

**DELIMITACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL DE CARBÓN EN UN ÁREA DE  
BALSILLAS, CERRO MATOSO S.A. MONTELÍBANO, CÓRDOBA.**

**CIRO RAÚL SÁNCHEZ BOTELLO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICA**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**BUCARAMANGA**

**2015**

**DELIMITACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL DE CARBÓN EN UN ÁREA DE  
BALSILLAS, CERRO MATOSO S.A. MONTELÍBANO, CÓRDOBA.**

**CIRO RAÚL SÁNCHEZ BOTELLO**

**Trabajo de Grado para optar el título de Geólogo**

**Modalidad: Práctica Empresarial**

**Director**

**CARLOS ALBERTO RÍOS REYES**

**Geólogo Ph.D**

**Codirector**

**JORGE ELIECER TORRES ROJAS**

**Geólogo Cerro Matoso S.A.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICA**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**BUCARAMANGA**

**2015**

## DEDICATORIA

*Hay muchas personas a las cuales deseo dedicarles este trabajo, ellos han depositado su confianza en mí y han brindado todo el apoyo necesario para lograr uno a uno mis objetivos llevándome al lugar donde hoy me encuentro.*

*Entrego esta dedicatoria ante todo a nuestro padre celestial, por llenar de luz mi vida que abrieron puertas y caminos ayudándome a crecer día a día como persona y profesional, a mi madre por dar todo de sí y ser mi amiga incondicional que en momentos difíciles con sus suaves y amorosas palabras, refrescaron mi mente y me ayudaron a cosechar el fruto que hoy recojo.*

*De todo corazón y con el sentimiento del momento, dedico este triunfo a mi familia y a mi novia Jessica Rodríguez, ellos han dedicado su confianza y me han llevado de la mano a construir las escalas que hoy me ayudan a conquistar la parte más alta de esta bella etapa.*

*A mis profesores que día tras día dieron lo mejor de sí, brindándome herramientas y conocimientos para abordar y enfrentar los problemas profesionales.*

*Y finalmente a mis amigos y compañeros, que hicieron parte de esta etapa con los cuales compartí grandes momentos que difícilmente borraré de mi memoria.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a la ciudad bonita por abrir sus puertas y permitirme entrar en esta bella tierra, a la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de geología por brindarme la oportunidad de acudir a las aulas del conocimiento que a lo largo de estos años hicieron parte de mi crecimiento.*

*A Cerro Matoso S.A por darme la oportunidad de ser parte de ella y desarrollar la práctica empresarial, a mis compañeros de trabajo y amigos Jorge Ariel García, Jorge Eliecer Torres, Mónica Tobón, Iván Espitia, Julio Solano, Mery Luz Muñoz y Yuris Daza por compartir sus conocimientos y orientarme en el desarrollo de la práctica.*

*Al profesor y director de este proyecto, geólogo PhD. Carlos Alberto Ríos, por su dedicación y orientación.*

*A los evaluadores del proyecto por aportar su conocimiento durante este proceso.*

*Y a todos mis amigos por permitirme compartir conocimiento y amistad a lo largo de este camino: Gabriel Jiménez, Kelly Salinas, Camilo Argüello, Gina Buvoli, Jaime Andrés Guerreo, Diego Hernández, Jorge Iván Duarte, Alejandro Fayad, Luis Fernando Hernández, José Javier Regalado y a todos los demás que he tenido el gusto de conocer.*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	16
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo General.	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
1.2. JUSTIFICACIÓN	17
1.3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	18
1.4. METODOLOGÍA	20
2. GEOLOGÍA REGIONAL	21
2.1. GEOLOGIA ESTRUCTURAL REGIONAL	21
2.1.1. Sistema de Falla de Romeral.	21
2.1.2. Cinturón de San Jacinto.	22
2.1.3. Cuenca Sinú - San Jacinto.	26
2.1.4. Cuenca Valle Inferior del Magdalena.	27
2.2. ESTRATIGRAFÍA DEL CINTURON DE SAN JACINTO	29
2.2.1. Peridotita de Planeta Rica (Kp).	29
2.2.2. Basaltos de Nuevo Paraíso (Kb).	29
2.2.3. Formación Cansona (K <sub>2c</sub> ).	30

2.2.4.	Formación San Cayetano (E <sub>1</sub> E <sub>2</sub> sc).	30
2.2.5.	Formación La Tampa (Pget).	30
2.2.6.	Formación Ciénaga de Oro (Pgoco).	31
2.2.7.	Formación Cerrito (Tpc).	31
2.2.8.	Formación Sincelejo (N <sub>2</sub> Q <sub>1</sub> s).	32
2.3.	REGIONES CARBONÍFERAS DE COLOMBIA	34
2.3.1.	Región Atlántica.	35
3.	GEOLOGÍA LOCAL	37
3.1.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	37
3.2.	ESTRATIGRAFÍA DE CERRO MATOSO S.A.	37
3.2.1.	Ultramafitas de Cerro Matoso (Ksucm).	37
3.2.2.	Depósitos de ladera.	41
3.2.3.	Formación Cerrito (Tpc).	41
4.	RESULTADOS	43
4.1.	INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE LAS SECCIONES	45
4.2.	LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES	47
4.2.1.	Información obtenida a partir de las secciones.	47
4.2.2.	Modelamiento Tridimensional (3D) del área de estudio.	48
4.2.3.	Uso de Tomografías eléctricas.	50
4.2.4.	Traza de lineamientos.