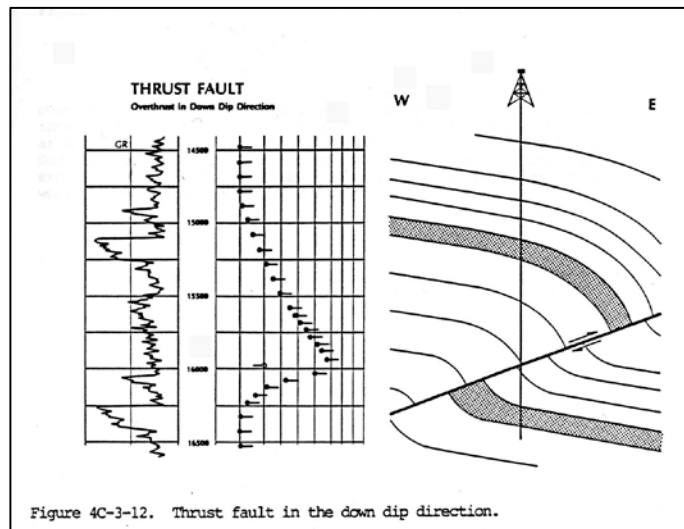
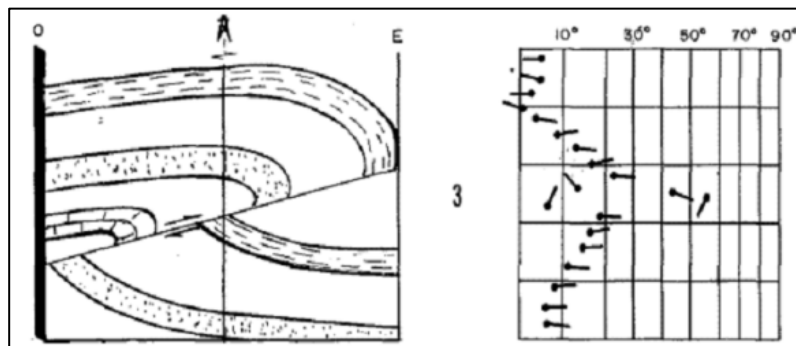


Figure 4C-3-12. Thrust fault in the down dip direction.

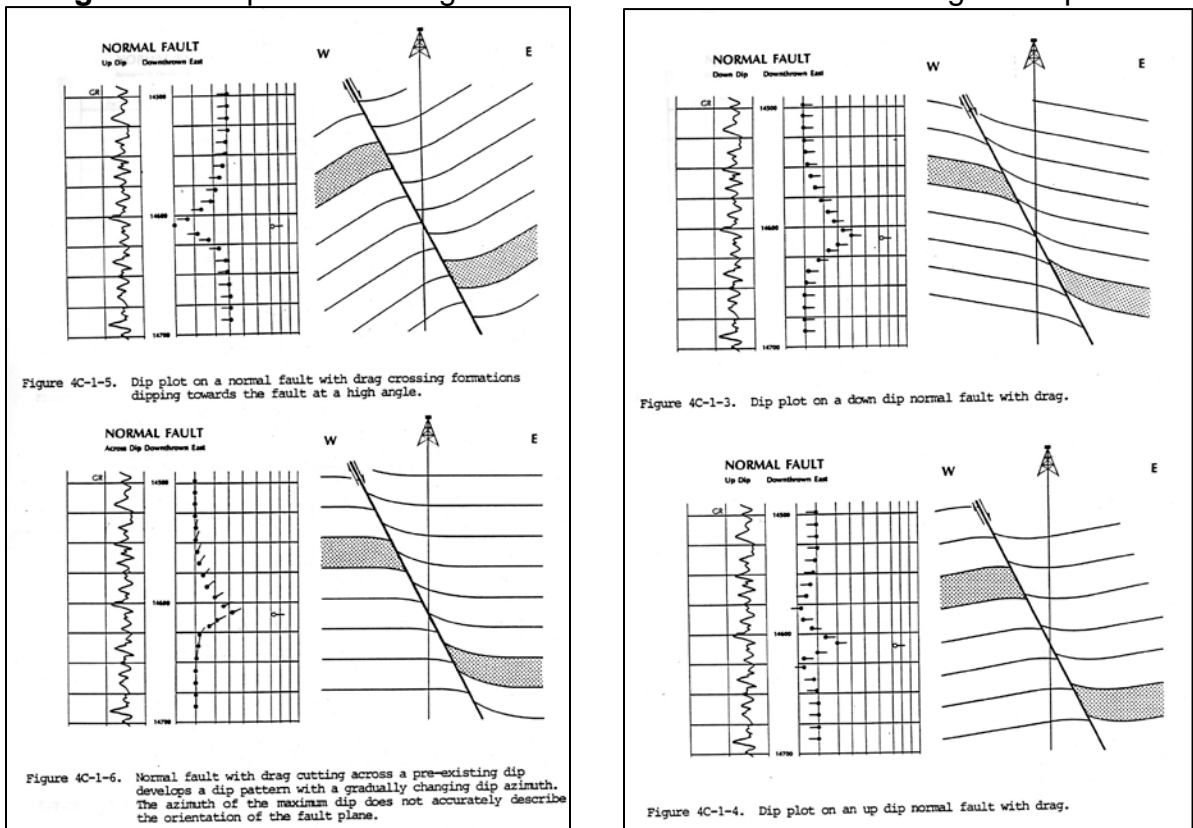


Fuente: Schlumberger (1970).

4.2.5.1.2 Representación de Fallas Normales: La falla normal es una falla en la que el bloque superior ha caído con relación al bloque inferior. En el registro Dipmeter la configuración de los Tadpoles se parece a una falla inversa, exceptuando los buzamientos del plano de falla, que normalmente no se pueden determinar a partir del perfil del Dipmeter. Para poder determinar qué tipo de falla muestra el registro Dipmeter, se debe hacer una correlación estratigráfica de perfiles; la presencia de fallas inversas muestra una parte de la secuencia repetida, mientras que para las fallas normales hay una pérdida de la misma.

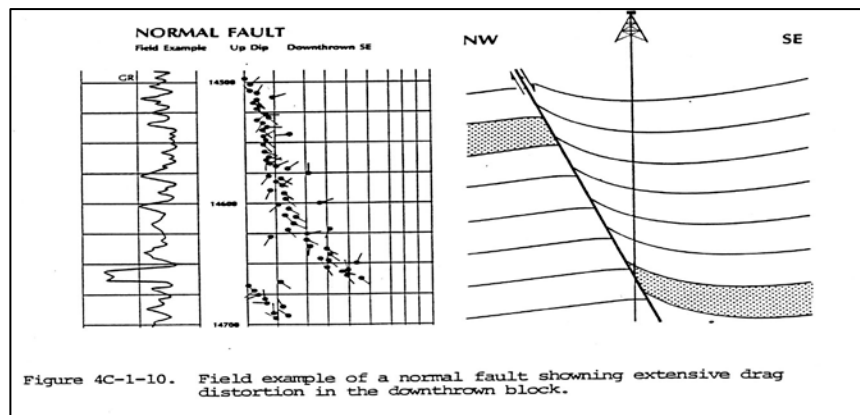
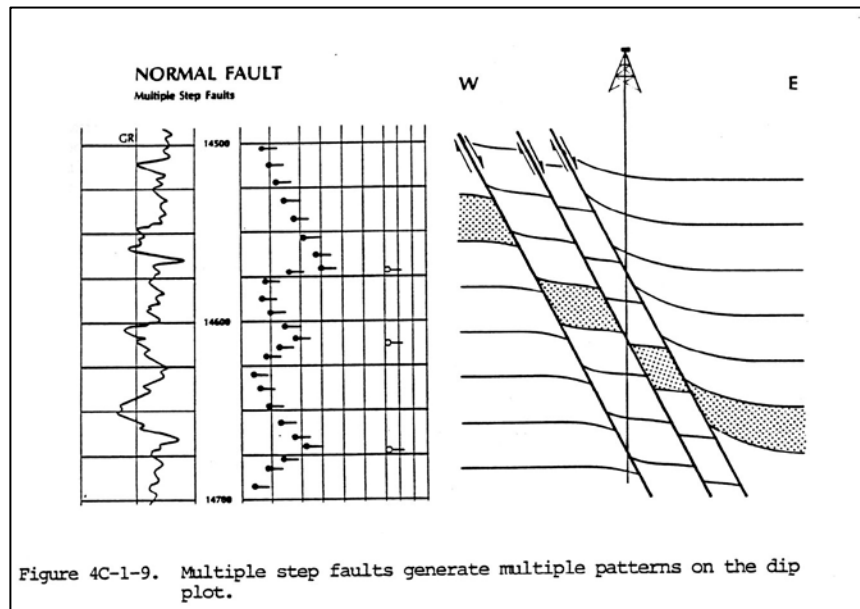
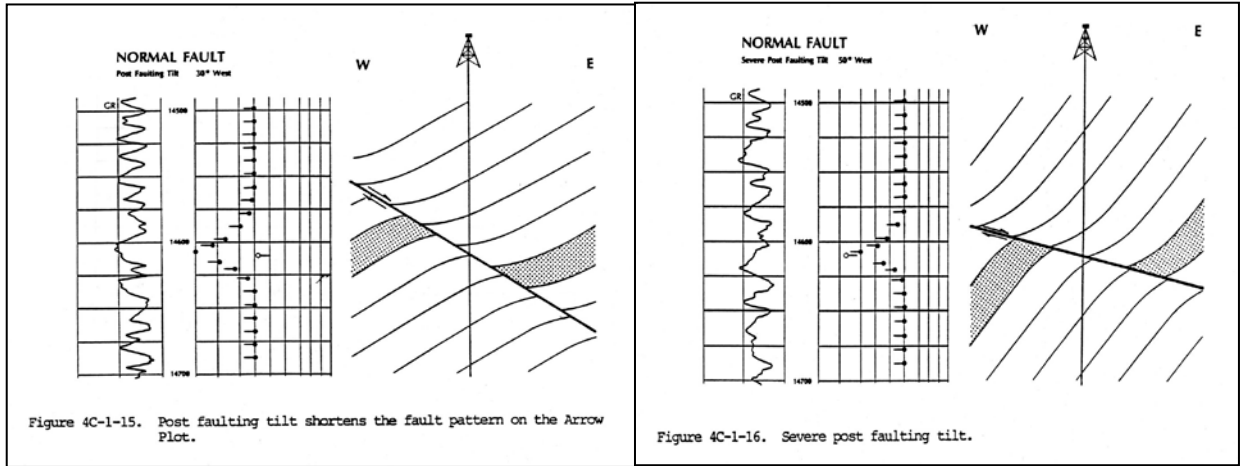
A continuación se muestran diferentes configuraciones para una falla Normal en el registro Dipmeter. (Ver figura 15).

**Figura 15:** Representación gráfica de una falla Normal en un registro Dipmeter.



Fuente: Schlumberger (1970)

**Figura 15 (continuación)**

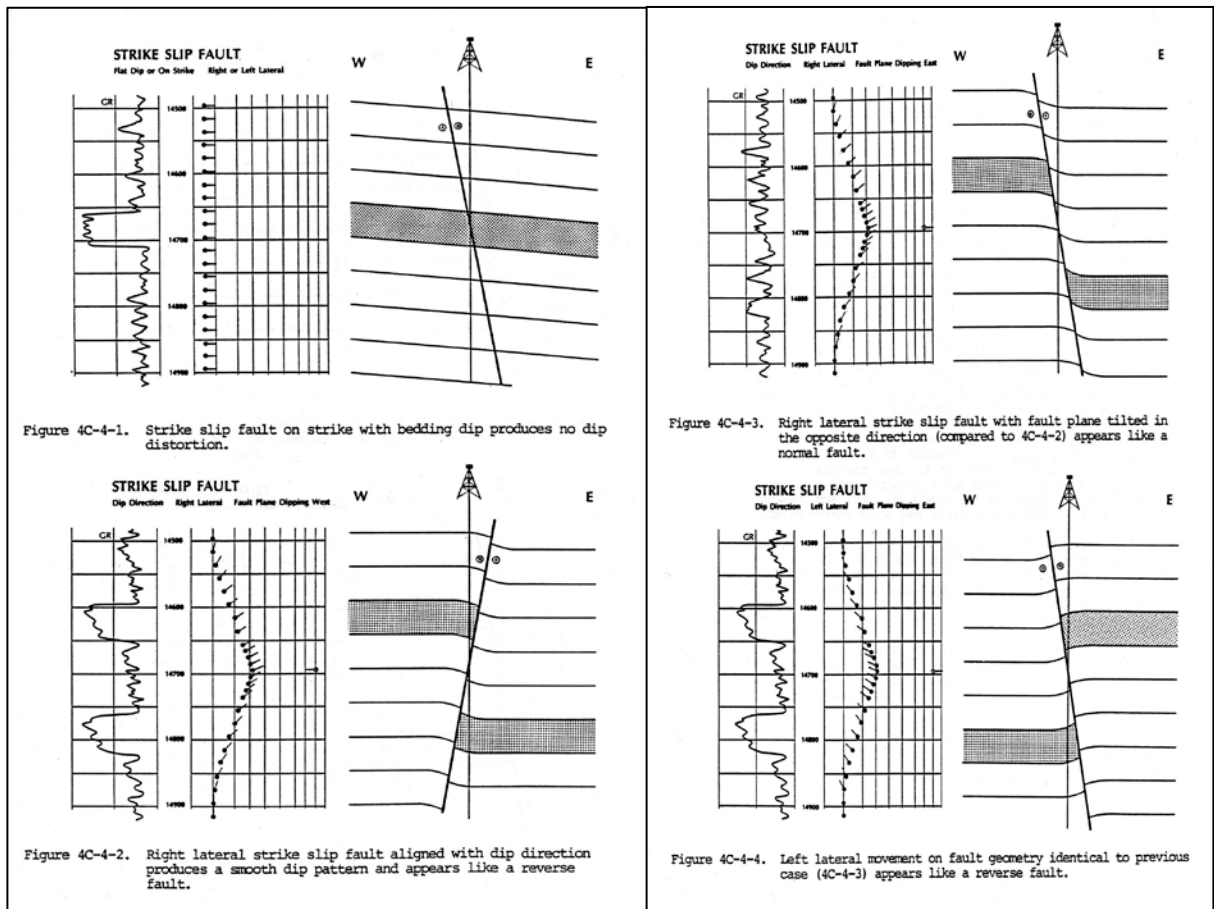


Fuente: Schlumberger (1970)

4.2.5.1.3 Representación de Fallas de Rumbo: La Falla de Rumbo es una Falla en la que un bloque tiene un movimiento horizontal en relación al otro. En el registro Dipmeter la configuración de los Tadpoles son parecidos a un pliegue, lo que diferencia entre el pliegue y la falla de rumbo son los Tadpoles que muestran la zona de falla. En la imagen del pozo se muestra como falla normal o inversa cuando el plano de falla tiene inclinación.

A continuación se muestran diferentes configuraciones para una falla de Rumbo en el registro Dipmeter. (Ver figura 16).

**Figura 16:** representación gráfica de una falla de Rumbo en un registro Dipmeter.

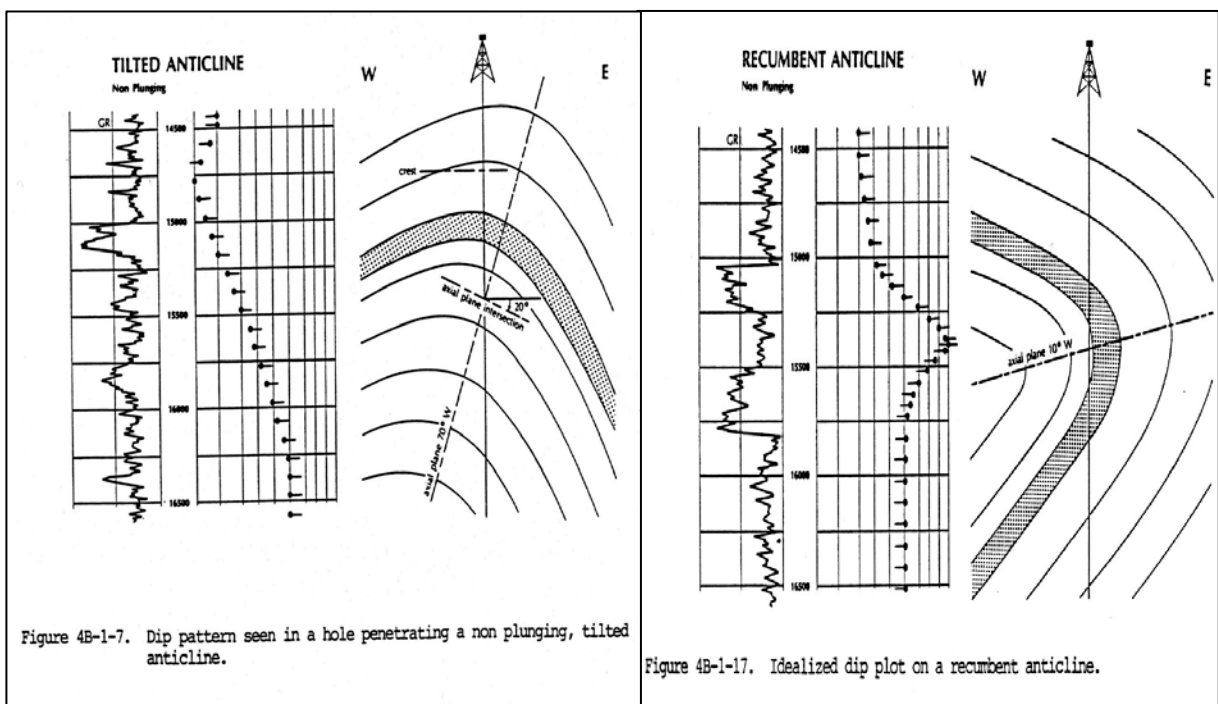


**Fuente:** Schlumberger (1970)

4.2.5.1.4 Representación de Pliegues: Un pliegue es la respuesta de deformación de la roca por un esfuerzo. En el registro Dipmeter la configuración de los Tadpoles son aumentos y disminuciones alternadas del buzamiento, en una dirección casi constante. Cuando los azimut son constantes, el buzamiento verdadero corresponde al promedio entre los buzamientos más altos y los más bajos.

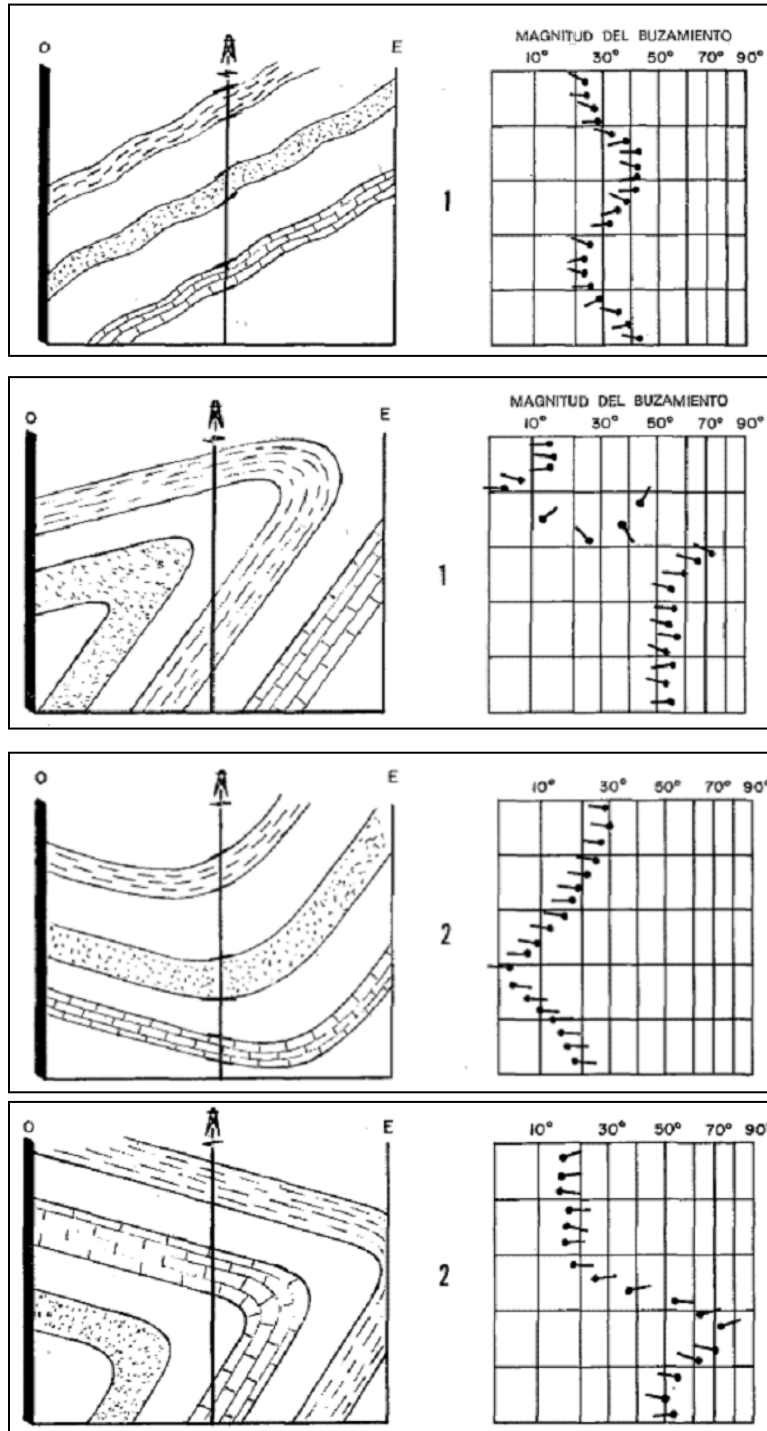
A continuación se muestran diferentes configuraciones para pliegues en el registro Dipmeter. (Ver figura 17).

**Figura 17:** representación gráfica de pliegues en un registro Dipmeter.



**Fuente:** Schlumberger (1970)

Figura 17 (continuación)



Fuente: Schlumberger (1970)

4.2.5.2 Análisis estructural y estratigráfico en el registro Dipmeter por el método SCAT: Otra manera para interpretar la información del registro Dipmeter, es utilizando la metodología del SCAT (Statistical Curvatura Analysis Techniques).

La metodología SCAT está basada en cinco gráficos que son: Angulo de buzamiento Vs dirección de buzamiento, dirección de buzamiento Vs profundidad, ángulo de buzamiento Vs profundidad, sección transversal del ángulo de buzamiento Vs profundidad y sección longitudinal del ángulo de buzamiento Vs profundidad, lo cual cada grafico muestra características que brindan más información para la interpretación de fallas y pliegues.

Las variaciones de buzamiento desde un punto a otro en la superficie y las variaciones en el ángulo de buzamiento como función de la dirección de buzamiento están relacionadas a un aumento en la curvatura en un ambiente estructural.

El aumento de la curvatura y las direcciones estructurales longitudinales y transversales de cualquier ambiente en el pozo puede usualmente ser determinado por análisis estadísticos de la curvatura de los datos del Dipmeter en el pozo.

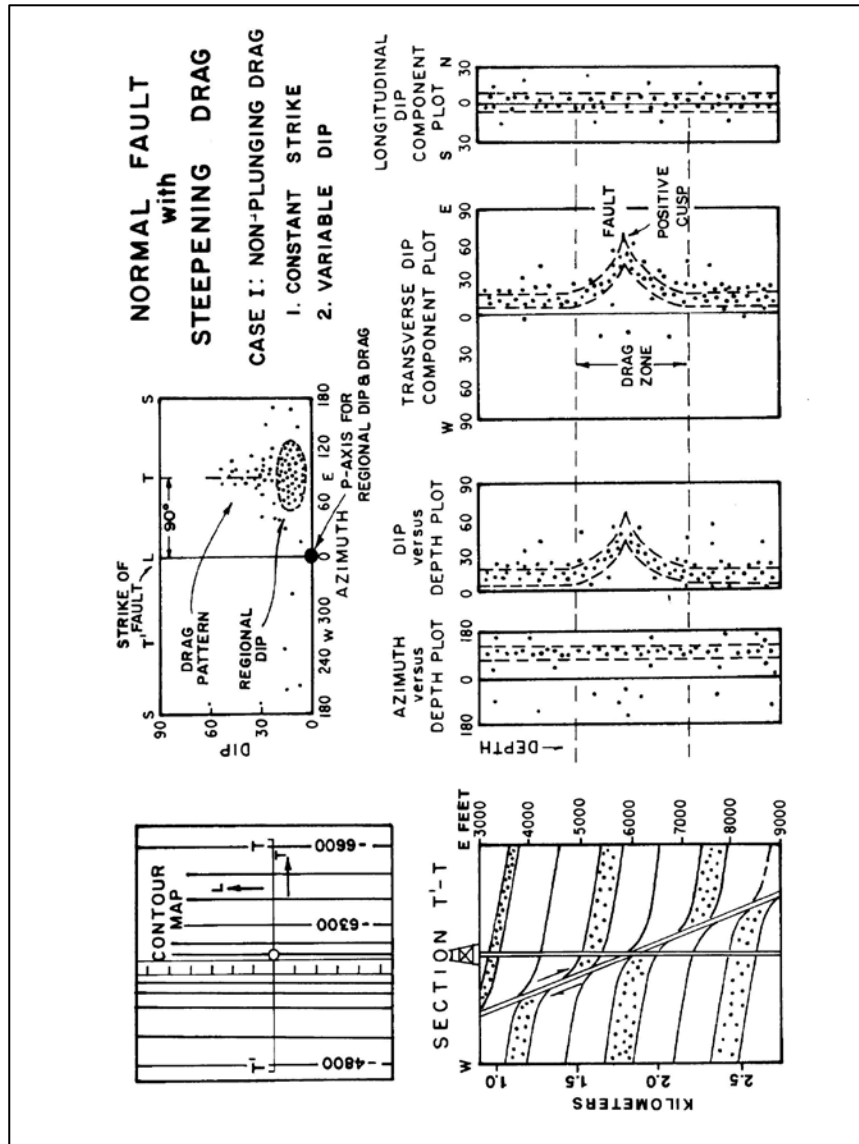
El aumento de la curvatura estructural y las direcciones estructurales longitudinales y transversales proveen el significado para extraer los “reales buzamientos estructurales” de los datos del Dipmeter erráticos o ambiguos, ellos también proveen el significado para calcular el arrastre, el cabeceo de la cresta, hundimientos en las líneas de plegamiento, y el rumbo y dirección de buzamiento de las fallas inversas y normales.

El diagrama tipo Mercator, donde se grafica el buzamiento vs. el azimut de la dirección del buzamiento, los cortes transversales y longitudinales al rumbo de las

capas, muestran características especiales para cada tipo de estructura geológica. (Bengtson, 1981).

A continuación la representación gráfica SCAT de la información del Dipmeter en una falla normal. (Ver figura 18).

**Figura 18:** representación gráfica SCAT de la información del Dipmeter en una falla normal.



Fuente: tomado de Bengtson, 1981.

4.2.5.2.1 Comparación entre el método tradicional y el método SCAT para el registro Dipmeter: La principal diferencia entre la metodología SCAT y la metodología tradicional es el uso en el SCAT de cinco gráficos, mientras que en el método convencional todo se desarrolla en un solo gráfico.

Los patrones de ángulo de buzamiento Vs dirección de buzamiento pueden ser simples o complejos, sin embargo ellos son usualmente más simples y nunca más complejos que los patrones de Tadpoles.

Los gráficos de Tadpoles muestran patrones complejos cuando un pozo cruza un plano cristal pero el gráfico de la componente transversal muestra suaves patrones lineales que cruzan el eje de buzamiento cero. Debido a que el ángulo de buzamiento en el gráfico de Tadpoles no es o positivo o negativo, no hay forma de que una dispersión negativa cancele a una dispersión positiva en una situación de buzamiento horizontal, por lo tanto una zona de buzamiento cero es falsamente percibida como una zona de bajo ángulo de buzamiento con variante en la dirección de buzamiento.

En el gráfico de la componente de buzamiento Vs profundidad la mitad de los puntos caerán a la derecha del eje de buzamiento cero y la otra mitad a la izquierda indicando correctamente un buzamiento promedio cero.

El SCAT determina los datos dentro de las componentes transversales y longitudinales, usando una rotación de buzamiento aritmética, la dirección transversal es definida como la dirección de sección que cruza a través del pozo y muestra los más grandes cambios estructurales, la dirección longitudinal es la dirección que muestra los menores cambios estructurales, estas direcciones son tomadas de la ubicación del ángulo de buzamiento mínimo y máximo en el gráfico de ángulo de buzamiento Vs azimut de buzamiento, ellos son usualmente

direcciones perpendiculares y pueden ser reconocidas por el ojo por análisis estadístico.

El promedio de buzamiento en la componente de dirección longitudinal es cero para ambientes de plegamiento sin cabeceo y es igual al ángulo de cabeceo para ambientes de pliegues con cabeceo.

En ambientes de pliegue inverso con cabeceo el promedio de buzamiento de la componente de dirección longitudinal muestra un buzamiento inverso con la profundidad, la única excepción ocurre en pozos cortados por fallas transversales, sin embargo los gráficos de la componente de buzamiento longitudinal pueden mostrar considerable dispersión en zonas de buzamiento alto.

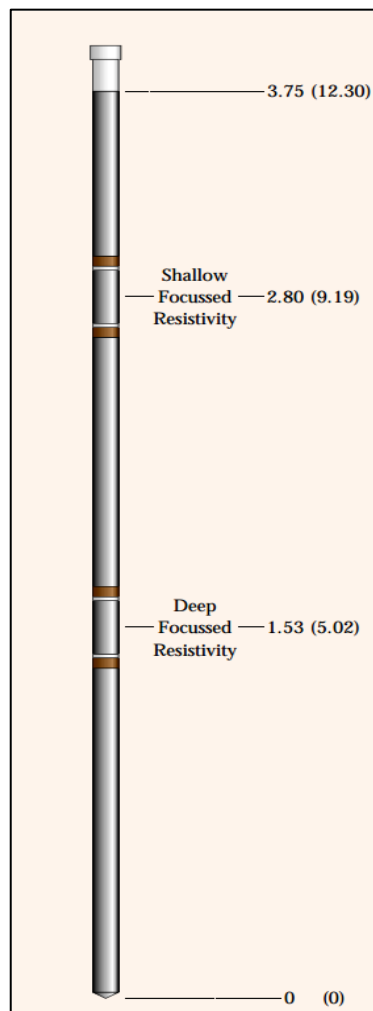
Finalmente debe ser resaltado que el SCAT tiene la capacidad de encontrar la dirección e cabeceo de la cresta y la dirección del plano de falla cuando la falla es conocida. (Crain, 1986).

En la componente transversal Vs profundidad se forma una campana que indica la dirección del plano de falla, cuando la falla es inversa la dirección del plano de falla va en dirección contraria a la formación de la campana, cuando la falla es normal la dirección del plano de falla va en el mismo sentido. (Bengtson, 1981).

#### 4.2.6 Registro Resistividad

En los registros convencionales de resistividad se envían corrientes a la formación a través de unos electrodos y se miden los potenciales eléctricos. La medición de estos potenciales permite determinar las resistividades. Para que haya una circulación de corrientes entre los electrodos y la formación, la sonda debe ser corrida en pozos que contengan lodo o agua (conductores de electricidad). En la figura 19 se ilustra la herramienta para la toma de registro Resistividad.

**Figura 19:** Herramienta para la toma de registro resistividad.



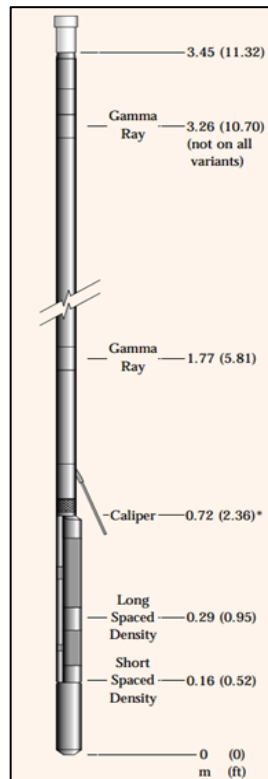
**Fuente:** tomado de Revees wireline services, (1999).

#### 4.2.7 Registro Caliper

La herramienta es un brazo mecánico con una punta endurecida que es abierto e impulsado con un resorte cuando corre hacia arriba dentro del pozo. (Ver figura 20). Como el diámetro de la perforación varia, el brazo se mueve dentro y fuera, causando cambios en la resistencia dentro de la resistencia variable a la cual está conectado mecánicamente.

El registro de Caliper es un aporte de algoritmos en la corrección del tamaño del pozo para otros registros, y se utiliza para controlar la calidad de otras curvas de registro. Este registro se obtiene a través de las sondas de densidad y Dipmeter, ya que el brazo mecánico hace parte de esta herramienta.

**Figura 20:** Herramienta para la toma de registro Caliper



**Fuente:** tomado de Revees wireline services, (1999).

A continuación se ilustra el resumen de los valores dados en los registros geofísicos para las diferentes litologías. (Ver figura 21).

**Figura 21:** Resumen de los valores dados en los registros geofísicos de diferentes litologías.

		GAMMA RAY		DENSITY		SONIC		POROSITY		RESISTIVITY Ω-M			
		0	API 150	1.0	GM/CC 3.0	140	μS/FT 40	50	SST PU 0	0	10	100	1000
SHALE	MARINE												
	NON-MARINE												
COAL	BITUMINOUS												
	INFERIOR												
	LIGNITE												
	ANTHRACITE												
SANDSTONE	POROUS												
	TIGHT												
SILTSTONE													
EVAPORITES	GYPSUM												
	SALT												
	ANHYDRITE												
LIMESTONE	POROUS												
	TIGHT												

**Fuente:** tomado de Firth D. (1994).

## **5. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

### **5.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El tema y área de interés, fue definido en conjunto con el tutor por parte de la empresa. Fue establecido un cronograma de actividades para los 6 meses de la práctica con la empresa Carbones del Cerrejón Limited.

### **5.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se recopiló y analizo la información bibliográfica referente a interpretación de registros geofísicos en secuencias sedimentarias. el material bibliográfico comprende publicaciones de schlumberger, wiley-black well, reeves technologies limited, artículo de bengtson, cursos, tesis de pregrado de estudiantes de geología de la universidad industrial de santander y estudios y documentos internos de la empresa carbones del cerrejón.

### **5.3 SELECCIÓN DE REGISTROS GEOFÍSICOS**

Se definió la cantidad de registros geofísicos a estudiar de los pozos perforados en campañas de exploración de años anteriores, teniendo en cuenta el tipo de perforación. Se analizaron los pozos en zonas de fallas, y pozos que mostraran grandes cambios en los registros geofísicos.

Para el estudio se tuvieron en cuenta 18 pozos de tipo ticónico y diamantino HQ3 ubicados en los tajos Patilla y Tabaco. Para el análisis de las curvas de los registros densidad, Dipmeter, gamma Ray, susceptibilidad magnética, Caliper se utilizaron la información de los dos tipos de perforación, mientras para el registro de resistividad se utilizó la información de los pozos de diamantino HQ3.

#### **5.4 RECONOCIMIENTO DE HERRAMIENTAS DE TOMA DE REGISTROS**

En este aparte se enseñó cómo funcionan las diferentes sondas utilizadas durante las campañas de exploración, de las cuales se obtienen los diferentes registros geofísicos.

#### **5.5 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS**

En este aparte se procesaron los archivos .LAS en el software Well Cad y se generó los registros para su interpretación. Se importaron los archivos .LAS del Dipmeter y se procesaron en Excel para generar los cinco perfiles obtenidos por la metodología SCAT para comparar e interpretar el registro Dipmeter por las dos metodologías.

Con base a la información bibliográfica, los núcleos, rípios de perforación, y los registros geofísicos tomados para el estudio se determinó los parámetros de control y de respuesta de dichos registros para la Formación Cerrejón en las áreas de estudio.

#### **5.6 DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA**

Se tomó el pozo 1 y se interpretó el registro Dipmeter por la metodología tradicional, de este se usó el registro Caliper para controlar la calidad de la información, seguidamente se interpretó los datos de Dipmeter por la metodología SCAT luego de ver ambas metodologías se decidió usar la metodología SCAT por dar mucho más detalle en las zonas anómalas. En caso que hubieran cambios de aumento y disminución en la magnitud de buzamiento en el gráfico de corte transversal al rumbo se obtuvieron anomalías que fueron catalogadas como posibles fallas o discordancias, en caso de aumento y disminución progresiva en la magnitud de buzamiento en el gráfico de corte transversal al rumbo se

obtuvieron anomalías que fueron catalogadas como posibles pliegues. Posteriormente se hizo la sección geológica perpendicular al buzamiento de las capas en el pozo para mirar si había otros indicios geológicos que corroboraran la falla, discordancia o pliegue.

Posteriormente se interpretó las curvas de los registros Densidad, Gamma Ray y Resistividad en conjunto (a este registro se le llamó litológico), en el registro de Densidad se determinó la existencia o no de mantos de carbón en el pozo debido a que los valores de densidad son muy bajos y fácil de reconocer, seguidamente se corrobora la existencia de los mantos de carbón con el registro Gamma Ray ya que este registro muestra el mismo comportamiento, es decir los valores son bajos pero este registro no sirve para la delimitación de los contactos litológicos ya que tiene mala resolución vertical. Una vez ubicados los mantos de carbón se usó el registro de resistividad para determinar la calidad del carbón es decir si el carbón presentaba fracturamiento, Parting o estaba meteorizado. Finalmente se interpretó el registro de susceptibilidad magnética para la determinar la existencia o no de zonas de Clinker.

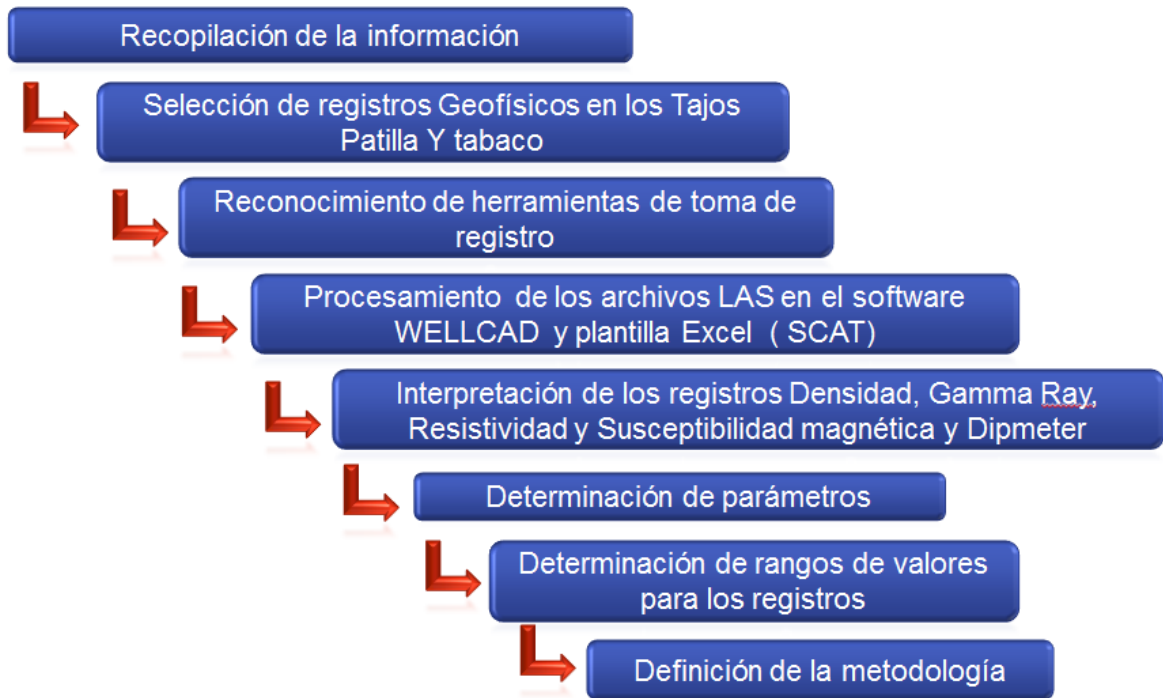
Terminado el análisis hasta este punto se procedió a interpretar los otros pozos del área de estudio de la misma manera. Esto dio como resultado los valores mínimos y máximos de los registros de Gamma Ray, Densidad, resistividad y Susceptibilidad Magnética para cada manto identificado en toda la zona de estudio así como las litologías principales, estos valores fueron promediados para determinar los rango de valores representativos para los mantos de carbón existentes en los tajos Patilla y Tabaco en la mina Carbones del Cerrejón.

## **5.7 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS E INFORME FINAL.**

Una vez elaborada la metodología de interpretación de los registros geofísicos Gamma Ray, Caliper, Dipmeter, Resistividad, Susceptibilidad magnética y

Densidad para la Formación Cerrejón, se realizó una presentación con los resultados, conclusiones y recomendaciones del estudio realizado. Posteriormente se dispuso de un tiempo para terminar el informe final que se expuso a la universidad, con el fin de obtener el título de Geóloga.  
(Ver figura 22).

**Figura 22:** Esquema de la metodología.



**Fuente:** Autor.

## **6. OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA INTERPRETATIVA DE REGISTROS GEOFÍSICOS EN EXPLORACIÓN CARBONÍFERA**

Para la correcta identificación de un estrato, capa o manto de carbón es necesario un análisis detallado de las curvas de Densidad, Gamma Ray, Sónica, Susceptibilidad Magnética, Resistividad, Dipmeter y Caliper de los registros geofísicos. Cada tipo de roca exhibe características propias que permiten su identificación.

### **6.1 REGISTRO DIPMETER**

Este registro es importante para definir estructuras geológicas en áreas complejas tectónicamente. Para la interpretación del registro Dipmeter se hace en la dirección en la que aumenta la profundidad. Actualmente la metodología para la interpretación del Dipmeter se hace marcando con líneas rectas de color verde las zonas que muestren y representen el buzamiento estructural de la secuencia sedimentaria. En 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. (Ver figura 23).

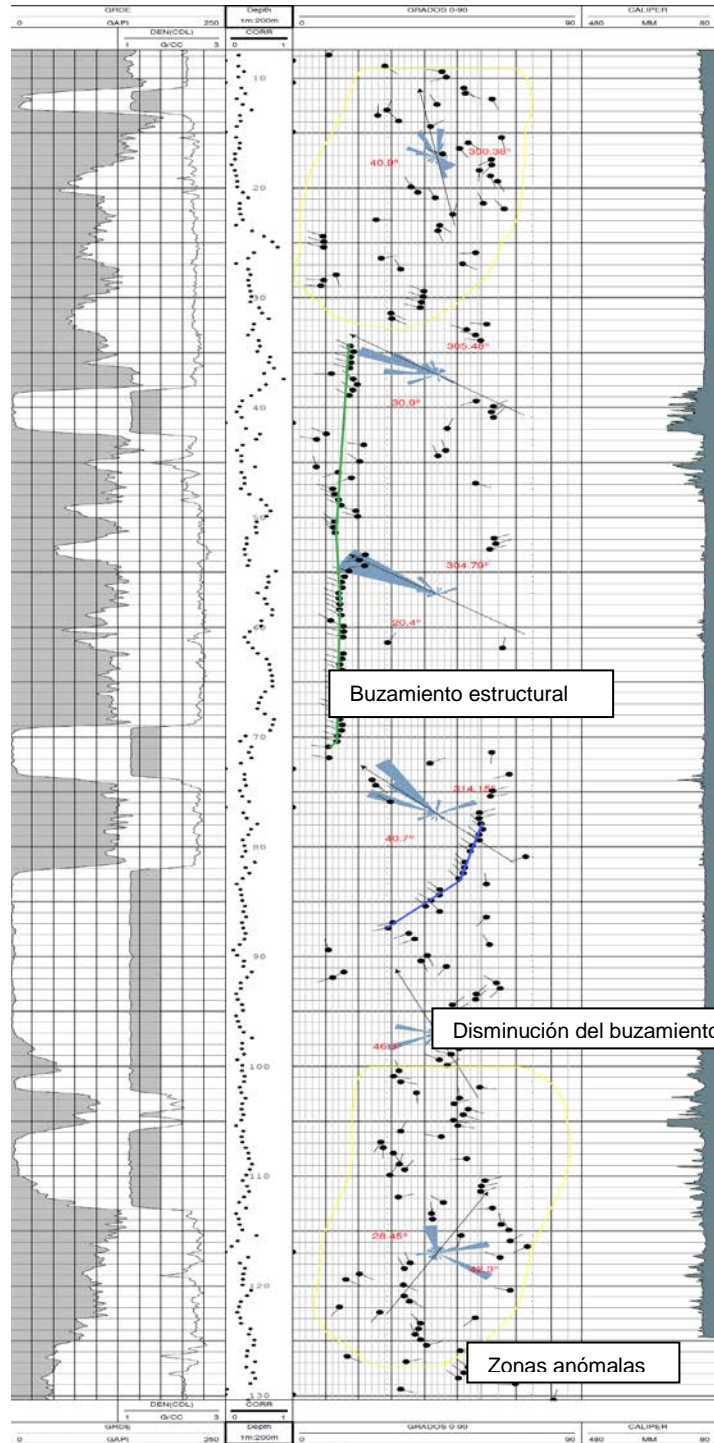
Para la interpretación del registro Dipmeter se debe conocer la geología en el área (estratigrafía, geología estructural, etc). Un cambio en el buzamiento estructural indica una anomalía, que puede ser interpretada como presencia de falla, pliegue, discordancia o discontinuidad. Con la información geológica del área y el registro, el geólogo podrá determinar la tectónica en el pozo.

Para hacer la interpretación del registro Dipmeter se analizaron los registros físicos Dipmeter y los resultados obtenidos por la metodología SCAT. La metodología SCAT está basada en cinco gráficos que son: Ángulo de buzamiento Vs dirección de buzamiento, dirección de buzamiento Vs profundidad, ángulo de buzamiento Vs profundidad, sección transversal del ángulo de buzamiento Vs profundidad y sección longitudinal del ángulo de buzamiento Vs profundidad, lo cual cada gráfico muestra características que brindan más información para la interpretación de fallas y pliegues, como la identificación de la dirección del plano de falla en la sección transversal del ángulo de buzamiento Vs profundidad y conocer si presenta o no cabeceo el pliegue en la sección longitudinal del ángulo de buzamiento Vs profundidad.

El parámetro de control en el registro Dipmeter es quitar los valores no reales al momento de procesarlo en Excel.

La corroboración de las principales fallas presentes en la zona de estudio se hizo mediante los datos geológicos existentes.

Figura 23: Registro Dipmeter interpretado.



Fuente: Autor

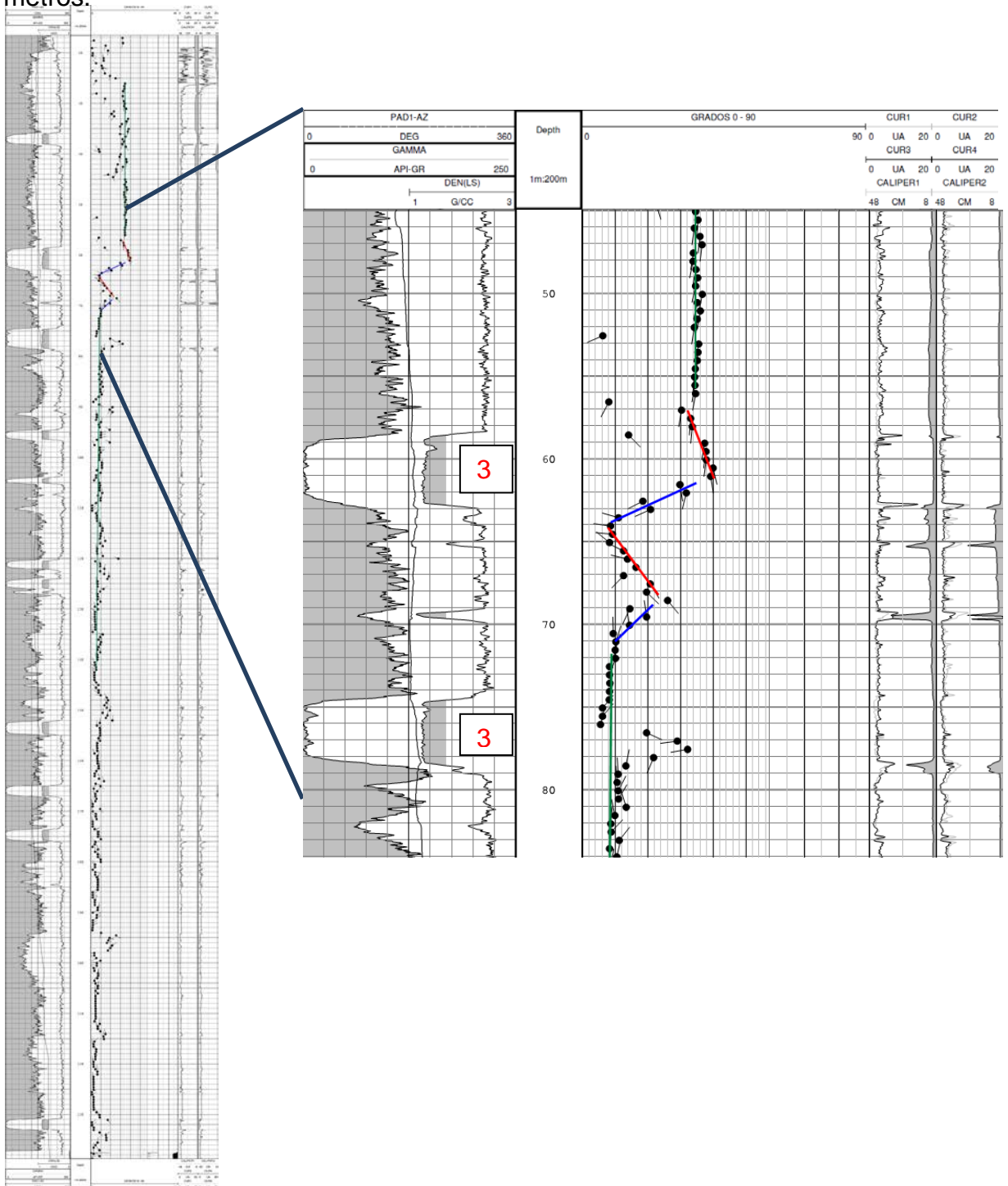
Los siguientes registros geofísicos muestran algunas de las configuraciones de falla inversa para el registro Dipmeter en cinco pozos perforados en la formación Cerrejón.

### **Interpretación Pozo 1**

La figura 24 muestra un patrón del buzamiento estructural que varía entre 0-15 grados. Entre 0 y 60 metros, se observa un buzamiento que varía entre 30 y 35 grados y una dirección de buzamiento alrededor de 180 grados; entre los metros 61 y 64 se observa una disminución de la magnitud de buzamiento; entre los metros 62 y 69 se refleja la anomalía de los Tadpole indicando la posible ubicación de la zona de falla inversa, ya que se observa cambios entre el buzamiento y la dirección de buzamiento, repitiéndose la secuencia. Finalmente entre los metros 70 y 236 continúa con el buzamiento estructural.

Se debe tener en cuenta que el pozo este sin problema de derrumbe o cavernas, Las condiciones de las paredes del pozo se observan con el registro Caliper.

**Figura 24:** Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 68 metros.

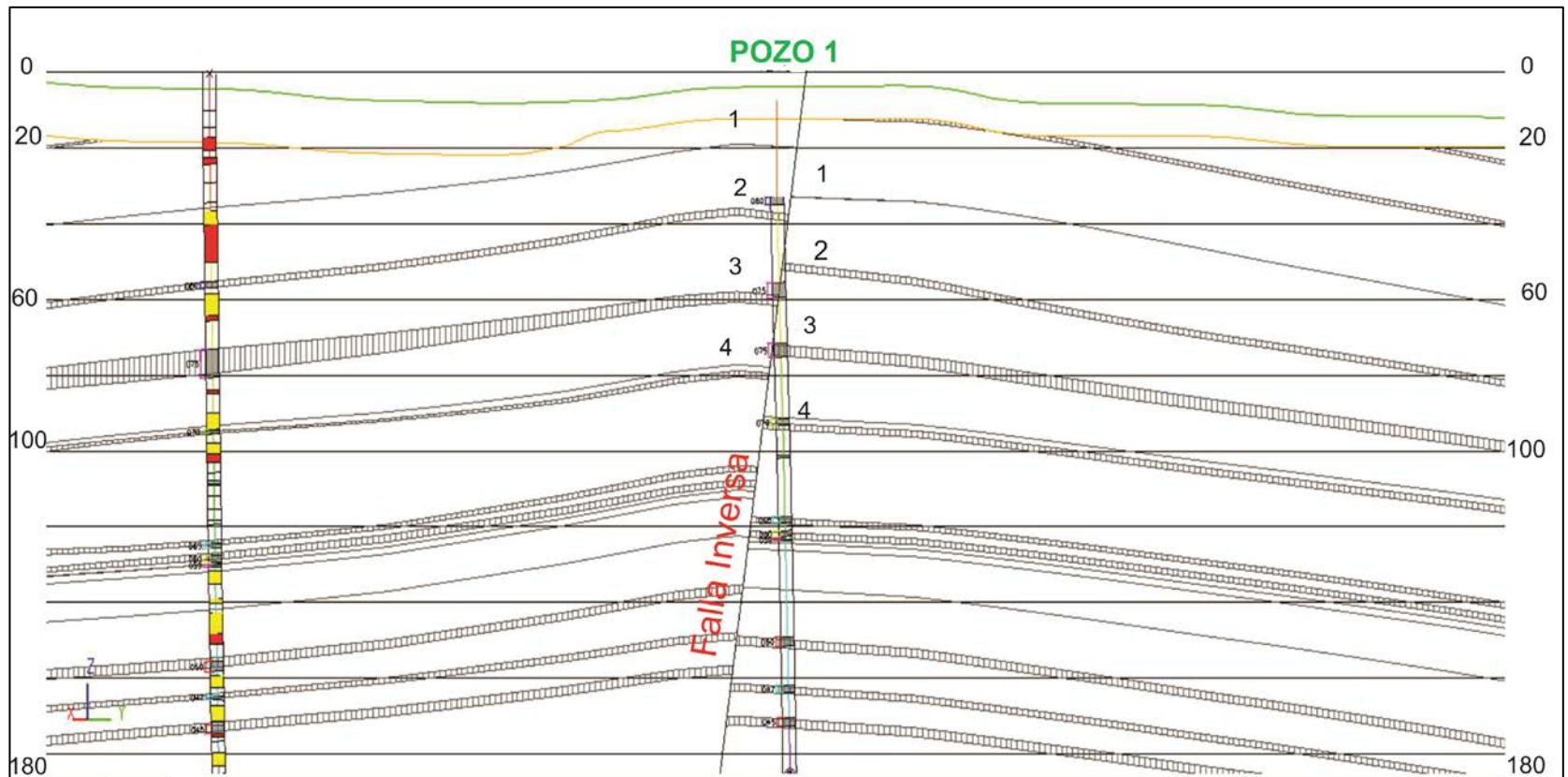


Fuente: Autor



La corroboración de la falla inversa presente en el pozo 1 se hizo mediante los datos geológicos existentes. (Ver figura 26).

**Figura 26:** sección transversal en la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. Se observa repetición de la secuencia en el manto 3.

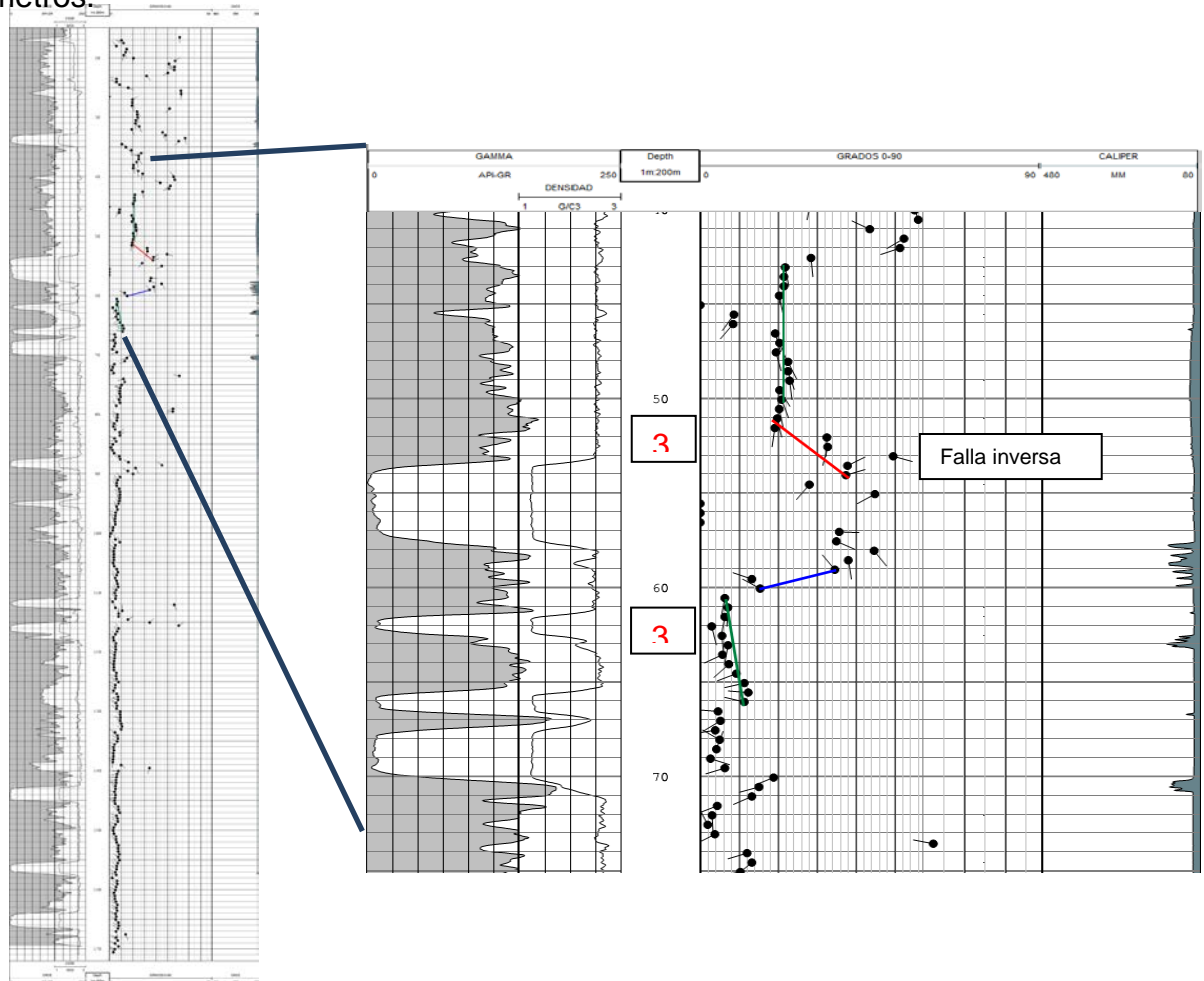


**Fuente:** Autor

## Interpretación Pozo 2

El registro Dipmeter, muestra el patrón del buzamiento estructural que varía entre 0 y 15 grados; en la profundidad entre 52 y 60 metros se observa una anomalía, donde se refleja la posible zona de falla inversa, la magnitud de buzamiento aumenta y disminuye, en aproximadamente 56 metros hay tres Tadpoles con buzamiento incoherente, indicando la posible falla inversa. Se debe tener en cuenta las condiciones del pozo, las condiciones de las paredes del pozo se observa con la curva del Caliper. (Ver figura 27).

**Figura 27:** Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 56 metros.

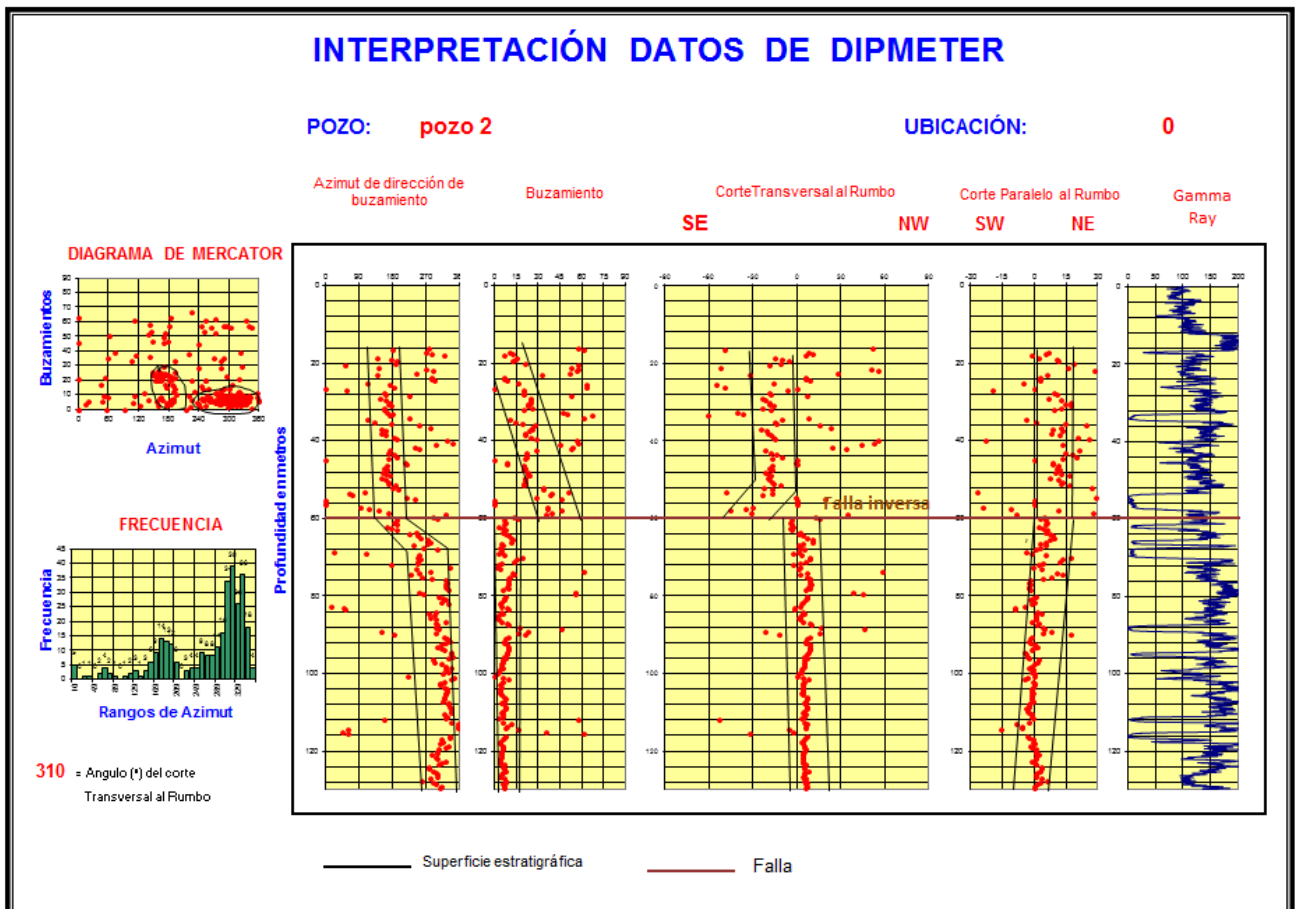


Fuente: Autor

## Pozo 2: Carbones del Cerrejón – SCAT

En el corte transversal al Rumbo se refleja que el pozo atraviesa el flanco SE de la estructura, así mismo se observa a 60 metros la dirección del plano de falla inversa hacia el NW, ya que la media campana que se forma está en el cuadrante SE, como se conoce que es una falla inversa la dirección del plano de falla va en dirección contraria. Luego el pozo atraviesa el flanco NW de la estructura. Los buzamientos de la estructura son suaves varían entre de 0-15 grados. (Ver figura 28).

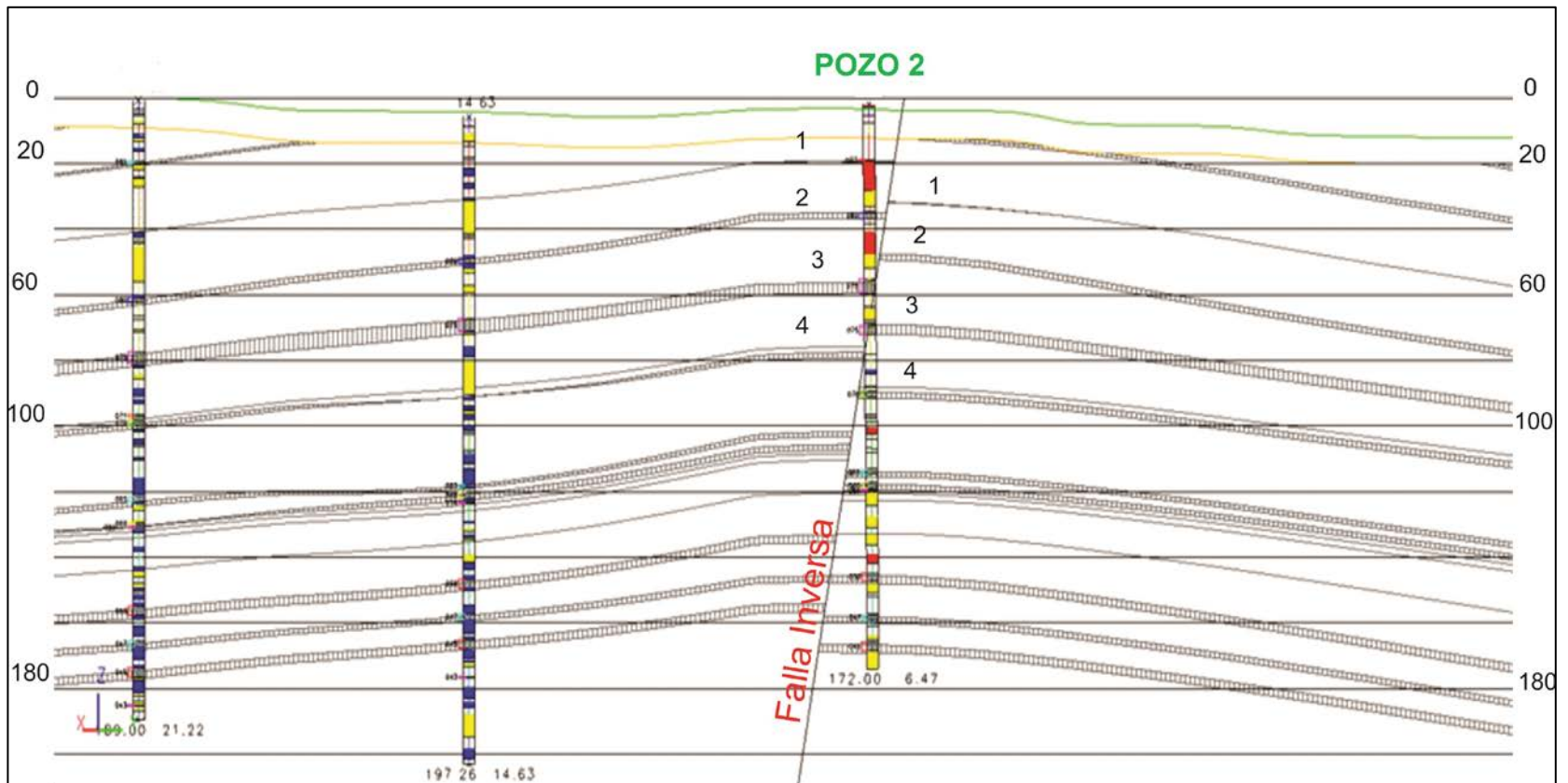
Figura 28: Interpretación de los datos de Dipmeter por la metodología del SCAT.



Fuente: Autor

La corroboración de la falla inversa presente en el pozo 2 se hizo mediante los datos geológicos existentes. (Ver figura 29).

**Figura 29:** sección transversal en la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. Se observa repetición de la secuencia en el manto 3.

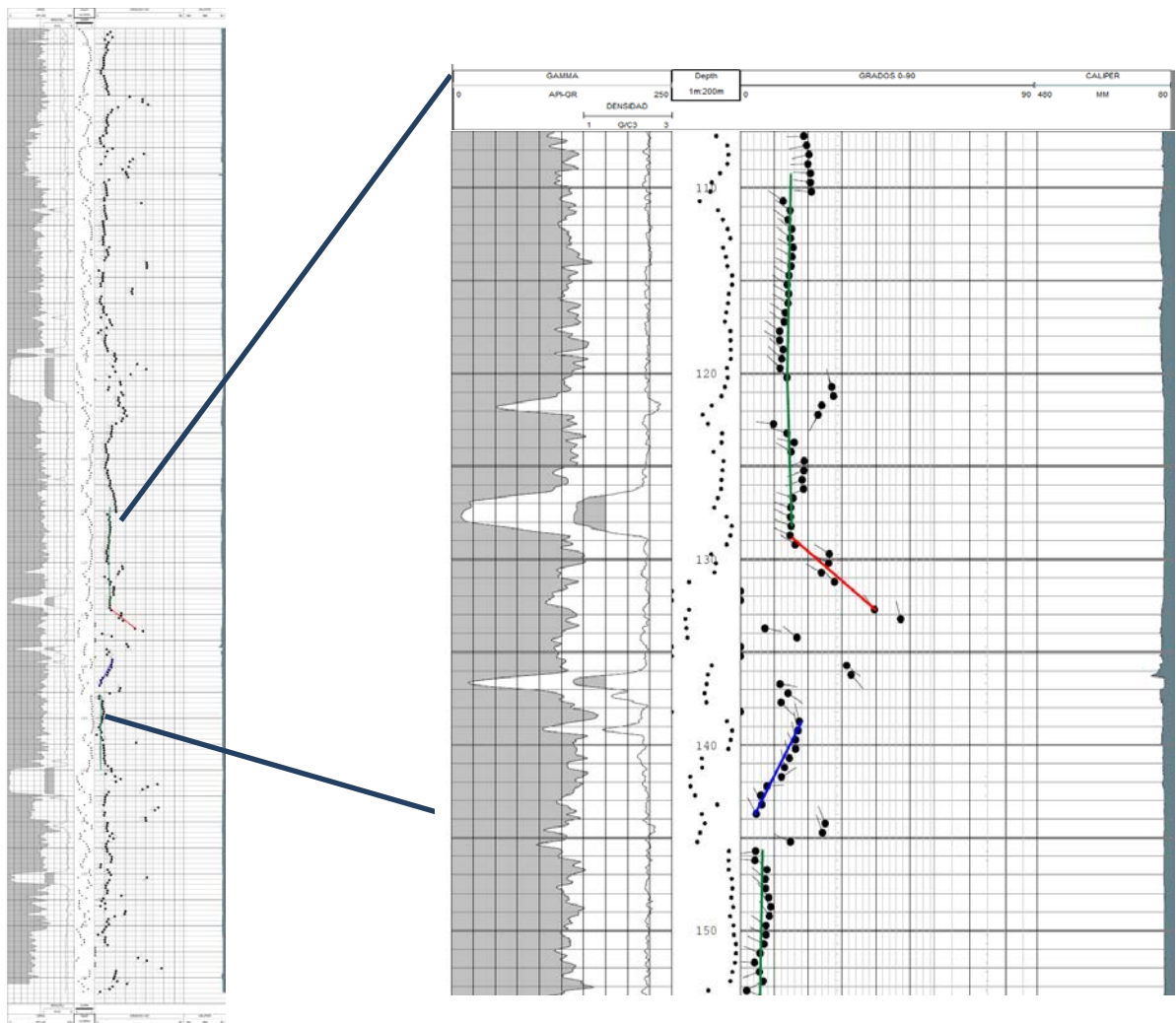


Fuente: Autor

### Interpretación Pozo 3

El registro Dipmeter, muestra el patrón del buzamiento estructural que varía entre 0 y 15 grados, en la profundidad entre 130 y 140 metros se observa una anomalía donde estaría la posible zona de falla. Las condiciones de las paredes del pozo se observa con la curva del Caliper. (Ver figura 30).

**Figura 30:** Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 137 metros.



**Fuente:** Autor

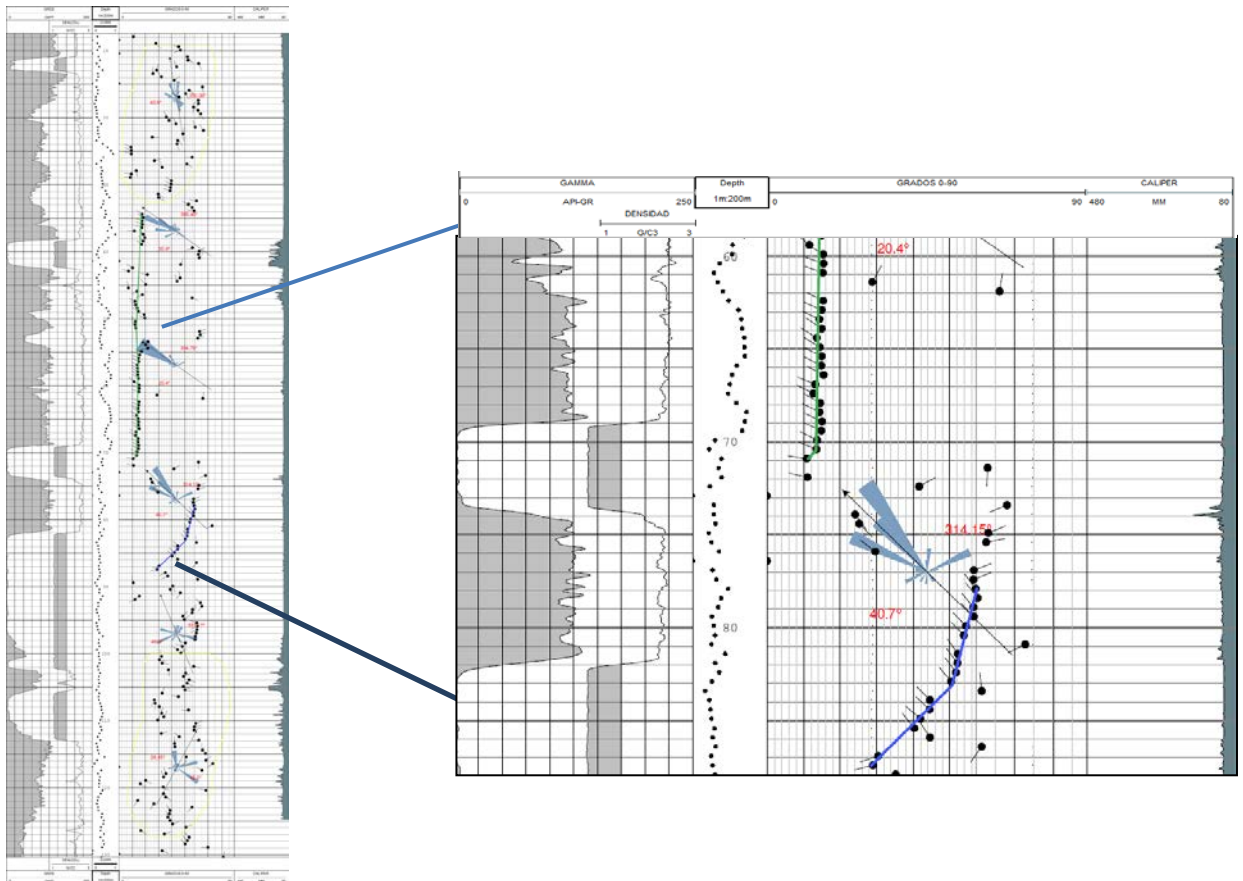




### Interpretación Pozo 4

El registro Dipmeter, muestra el patrón del buzamiento estructural que varía entre 0 y 20 grados; aunque las condiciones de las paredes del pozo no son buenas, en la profundidad entre 72 y 75 metros se observa una anomalía, donde se refleja la posible falla inversa, la magnitud de buzamiento aumenta bruscamente, posteriormente la magnitud de buzamiento disminuye progresivamente. Hacia el final del pozo, no es confiable la información ya que el pozo se encuentra derrumbado, las condiciones de las paredes del pozo se observa con la curva del Caliper. (Ver figura 33).

**Figura 33:** interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 75 metros.

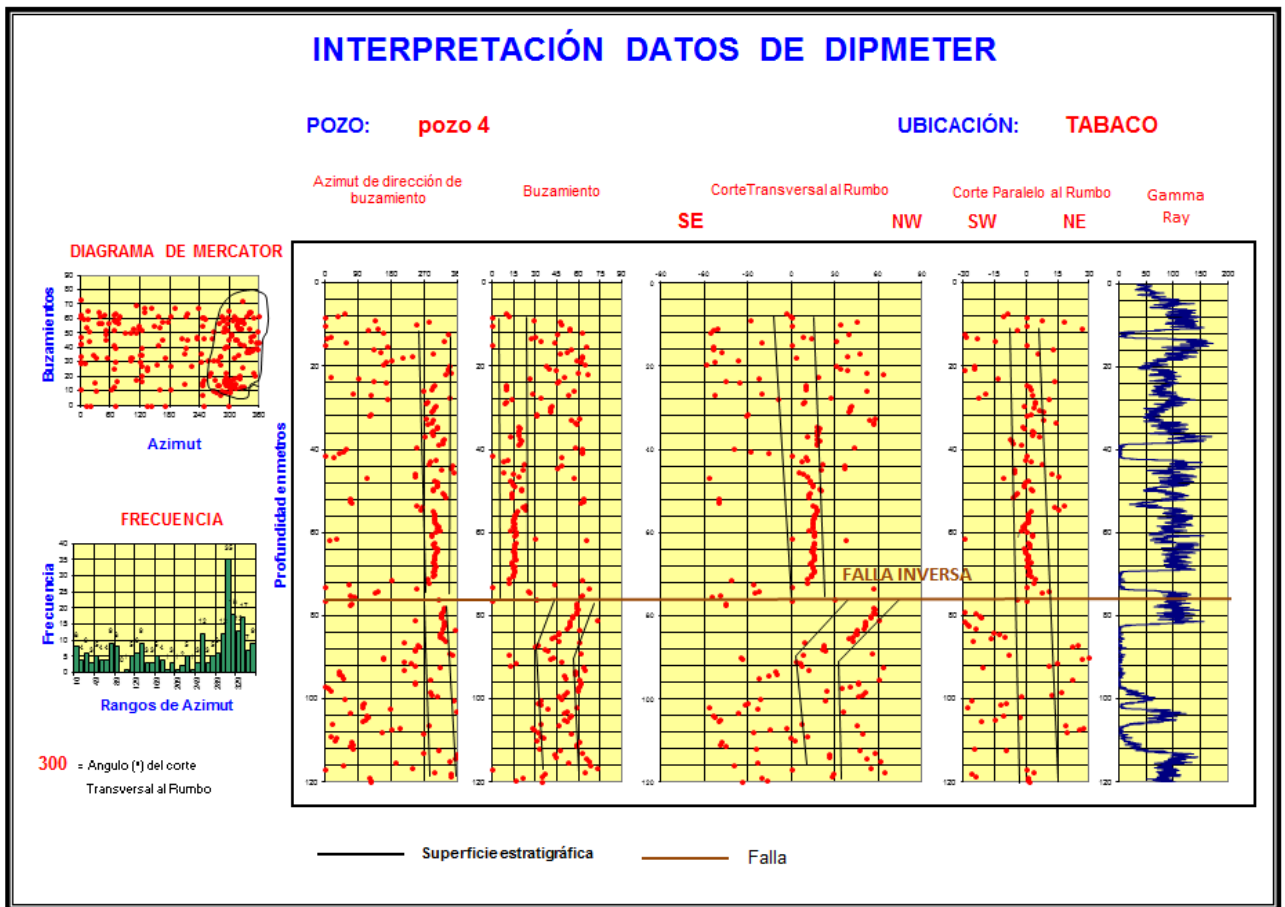


**Fuente:** Autor

### Pozo 4: Carbones del Cerrejón - SCAT

En el corte transversal al Rumbo se refleja que el pozo atraviesa el flanco NW de la estructura, así mismo se observa a 75 metros la dirección del plano de falla inversa hacia el SE, ya que la media campana que se forma en el corte transversal al rumbo está en el cuadrante NW y por ser una falla inversa la dirección del plano de falla va en sentido contrario. Los buzamientos de la estructura son suaves varían entre de 0-20 grados. (Ver figura 34).

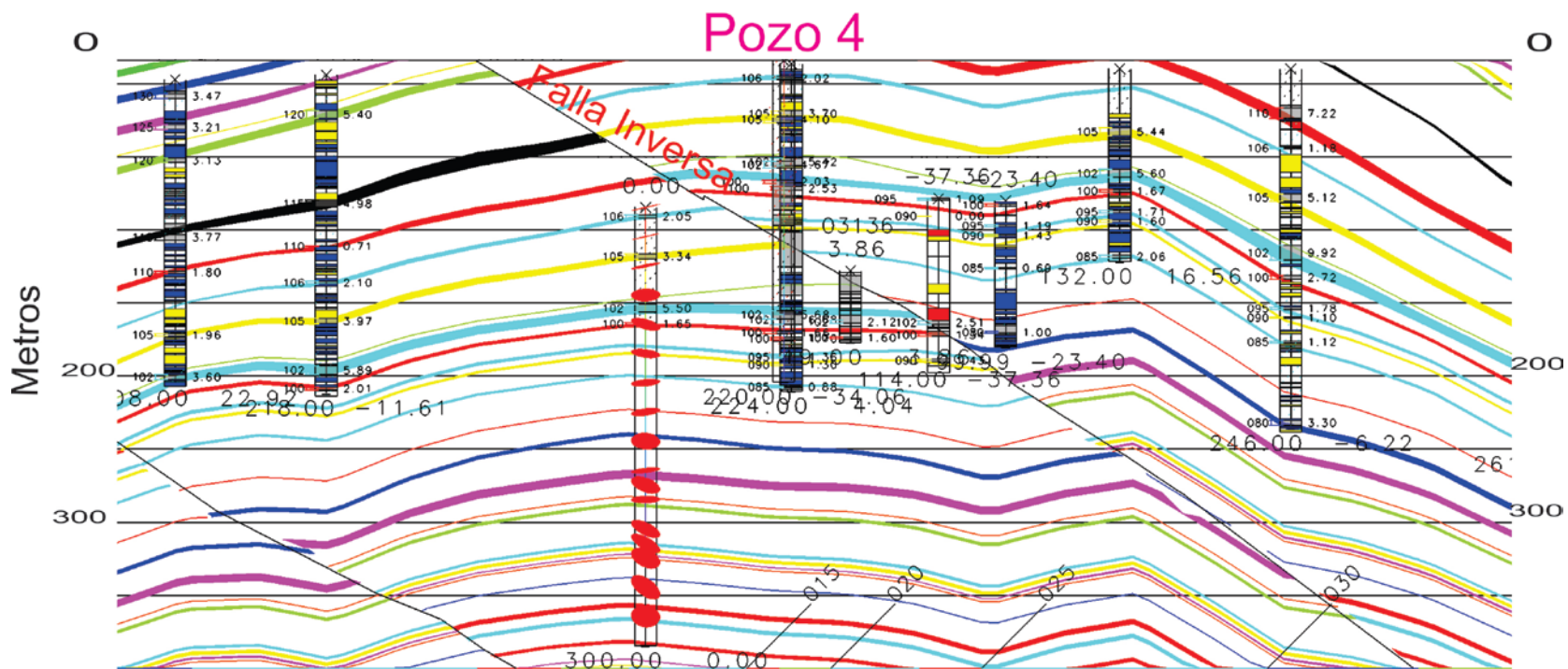
**Figura 34:** Interpretación de los datos del Dipmeter por la metodología del SCAT.



Fuente: Autor.

La corroboración de la falla inversa presente en el pozo 4 se hizo mediante los datos geológicos existentes. (Ver figura 35).

**Figura 35:** sección transversal en la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. Se observa repetición de la secuencia en el manto color amarillo.

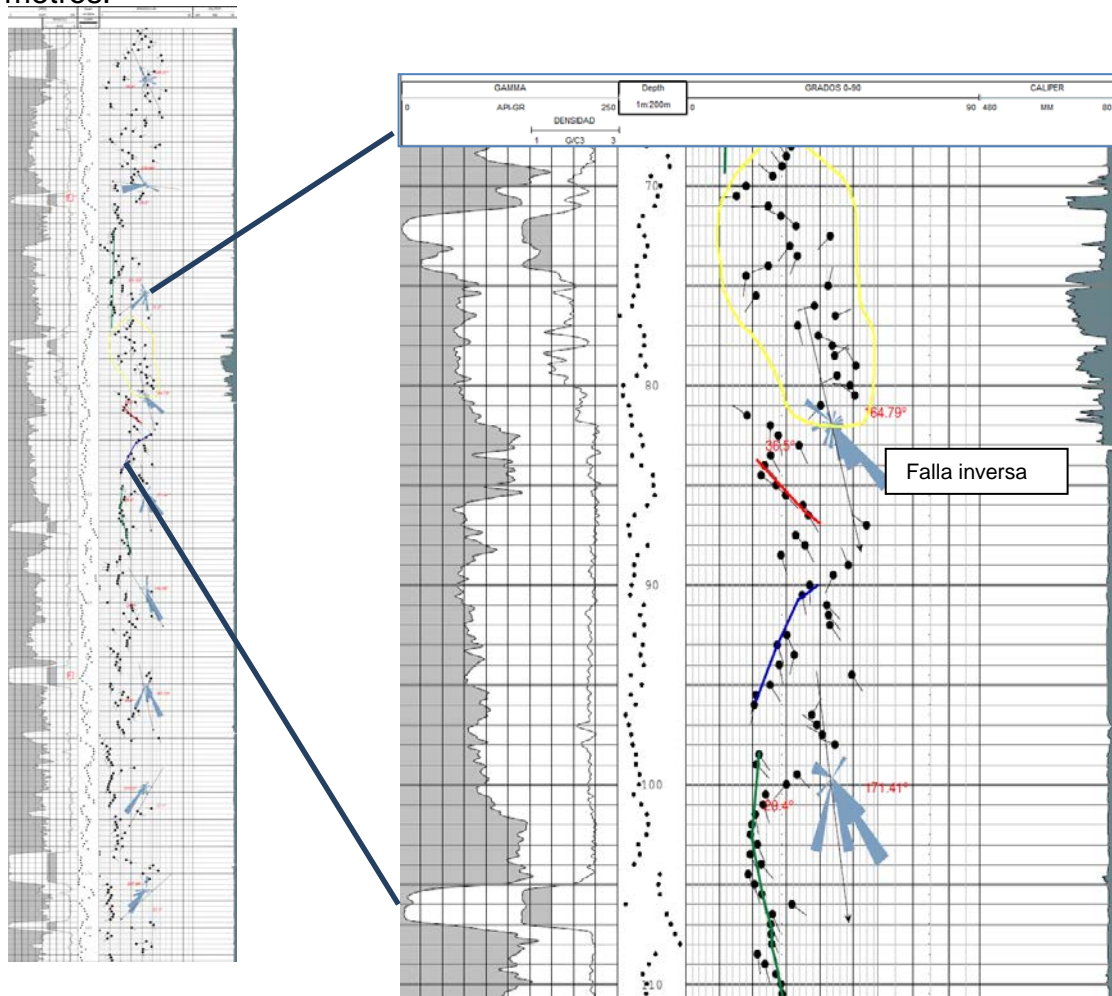


Fuente: Autor

## Interpretación Pozo 5

El registro Dipmeter, no muestra el patrón del buzamiento estructural, ya que la litología que se encuentra en el pozo, muestra cambios estratigráficos, como las areniscas la estratificación cruzada, y además no se encuentra en buenas condiciones las paredes del pozo, como lo muestra la curva del Caliper. A 90 metros esta la anomalía que muestra posible falla inversa, el buzamiento aumenta y disminuye progresivamente; la interpretación se basa en la interpretación de la metodología SCAT y repetición de los mantos de carbón. (Ver figura 36).

**Figura 36:** Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla inversa a 90 metros.

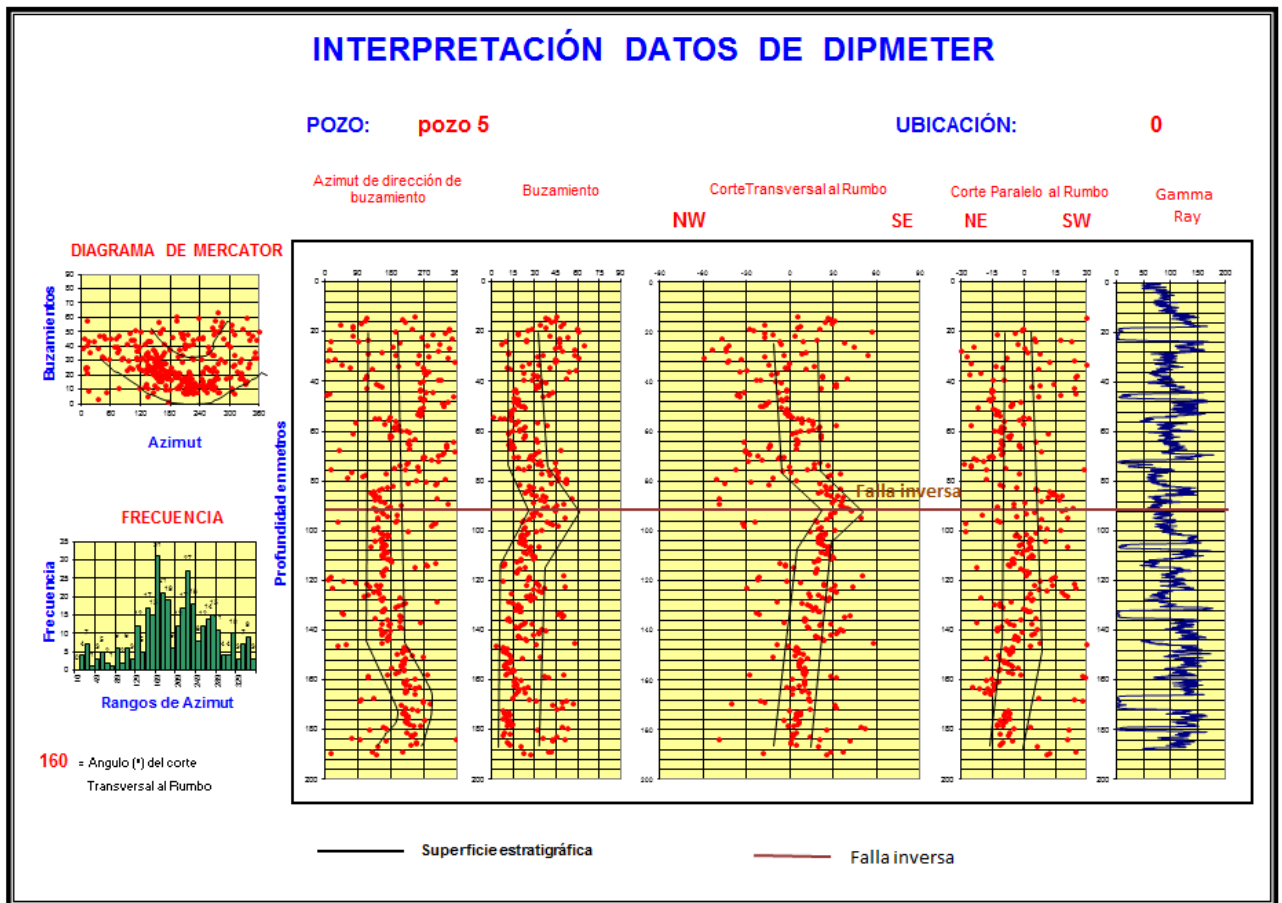


Fuente: Autor

### Pozo 5: Carbones del Cerrejón - SCAT

En el corte transversal al Rumbo se refleja que el pozo atraviesa el flanco SE de la estructura, así mismo se observa a 90 metros la dirección del plano de falla inversa hacia el NW, ya que la cúspide que se forma indica la dirección del plano de falla. En el diagrama de Mercator y en el corte paralelo al rumbo se identifica que el pliegue tiene doble cabeceo. Los buzamientos son moderados varían entre de 10-25 grados. (Ver figura 37).

**Figura 37:** Interpretación de los datos del Dipmeter por la metodología del SCAT.



Fuente: Autor



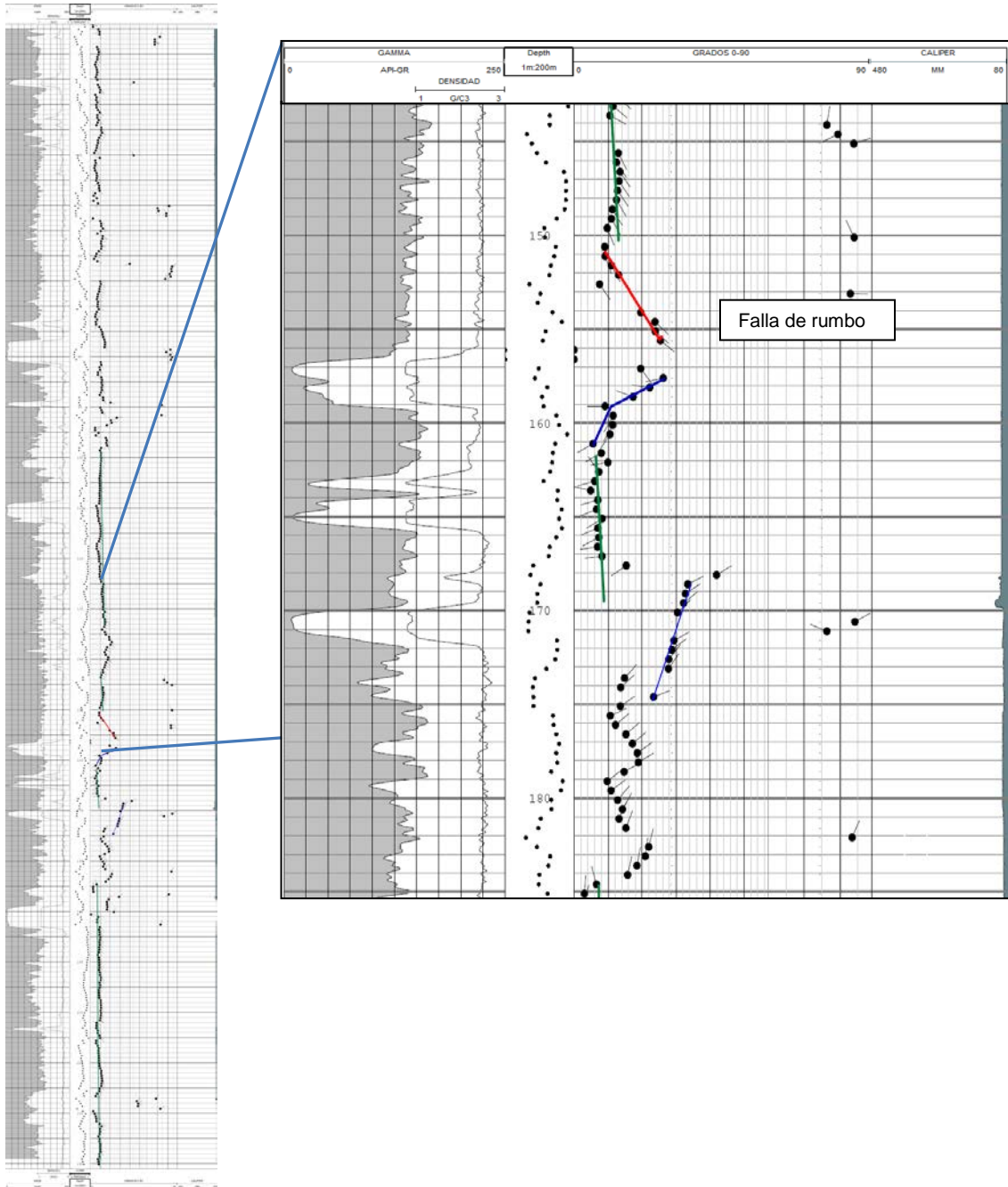
En el yacimiento Carbones del Cerrejón, la tectónica del área es compresiva, por lo tanto no se encuentran fallas normales, la configuración de los Tadpoles para una falla normal es igual a una falla inversa, para la identificación de la falla normal se correlacionan los perfiles estratigráficamente y si hay ausencia de una parte de la secuencia, se tendría una falla Normal.

Los siguientes registros geofísicos muestran algunas de las configuraciones de falla de rumbo para el registro Dipmeter en dos pozos perforados en la formación Cerrejón.

### **Interpretación Pozo 6**

El registró Dipmeter, muestra el patrón del buzamiento estructural; en la profundidad entre 150 y 160 metros se observa una anomalía; la magnitud de buzamiento aumenta y disminuye progresivamente, en 157 metros hay dos Tadpoles con buzamiento incoherente, donde muestra que cruza la falla de rumbo. En 168 metros hay un cambio abrupto de la magnitud del buzamiento, siendo esto otra anomalía, que se interpreta como un pliegue, ya que no hay ni ausencia o repetición de la secuencia. Se debe tener en cuenta que el pozo este sin problema de derrumbe, Las condiciones de las paredes del pozo se observa con la curva del Caliper. (Ver figura 39).

**Figura 39:** Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla de rumbo a 157 metros.

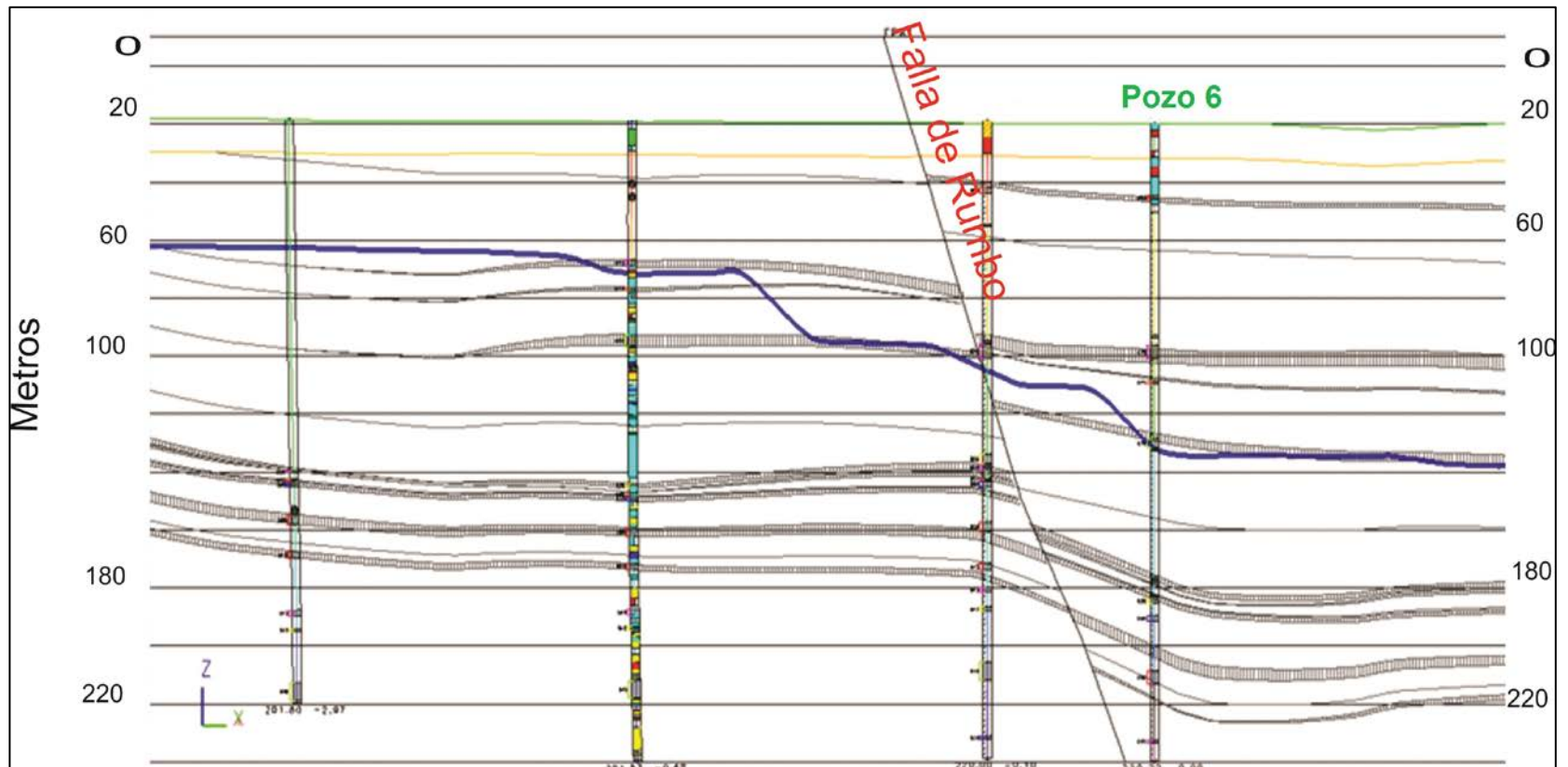


**Fuente:** Autor



La corroboración de la falla inversa presente en el pozo 6 se hizo mediante los datos geológicos existentes. (Ver figura 41).

**Figura 41:** sección transversal a la dirección de buzamiento de los mantos de carbón. El pozo atraviesa la falla de Rumbo a 157 metros.

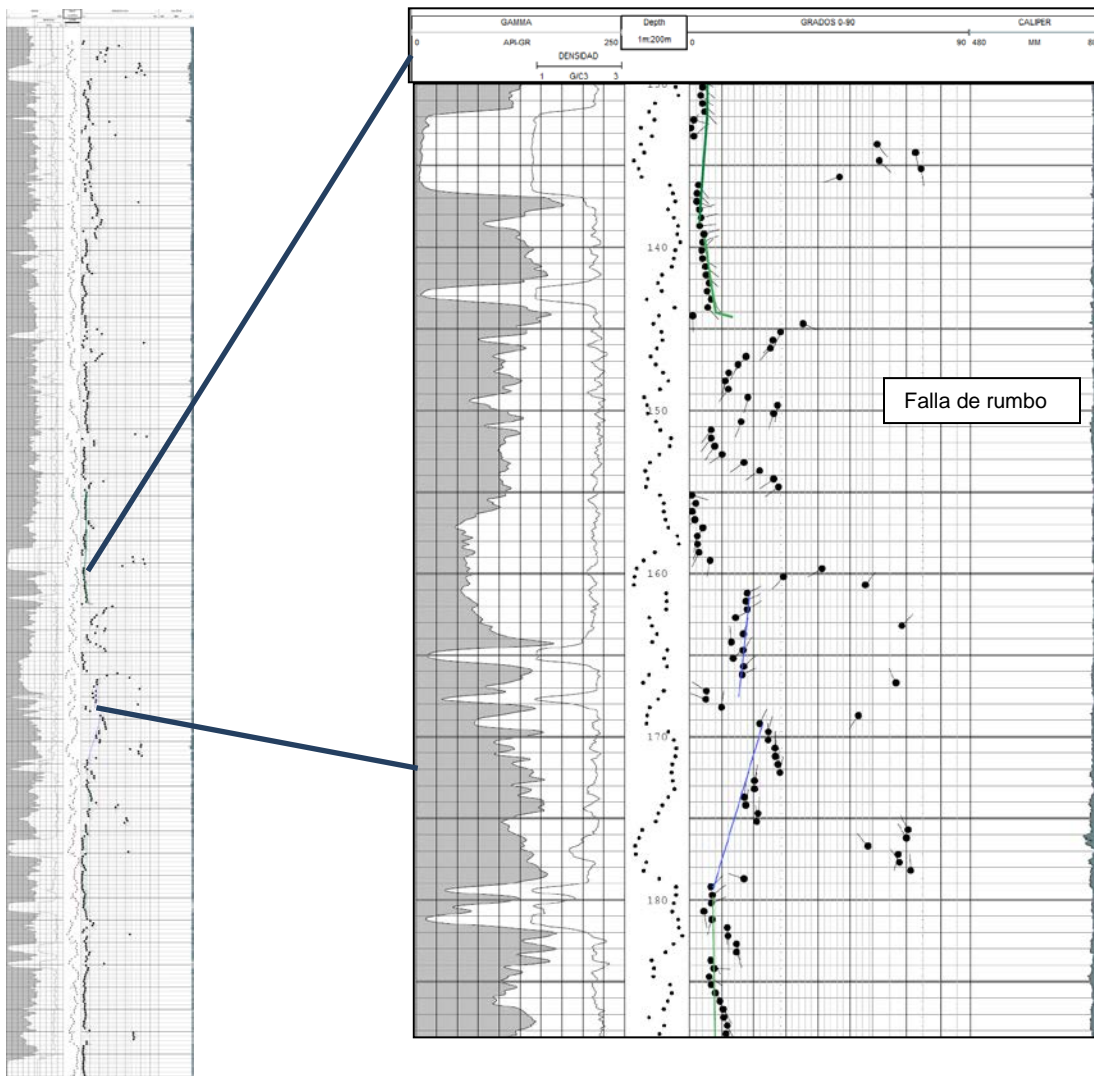


Fuente: Autor

### Interpretación Pozo 7

El registro Dipmeter, muestra el patrón del buzamiento estructural; en la profundidad en 160 metros se observa una anomalía; la magnitud de buzamiento aumenta, donde muestra que cruza la falla de rumbo. Se debe tener en cuenta que el pozo este sin problema de derrumbe, Las condiciones de las paredes del pozo se observa con la curva del Caliper. (Ver figura 42).

**Figura 42:** Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa la falla de rumbo a 160 metros.



Fuente:

Autor

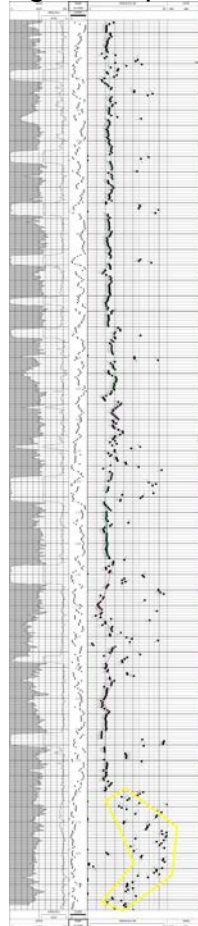


El siguiente registro geofísico muestra algunas de las configuraciones para un pliegue en el registro Dipmeter.

### **Interpretación Pozo 8**

El registró Dipmeter, muestra el patrón del buzamiento estructural; los buzamientos son moderados varían entre 15 y 45, al final del pozo cruza un pliegue, aumenta y disminuye el buzamiento progresivamente, cortando el eje del pliegue. Se debe tener en cuenta que el pozo este sin problema de derrumbe, Las condiciones de las paredes del pozo se observa con la curva del Caliper. (Ver figura 44).

**Figura 44:** Interpretación del registro Dipmeter que atraviesa un pliegue.



**Fuente:** Autor



## 7. REGISTRO LITOLÓGICO

### 7.1 INTERPRETACIÓN REGISTRO GAMMA RAY Y DENSIDAD

Los mantos de carbón en los registros geofísicos, se observan claramente donde se presenta una fuerte disminución en los valores de la radiación Gamma y en la curva de densidad. Los mantos de carbón del yacimiento *Carbones del Cerrejón* presentan valores de gamma Ray que varían en promedio entre 7.91 y 73.57 API. Así mismo la curva de densidad muestra valores muy bajos que varían en promedio entre 1.28 y 1.8 g/cm<sup>3</sup>. (Ver tabla 1).

La curva que mejor define los límites de los mantos es la densidad. Ya que el registro de Gamma Ray por ser su herramienta grande hasta 40cm el tamaño del sensor, la resolución vertical es muy pobre.

Los límites de los mantos de carbón se determinan donde la curva de densidad alcance el valor de 1.8 gr/cm<sup>3</sup>.

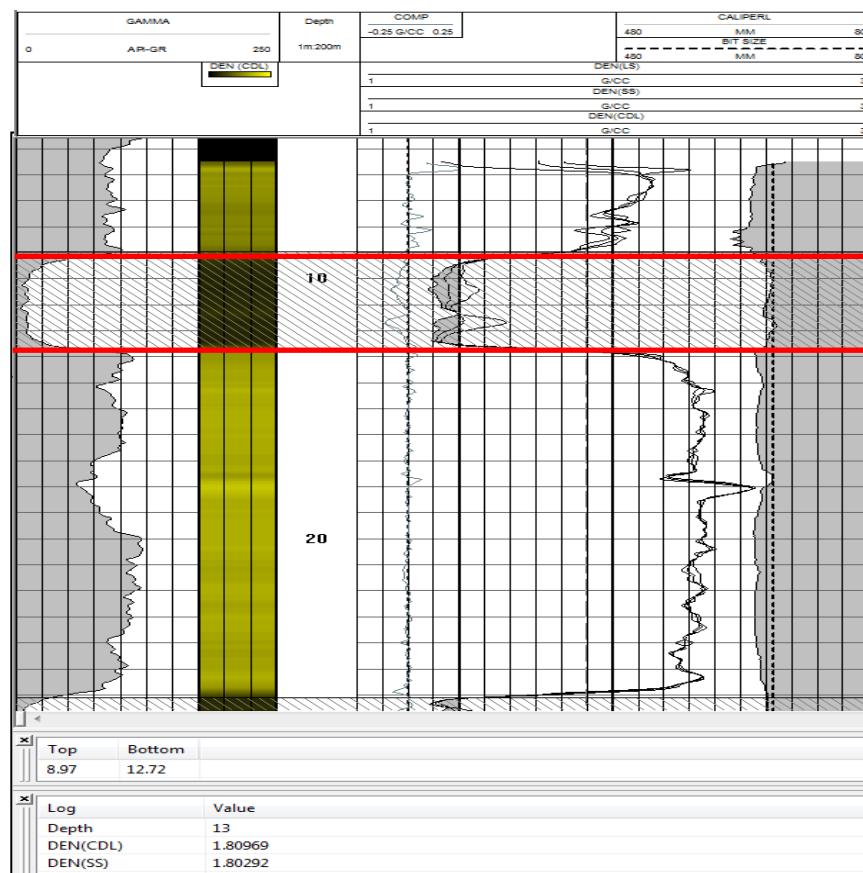
En el caso de las sondas 9239 y 9035, que arrojan 3 curvas de densidad (Long Space Density (LS), Short Space Density (SS), Compensate Density (CDL)), la delimitación de los límites de los mantos de carbón es donde la curva de Densidad Corta (Short Space Density (SS)) intercepte la Densidad Compensada (Compensate Density (CDL)). (Ver Figura 46).

Se pueden presentar situaciones en donde la intercepción de las curvas sea por encima o debajo de 1.8 g/cm<sup>3</sup>; en este caso se establece el límite carbón-estéril en el valor de 1.8 g/cm<sup>3</sup> de la densidad corta, teniendo en cuenta que la compensada se suaviza por la inclinación de los estratos y/o se ve fuertemente

afectada por el tipo de roca que se encuentre de respaldo (se suaviza si es una lodolita y/o se inclina si es una arenisca). (Figura 47).

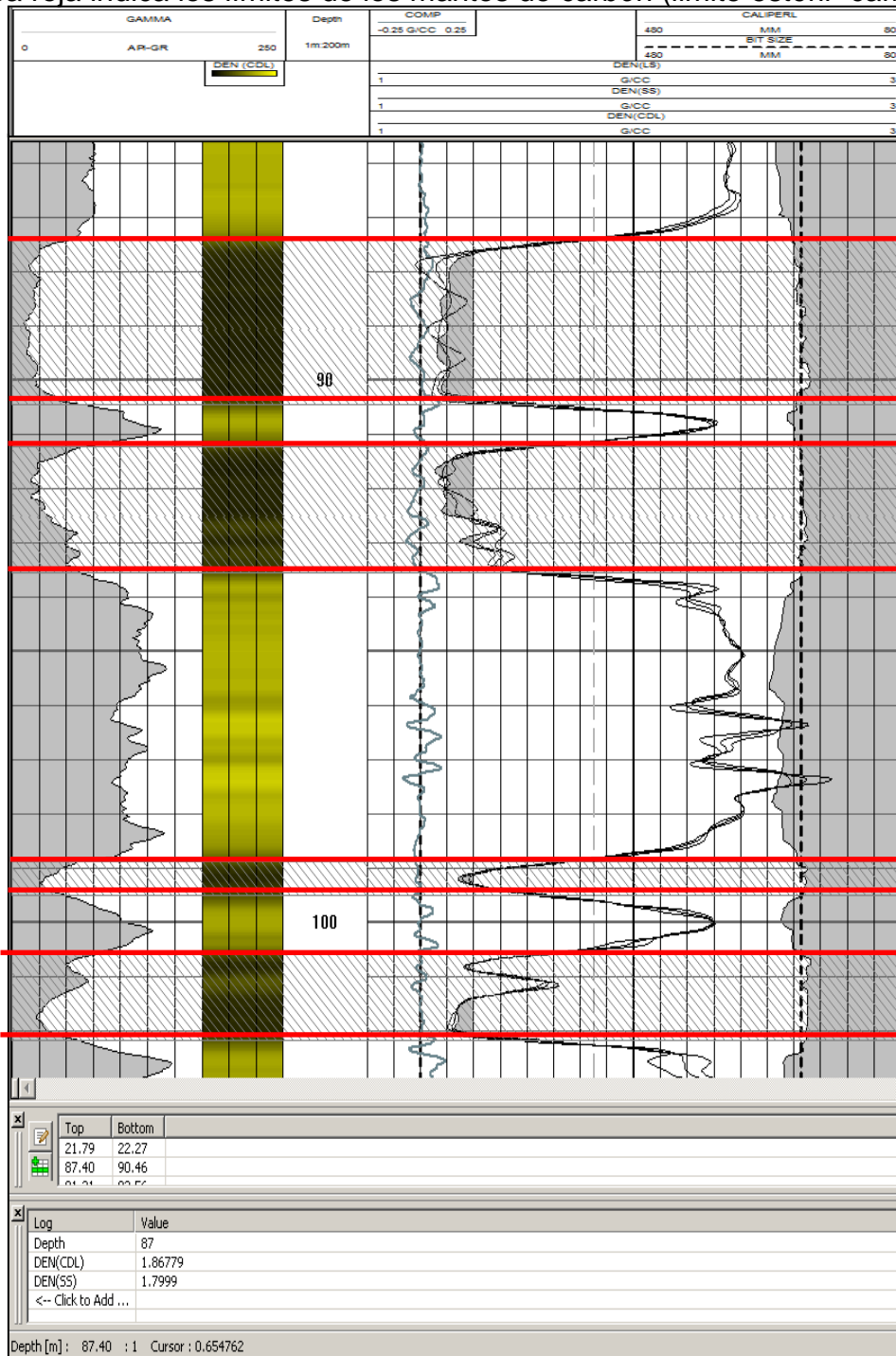
Es común que los pisos y techos de los mantos de carbón correspondan a materiales con Intercalaciones carbonosos e incluso con delgadas cintas de carbón, cuando esto sucede la curva de densidad corta (Short space density (SS)) las detecta haciéndose sinuosa, es decir, tomando valores bajos donde existen estas cintas. los límites de los mantos de carbón se determina en este caso descontando o sumando, según se trate del piso o del techo, 15 cm a partir del valor más bajo de densidad corta. (Figura 48).

**Figura 46:** curvas de densidad que se intercepta en 1.8 g/cm<sup>3</sup>. La línea roja indica los límites de los mantos de carbón (limite estéril- carbón).



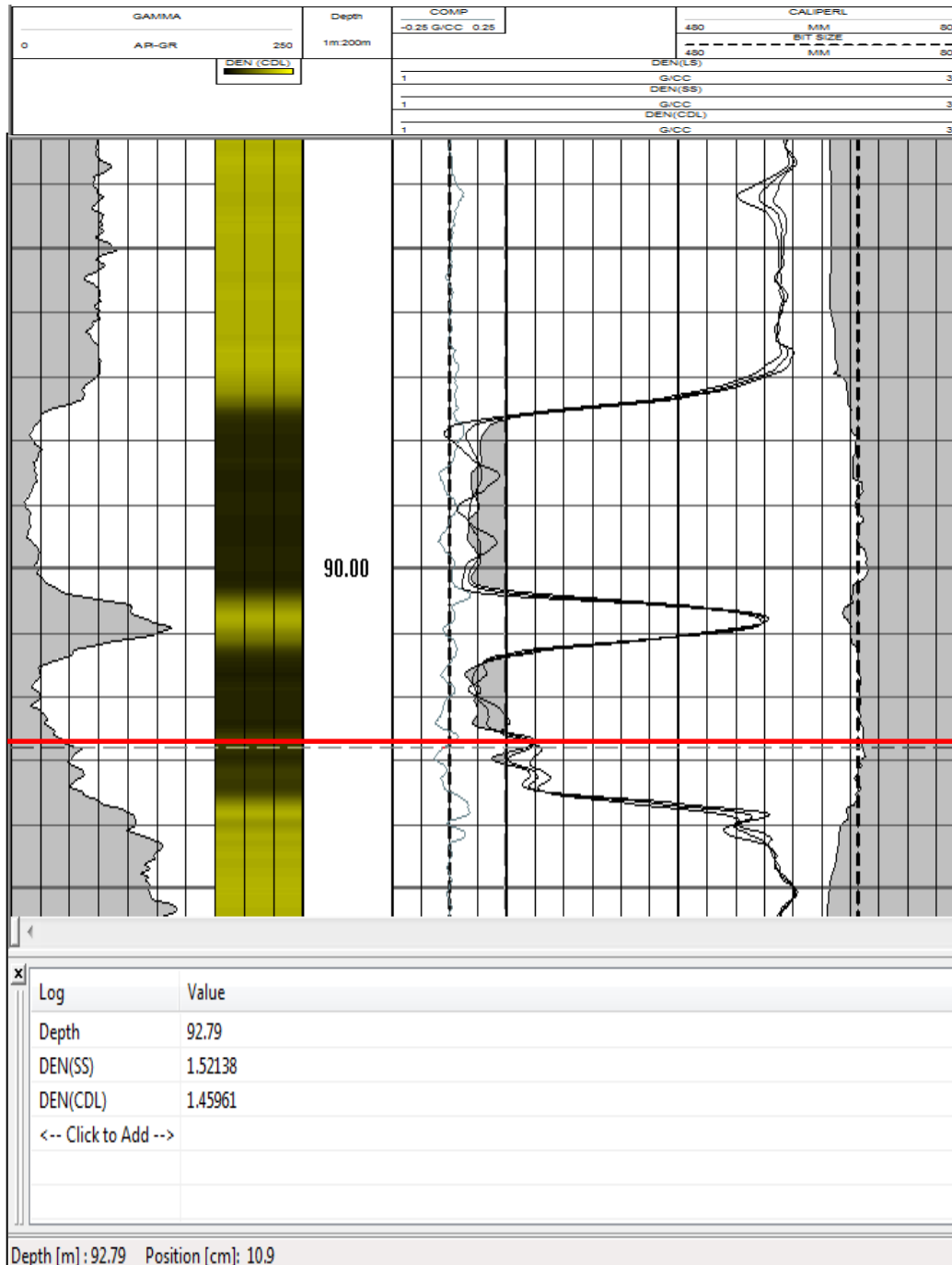
Fuente: Autor

**Figura 47:** Curvas de densidad que se interceptan por debajo de 1.8 g/cm<sup>3</sup>. La línea roja indica los límites de los mantos de carbón (limite estéril- carbón).



**Fuente:** Autor

**Figura 48:** Curva sinuosa, la línea roja marca donde se marcaría el límite del manto de carbón.



**Fuente:** Autor

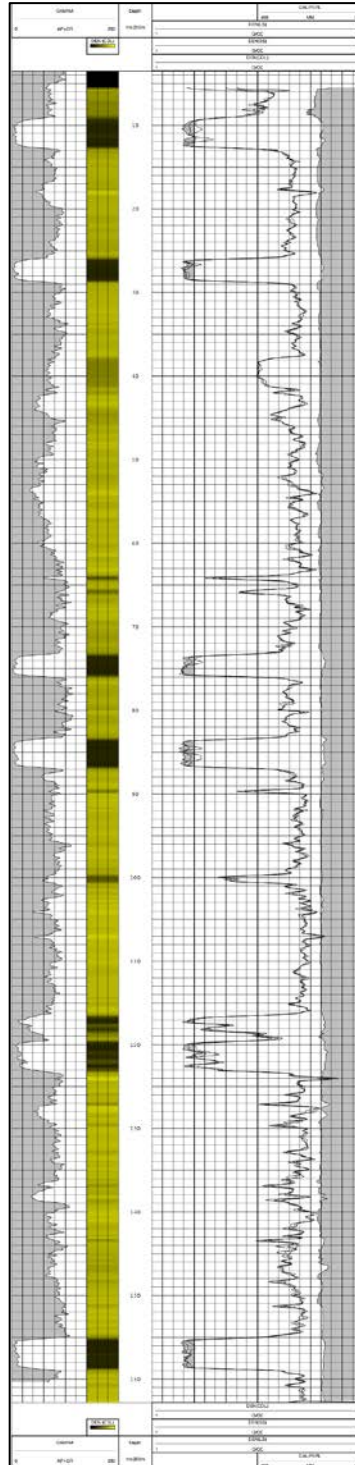
Las areniscas en la Formación Cerrejón; presentan valores de gamma Ray bajos, que varían en promedio entre 67.66 y 85.33 API, así mismo la densidad varía en promedio entre 2.34 y 2.46 g/cm<sup>3</sup>; si las areniscas son calcáreas se refleja en la curva de densidad, los valores aumentan. En areniscas lodosas la curva Gamma Ray y Densidad es sinuosa; mostrando las variaciones entre la lodolita y la arenisca; se puede distinguir de la lodolita arenosa por la mayor cantidad de valores en el rango de lodolita. (Ver tabla 2)

Las lodolitas de la Formación Cerrejón presentan valores de Gamma Ray que varía en promedio entre 115.48 y 132.08 API mostrando valores más altos respecto al Gamma Ray en las areniscas; debido a la cantidad de minerales arcillosos que contiene esta roca, a su vez los valores de densidad son bajos, varía en promedio entre 2.30 y 2.38. (Ver tabla 3).

Este registro es muy importante en exploración de carbones ya que se puede identificar los espesores de los mantos de carbón, la calidad de los carbones, es decir poder identificar si contienen Parting o inyecciones de otro material; conocer la litología del área y a que profundidades se encuentran.

En la figura 49 se ilustra el registro litológico, a partir de las curvas Gamma Ray, Densidad y Caliper.

**Figura 49:** Registro litológico a partir de las curvas Gamma Ray, Densidad y Caliper.



**Fuente:** Autor

## 7.2 INTERPRETACIÓN REGISTRO RESISTIVIDAD

Para poder tener más información en la interpretación del registro litológico, es necesario utilizar otros registros como resistividad. Este registro también ayuda a marcar los límites de los mantos de carbón, ya que se observa una marcada tendencia al aumento de la resistividad, pero no es constante en algunas ocasiones.

El registro de resistividad es sensible al contenido de minerales arcillosos, al volumen y salinidad del agua subterránea. Haciendo que el registro de resistividad muestre una curva sinuosa, esto ayuda a la identificación de la calidad del carbón, es decir si se encuentra fracturado, o con inyecciones de otro material rico en minerales arcillosos, estando el carbón sucio; Para este caso la curva Gamma Ray y densidad los valores aumentan identificando la inyección de otro material. (Ver figura 50).

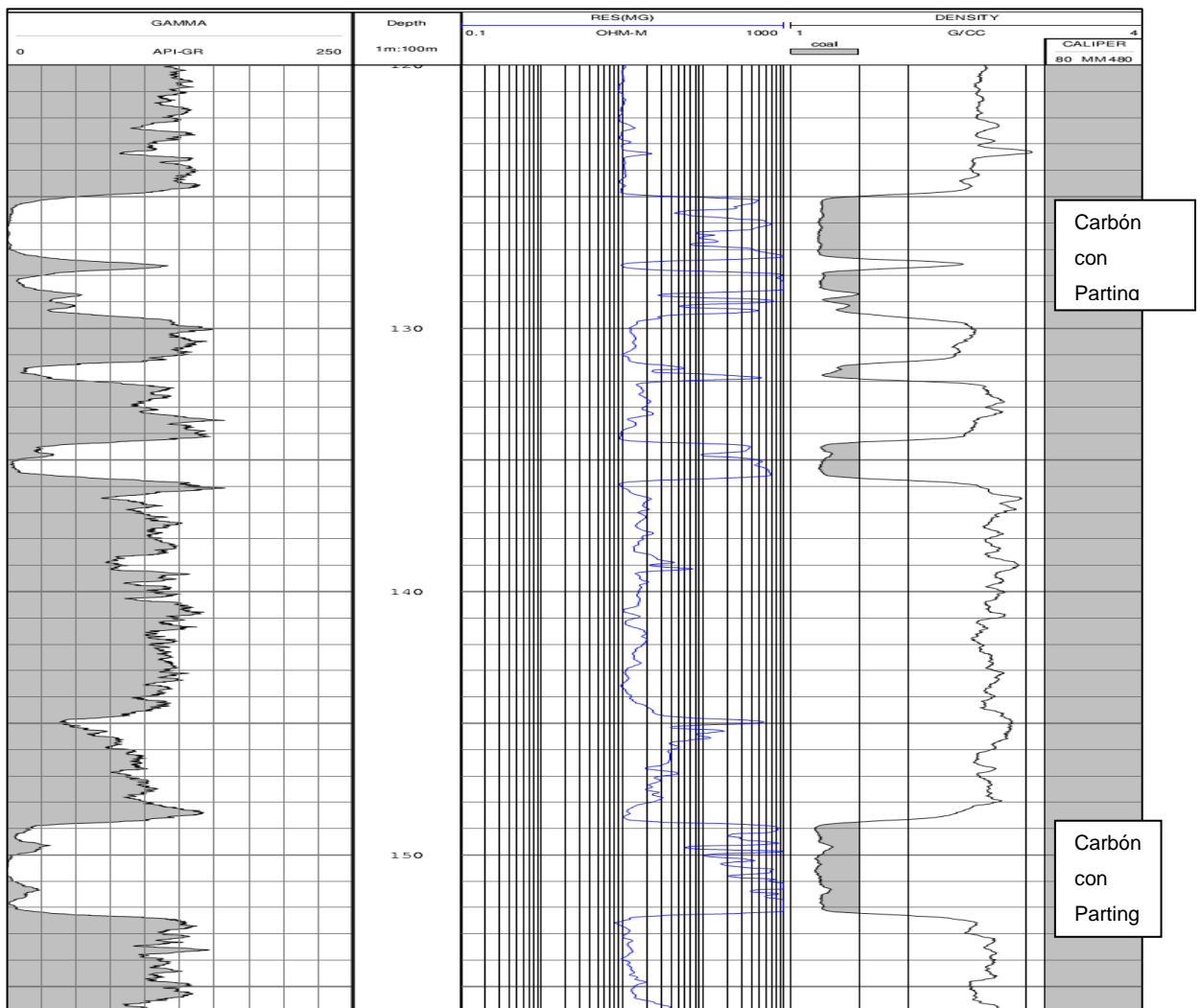
Otro factor por el cual el registro de resistividad muestre una curva sinuosa es cuando el carbón esta fracturado, para este caso los registros Gamma Ray y Densidad no muestran cambios. (Ver figura 51). El fracturamiento se identifica en los núcleos de perforación. (Ver anexo A).

Los carbones quemados o oxidados por la meteorización se puede distinguir en este registro, ya que los valores de resistividad se reducen, para este caso el registro Gamma Ray aumenta pero por el contrario el registro Densidad no muestra cambios. (Figura 53). La meteorización se identifica en los núcleos de perforación. (Ver anexo B).

Para los mantos de carbón del yacimiento *Carbones del Cerrejón* los valores de resistividad están en promedio entre 126.21y 341.23 ohm/m (ohmios por metro). (Ver tabla 1).

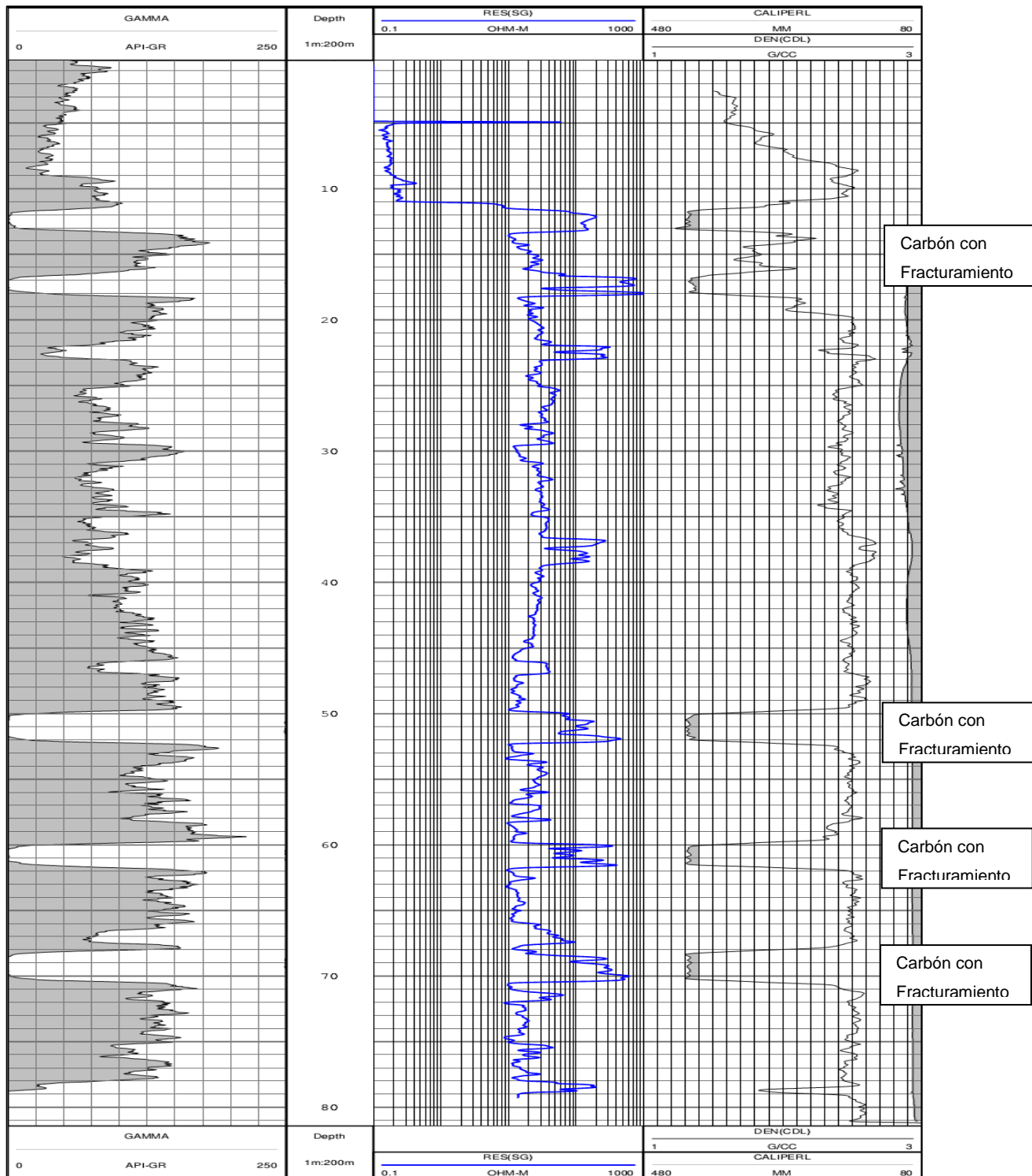
En las areniscas del yacimiento, el registro de resistividad muestra valores entre 38.15 y 64.44 ohm/m (ohmios por metro), cuando son areniscas calcáreas los valores de resistividad aumentan, pueden llegar hasta 90.86 ohm/m. (ver tabla 2)  
 Las lodolitas presentan valores de resistividad en promedio entre 12.50 y 15.20 ohm/m (ohmios por metro). Estos valores registrados en pozos sin problema de derrumbe, Las condiciones de las paredes del pozo se observa con la curva del Caliper. (Ver tabla 3)

**Figura 50:** respuesta del registro Gamma Ray, Resistividad y Densidad en carbones con Parting.



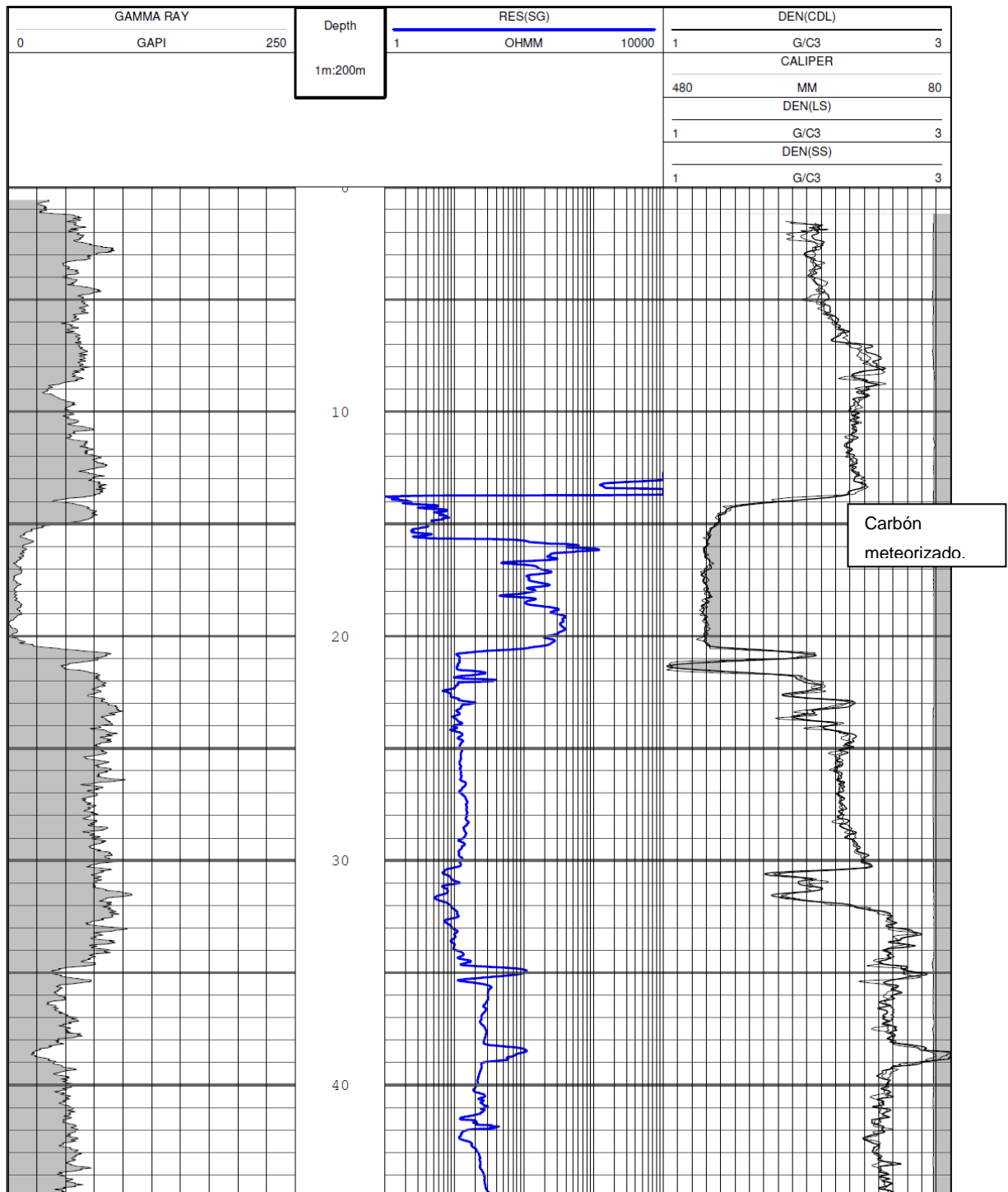
Fuente: Autor

**Figura 51:** respuesta del registro Gamma Ray, Resistividad y Densidad en carbones con fracturamiento.



Fuente: Autor

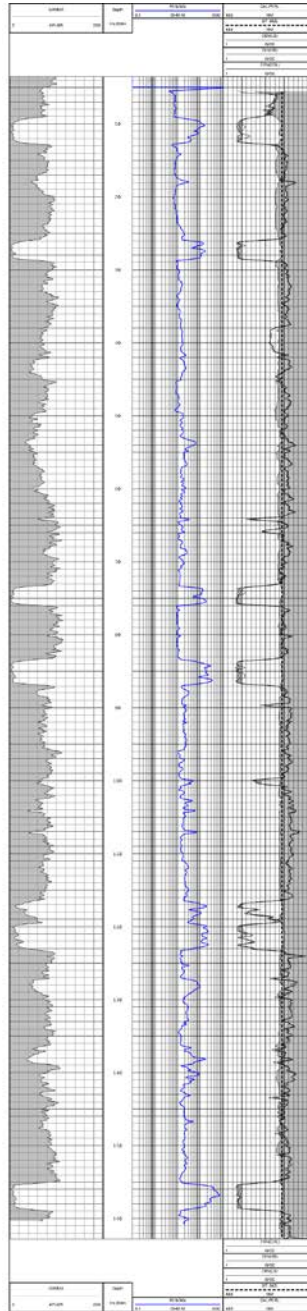
**Figura 52:** registro de resistividad de un manto de carbón meteorizado.



Fuente: Autor

En la figura 53 se ilustra el registro Resistividad junto con las curvas Gamma Ray, Densidad y Caliper, para la identificación de la calidad del carbón.

**Figura 53:** registro de resistividad donde se identifican en los mantos de carbón contaminados o fracturados.



**Fuente:** Autor

### 7.3 INTERPRETACIÓN REGISTRO SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

Las propiedades magnéticas de las rocas pueden variar significativamente o mínimamente. Las secuencias asociadas al carbón tienen relativamente baja susceptibilidad magnética en contraste a los altos valores magnéticos de las rocas ígneas de basamento y rocas metamórficas. Los estudios magnéticos son usados para delinear el amplio fracturamiento estructural del área asociada al carbón; dichos estudios no detectan carbón, pero estos pueden ayudar en la ubicación de secuencias asociadas al carbón a profundidades accesibles. (Evans, et al, 1988).

Estudios detallados de magnetismo superficial son usados para detectar los límites de mantos de carbón quemados conocidos como Clinker. En la delineación de zonas quemadas de mantos de carbón la susceptibilidad magnética de rocas sedimentarias sin quemar es baja, pero la susceptibilidad magnética de las rocas quemadas (Clinker) es variable (Hooper, 1987).

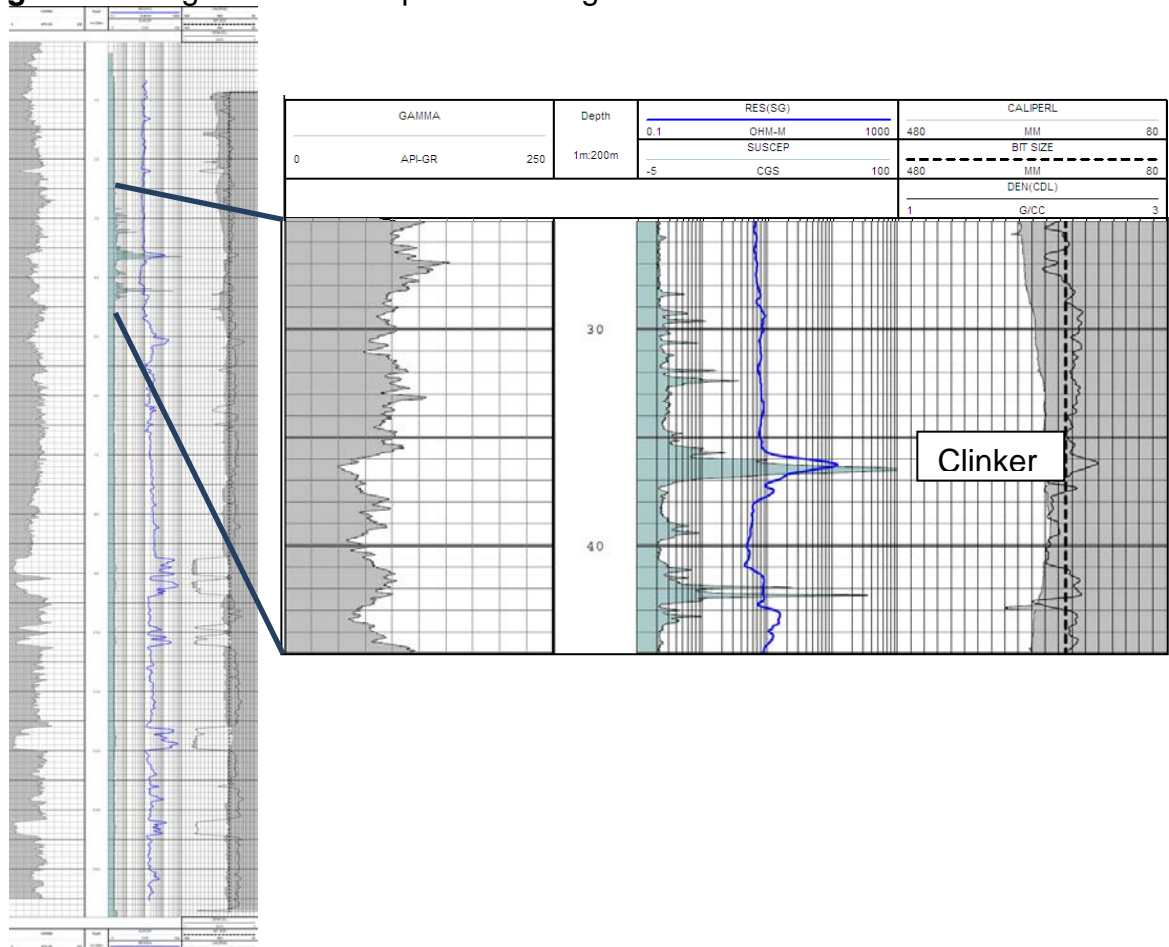
La mayoría de la magnetita en el Clinker es derivada de la alteración termal de minerales de las rocas sedimentarias, algunas áreas quemadas experimentan un enriquecimiento de hierro, debido a que el hierro es movable durante el metamorfismo termal y puede ser redepositado en rocas quemadas (Clinker). Durante el proceso de quemado las lutitas y las limolitas experimentan una reducción significativa de volumen sin embargo, las lutitas tienden a separarse en pequeñas piezas, por lo que una gran área está disponible para el enriquecimiento de hierro. Los sedimentos alrededor de los bordes de un manto quemado pueden contener apreciablemente más magnetita si el fuego en el carbón se extinguió debido a la ausencia de oxígeno, lo cual reduce los óxidos e hidróxidos de hierro a magnetita. (Thomas, 2013).

En el registro de susceptibilidad magnética, se puede identificar las zonas con Clinker y con correlación de pozos la zona de quemado del manto de carbón.

Los valores de la Susceptibilidad magnética en los mantos de carbón son muy bajos, varían en promedio entre 3.01 y 3.72 en unidades CGS x105. En las areniscas y lodolitas son casi igual varían en promedio de 2.93 y 2.95 en unidades CGS x105, aunque estos valores dependen de la cantidad de magnetita contenida en la roca.

En las zonas de Clinker los valores de Susceptibilidad magnética aumentan, debido al mayor contenido de magnetita. (Ver figura 54). Estos valores varían entre 0-103 en unidades CGS. Para la identificación del Clinker se utilizó los rípos de perforación. (Ver anexo C).

**Figura 54:** Registro de Susceptibilidad magnética en una zona de Clinker.



Fuente: Autor

A continuación la tabla 1 que muestra los valores mínimos y máximos de los registros Gamma Ray, Densidad, Resistividad y Susceptibilidad Magnética para los mantos de carbón así como el rango promedio para las áreas de estudio.

**Tabla 1:** valores promedios de las propiedades físicas para los carbones en el yacimiento *Carbones del Cerrejón*, para el área de estudio.

VALORES PROMEDIOS DE LOS DIFERENTES REGISTROS PARA LOS MANTOS DE CARBON EN EL YACIMIENTO CARBONES DEL CERREJON								
INTERVALO LODOLITA	GR Min (API)	GR Max (API)	DEN Min (Gr/CM3)	DEN Max(Gr/CM3)	RES Min (OH/M)	RES Max (OH/M)	SUS Min (CGSX105)	SUS Max(CG SX105)
1	5.51	79.6	1.32	1.67	63.48	147	3.48	3.4
2	6.47	67	1.27	1.87	55.8	139.7	2.69	2.2
3	7.39	67	1.3	1.87	42.8	162	4.36	3
4	56.8	73	1.29	1.8	46.88	178	4.95	4.5
5	5.36	61.1	1.27	1.82	89.56	329	4.36	3
6	13.1	58.54	1.31	1.86	169	186	5.7	4
7	10.3	75.5	1.28	1.71	258	691	3.59	1.85
8	16.7	44.5	1.26	1.79	150	610	4.54	4.54
9	22.3	56.2	1.34	1.76	143	263	5.7	3.37
10	16	78.4	1.3	1.79	95.36	572	5.7	5.7
11	13.8	90.4	1.27	1.89	74	141	4.59	4.47
12	21.9	62.8	1.3	1.84	33	47.2	1.98	0.65
13	14.1	72.6	1.31	1.87	81	219	2.74	1.71
14	1.52	77	1.3	1.79	695	882	2.65	1.95
15	6.28	60.68	1.3	1.8	81	1520	4.9	4.5
16	3.73	96.58	1.32	1.84	85	289	3.68	2.5
17	2.42	106.5	1.3	1.89	205	467	2.8	1.8
18	0.09	100	1.25	1.84	23	35	4.6	3.4
19	0.01	68.18	1.27	1.77	217	461	2.56	1.78
20	1.07	80.4	1.3	1.75	146	184	3.65	2.49
21	0.54	82.2	1.27	1.7	30	600	3.54	1.95
22	0.66	60.1	1.3	1.8	58	350	5.46	5.46
23	0.31	98.61	1.32	1.76	176	352	2.65	2.65
24	0	100.41	1.3	1.8	182	492	1.95	1.95
25	1.7	62.1	1.28	1.76	366	877	2.1	1.26
26	14.7	97.8	1.3	1.8	300	387	1.26	2.68
27	10.3	54.1	1.31	1.8	94.2	126	5.32	4.56
28	15.1	52.4	1.27	1.72	40	48.98	2.36	2.98
29	9.3	71	1.27	1.8	230	477	4.63	4.63
30	5.78	40.8	1.32	1.8	5.97	1132	5.36	3.65
31	0.59	83	1.26	1.8	5.12	33	3.67	2.4
32	2.97	102	1.27	1.8	35	70.5	4.2	2.56
33	2.07	71	1.25	1.79	64	122	2.69	2.98
34	12.5	57.4	1.25	1.78	71	76	4.2	4.2
35	2.07	60.4	1.25	1.86	121	202	2.3	3.21
36	5.7	64	1.24	1.84	73.4	156	4.68	2.63
37	2.07	83.9	1.25	1.87	99	121	5.68	4.6
38	2.27	48.2	1.24	1.85	24	83	2.3	1.68
39	1.48	60.3	1.25	1.74	122	207	2.49	2.9
40	1.38	117	1.24	1.8	198	214	2.64	0.65
MEDIANA	7.91	73.57	1.28	1.80	126.21	341.23	3.72	3.01

Fuente: Autor.

A continuación la tabla 2 que muestra los valores mínimos y máximos de los registros Gamma Ray, Densidad, Resistividad y Susceptibilidad Magnética para las areniscas así como el rango promedio para las áreas de estudio.

**Tabla 2:** valores promedios de las propiedades físicas para las areniscas en el yacimiento *Carbones del Cerrejón* para el área de estudio.

VALORES PROMEDIOS DE LOS DIFERENTES REGISTROS PARA LAS ARENISCAS EN EL YACIMIENTO CARBONES DEL CERREJON.								
INTERVALO LODOLITA	GR Min (API)	GR Max (API)	DEN Min (Gr/CM3)	DEN Max(Gr/CM3)	RES Min (OH/M)	RES Max (OH/M)	SUS Min (CGSX105)	SUS Max(CG SX105)
1	83.8	69.2	2.3	2.34	11	17.35	0.6	2.4
2	46.6	64	2.39	2.4	22	58.7	3.33	3.23
3	82.7	93	2.37	2.39	14	14.86	3.37	3.37
4	80.3	90.48	2.39	2.48	29.7	16.71	3.37	3.37
5	57.6	100.7	2.13	2.54	18.7	86.5	0.93	1.97
6	45.3	78.2	2.33	2.46	36	1.65.8	3.23	3.27
7	47.8	76	2.24	2.59	35.9	192	3.27	4.43
8	63.9	67	2.37	2.51	36.4	38.1	3.37	3.37
9	51	64.9	2.33	2.6	32.9	116.7	3.37	3.37
10	78.9	81.7	2.46	2.54	23.5	30	3.37	3.37
11	68.74	73.2	2.45	2.59	39.6	85.6	3.33	3.33
12	93	70.3	2.48	2.48	27.7	32.9	3.33	3.23
13	47.96	69	2.35	2.4	46.8	47.9	0.93	0.93
14	74.2	94	2.36	2.5	19.9	34	0.72	1.88
15	45.6	74	2.27	2.27	11.3	11.3	0.98	1.78
16	69.8	92.6	2.34	2.42	26.3	36.18	1.87	3.4
17	67	79	2.4	2.43	27.88	28.7	0.93	1.76
18	54	78	2.51	2.56	77	120	3.33	3.33
19	62	77	2.31	2.36	34.77	39.3	3.33	3.33
20	33	63.3	2.05	2.27	8.95	9.94	3.33	3.33
21	74	93	1.98	2.47	11.18	17.89	3.37	3.37
22	66	68	2.48	2.49	24.19	25.8	3.37	3.37
23	58	72	2.34	2.49	11.4	24.4	3.2	3.23
24	54	95	2.43	2.52	42.35	166	0.93	1.78
25	69	72	2.41	2.45	36.7	39.87	3.28	3.27
26	76.2	95.6	2.44	2.51	40.12	50.45	3.39	3.35
27	78	95	2.35	2.6	45	112	3.33	3.33
28	56	108	2.4	2.54	59	78	3.33	3.33
29	69	100	2.3	2.7	38	76	2.54	3.76
30	64	103	2.2	2.35	45	87	0.93	3.23
31	87	96	2.35	2.5	67	89	3.34	3.43
32	64	85	2.34	2.46	56	84	0.93	1.97
33	97	104	2.31	2.35	45	79	3.21	3.23
34	57	74	2.36	2.5	19.9	38	3.25	3.29
35	69	95	2.25	2.29	27.8	48	0.93	1.98
36	73	85	2.37	2.37	56	74	3.33	3.33
37	68	93	2.31	2.37	49	86	3.33	3.33
38	98	108	2.36	2.39	95	106	3.33	3.33
39	78	106	2.35	2.37	79	95	0.93	0.93
40	98	110	2.37	2.38	98	120	3.22	3.23
MEDIANA	67.66	85.33	2.34	2.46	38.15	64.44	2.95	2.93

Fuente: Autor

A continuación la tabla 3 que muestra los valores mínimos y máximos de los registros Gamma Ray, Densidad, Resistividad y Susceptibilidad Magnética para las lodolitas así como el rango promedio para las áreas de estudio.

**Tabla 3:** valores promedios de las propiedades físicas para las lodolitas en el yacimiento *Carbones del Cerrejón*, para el área de estudio.

VALORES PROMEDIOS DE LOS DIFERENTES REGISTROS PARA LAS LODOLITAS EN EL YACIMIENTO CARBONES DEL CERREJON.								
INTERVALO LODOLITA	GR Min (API)	GR Max (API)	DEN Min (Gr/CM3)	DEN Max(Gr/CM3)	RES Min (OH/M)	RES Max (OH/M)	SUS Min (CGSX105)	SUS Max(CG SX105)
1	91	116	2.21	2.34	8.6	8.95	4.54	4.54
2	116	122	2.26	2.27	13.24	14.6	3.37	4.54
3	101	113	2.38	2.39	10.94	14.05	3.37	4.43
4	117	135	2.4	2.4	27.1	34.9	2.1	2.1
5	94	115	2.27	2.27	6.97	7.32	4.3	4.43
6	118	142	2.37	2.37	14.91	15.78	4.54	4.54
7	124	147	2.22	2.28	13.62	16.8	3.37	4.54
8	123	138	2.16	2.49	11.86	16.8	3.37	4.43
9	103	129	1.84	2.1	10.7	12.6	2.1	2.1
10	111	121	2.35	2.45	11.6	12.68	0.61	0.88
11	119	113	2.26	2.39	10.87	11.6	0.79	0.97
12	109	144	2.37	2.48	13	20.5	2.7	2.8
13	117	151	2.4	2.44	10.5	12.3	3.23	3.23
14	129	140	2.47	2.5	12	12.3	0.87	0.87
15	123	171	2.42	2.5	12.2	9.3	2.43	2.43
16	101	123	2.46	2.47	11.3	19.7	3.56	3.56
17	152	186	2.23	2.25	11.52	12.64	3.37	3.37
18	135	149	2.36	2.37	8.96	9.07	3.54	3.54
19	127	162	2.43	2.46	8.61	11.7	3.23	3.23
20	143	161	1.73	2.12	11	13.95	3.4	3.4
21	99	130	2.5	2.5	22.9	31.7	4.54	4.54
22	117	137	2.42	2.45	12.91	15.14	3.37	3.37
23	111	115	2.5	2.5	14.91	15.78	4.54	4.54
24	114	126	1.73	2.1	13.62	16.8	3.37	4.54
25	112	143	2.5	2.12	11.86	16.8	3.37	4.43
26	108	115	1.73	2.78	10.7	15	2.1	2.1
27	110	126	2.5	2.34	11.6	12.68	0.61	0.88
28	98	113	2.6	2.31	10.87	17.98	0.79	0.97
29	102	123	2.6	2.7	14.91	15.78	4.54	4.54
30	97	143	2.5	2.23	13.62	16.8	3.37	4.54
31	99	105	2.5	2.1	11.86	16.8	3.37	4.43
32	114	124	2.5	2.37	10.7	15.78	3.37	2.1
33	117	120	2.6	2.87	11.6	12.68	0.61	0.88
34	105	110	1.56	2.13	10.87	11.6	0.79	0.97
35	123	124	2.5	2.34	14.91	15.78	4.54	4.54
36	154	155	1.78	2.5	13.62	16.8	3.37	4.54
37	134	136	2.6	2.23	11.86	16.8	3.37	4.43
38	123	127	2.5	2.5	8.83	12.6	2.1	2.1
39	97	100	1.87	2.5	17.5	12.68	3.37	0.88
40	132	133	2.5	2.32	10.77	17	3.37	0.97
MEDIANA	115.48	132.08	2.30	2.38	12.50	15.26	2.13	2.40

Fuente: Autor.

## 8. METODOLOGÍA PROPUESTA

Después de analizar los registros geofísicos anteriormente la metodología que propongo es la siguiente:

1-Procesar los archivos .LAS en el software Well Cad para la generación del registro Caliper y así determinar la calidad de la información. El registro Caliper debe ser recto a lo largo de todo el pozo, si esto no se cumple y la curva tiene variación los datos no son confiables en ese tramo del pozo.

2-Interpretar la información del Dipmeter por la metodología SCAT para la identificación de anomalías de posibles fallas y pliegues; se debe tener en cuenta de tener la plantilla de Excel para el procesamiento de los archivos .LAS.

3-Corroborar las anomalías presentes en la interpretación del Dipmeter con una sección geológica perpendicular al buzamiento de las capas en el pozo e información geológica existente en el área alrededor del pozo y así determinar si hay o no fallas, discordancias o pliegues.

4-Interpretar el registro litológico con las curvas de: densidad en el valor de 1.8 g/cm<sup>3</sup>, Gamma Ray en el rango entre 7.91 y 73.57 para la identificación de los límites de los mantos de carbón en la formación Cerrejón.

5-Interpretar el registro de resistividad para identificar la calidad de los mantos de carbón. Los principales factores que afectan la calidad del carbón son fracturamiento, meteorización y Parting, para diferenciar entre ellos se necesita usar el registro de resistividad junto con los registros Gamma Ray y Densidad.

6-Interpretar el registro de Susceptibilidad Magnética para identificar la existencia de zonas de Clinker.

7-Enviar la interpretación al área de modelamiento, para la actualización del modelo geológico.

## CONCLUSIONES

Se optimizó la metodología de interpretación mediante el estudio de los registros de Gamma Ray, Densidad, Resistividad, Susceptibilidad Magnética, núcleos y rípios de perforación, determinando los siguientes parámetros de control: Control de calidad de información de los registros mediante el estudio del registro Caliper, el cual muestra las condiciones de las paredes del pozo, control de contactos litológicos mediante el estudio del registro Densidad, el cual es el registro que mejor define los contactos de los mantos de carbón. Finalmente el control de ubicación real de planos de falla el cual se determina en el registro Dipmeter por la metodología SCAT. Esto dio como resultado los valores mínimos y máximos de los registros de Gamma Ray, Densidad, resistividad y Susceptibilidad Magnética para cada manto de carbón identificado en toda la zona de estudio así como las litologías principales, para obtener el rango de valores representativos en los mantos de carbón existentes en los tajos Patilla y Tabaco en la mina Carbones del Cerrejón. Los rangos de valores son los siguientes:

### **Registro Gamma Ray**

**Carbón:** 7.91-73.57 API

**Areniscas:** 67.66-85.33 API

**Lodolitas:** 115.48-132 API

### **Registro Densidad**

**Carbón:** 1.28 - 1.8 g/cm<sup>3</sup>

**Areniscas:** 2.34 - 2.46 g/cm<sup>3</sup>

**Lodolitas:** 2.30 - 2.38 g/cm<sup>3</sup>

### **Registro Resistividad**

**Carbón:** 126.21 - 341 oh/m

**Areniscas:** 38.15 - 64.44 oh/m

**Lodolitas:** 12.51 – 15.20 oh/m

### **Registro Susceptibilidad Magnética**

**Carbón:** 3.01 – 3.72 CGSx105

**Areniscas:** 2.93 – 2.95 CGSx105

**Lodolitas:** 2.13 – 2.40 CGSx105

Se correlacionaron los datos de los archivos .LAS, obteniendo los siguientes patrones de comparación: En la interpretación del registro Dipmeter tradicional los patrones de ángulo de buzamiento y dirección de buzamiento son simples o complejos, sin embargo en la interpretación SCAT ellos son más simples y nunca más complejos que los patrones de Tadpoles. En el registro Dipmeter tradicional no se identifica la dirección del plano de falla, mientras en la metodología SCAT si se puede identificar la dirección del plano de falla en el corte transversal al rumbo cuando la falla ha sido corroborada. Finalmente en el registro Dipmeter tradicional muestra patrones complejos cuando cruza el plano de cresta de un pliegue, mientras la metodología SCAT en el corte longitudinal al rumbo muestra si el pliegue presenta cabeceo o no. Después de comparar la metodología tradicional con la metodología SCAT se concluye que la metodología SCAT es más eficiente.

## RECOMENDACIONES

Establecer la metodología SCAT en el registro Dipmeter por que permite obtener mayor información y claridad para la interpretación de fallas y pliegues.

Complementar este estudio, analizando los valores de los registros de Gamma Ray, Densidad, Resistividad, Susceptibilidad Magnética, y Dipmeter en las otras áreas de la mina *Carbones del Cerrejón*, ya que a mayor cantidad de datos o muestras los valores serán más precisos para el entorno geológico de la mina.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., PARDO, A., HERNANDEZ, G. Important paleotectonic and chronostratigraphic considerations of the Late Paleocene in the northernmost Andes as constrained by Paleocene rocks in the Cerrejón Coal Mine, Guajira, Colombia. III Convención Técnica ACGGP. Bogota CD ROM, (2004).
- BENGTON, C. Statistical Curvature Analysis Dipmeter Data, AAPG Bull, Vol. 65, (1981). pp. 312-332.
- BORELOG. Testificación geofísica del pozo San Juan, carbones (Castellón). Polígono industrial Constanti, (2006). pp 23.
- CANDELA, S., QUINTERO, J. Cartografías de las zonas Clinker en las áreas de minería de la mina el Cerrejón. Albania, Guajira. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. (2004). pp 63.
- CARBONES DEL CERREJÓN. Disección por niveles de un cinturón andino deformado: Observaciones preliminares en la mina de carbón del Cerrejón, Guajira. Presentador, Portilla H, Memorias X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, 2005.
- CRAIN, E. R. The Log Analysis Handbook. Volume One -Quantitative Methods, Pennwell Books, Tulsa, Out of Print ISBN 0-87814-298-3 Hardcover, (1986). pp 700
- DAVIDSON, G., LOWE, S. Magnetic Modeling of Clinker Zones at Carbones del Cerrejón, Colombia. Geology and Reserves, Volume 10. Geophysics. Separata Feasibility Study, Expansion to 9 MTPA, (2000).

- EVANS, R.B., GREENWOOD, P.G. Outcrop magnetic susceptibility measurements as a means of differentiating rock types and their mineralization, in Asia Mining '88, Kuala Lumpur, Institute of Mining and Metallurgy, London, 1988. pp. 45–57.
- FIRTH D. Log Analysis for Mining Applications. Reeves Wireline Services. 1999. pp 156.
- HOOPER, R.L. Factors affecting the magnetic susceptibility of baked rocks above a burned coal seam. International Journal of Coal Geology, 9, 1987. pp157–169.
- KELLOGG, J. Cenozoic Tectonic history of the Sierra de Perijá, Venezuela - Colombia, and adjacent basins, 1981.
- KELLOG, J., BONINI, W. Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in overriding South American plate. Tectonics, 1982.
- MONTES, C., BAYONA, G., JARAMILLO, C., OJEDA, C., MOLINA, M., HERRERA, I. Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar- Rancheria valley: Rigid-beam pivot model. 6<sup>a</sup> international symposium of Andean geodynamics memoir, 2005.
- RAMOS, J. G. Ambientes de depósito relacionado con los parámetros de calidad de los carbones del Cerrejón Bloque B (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá. 1990. pp 158.

- REVEES WIRELINE SERVICES. Mineral Services Catalogue. Reeves Technologies limited, 1999. pp 60.
- RUBIANO, J. Curso interpretación geológica de los datos obtenidos a partir de los registros de Dipmeter, usando el programa SCAT. Instituto Colombiano del Petróleo. Unidad de disciplinas especializadas, 2009. pp 89.
- SAAVEDRA, W. Cartografía geológica con énfasis estructural en el sector de Barrancón, Informe Geológico, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Junio. 2008.
- SCHLUMBERGER. Fundamentals of Dipmeter interpretation. Schlumberger Ltd. 1970. pp 145
- SCHLUMBERGER. Log interpretation principles/Applications. Schlumberger Ltd. 1989. pp 241
- THOMAS L. Coal geology. Wiley-blackwell, second edition, 2013. pp 444.

## ANEXOS

Anexo A. Fotografías manto de carbón fracturado.



**Anexo A. (continuación)**



**Anexo B. Fotografía manto de Carbón meteorizado.**



Anexo C. Fotografía material Clinker.

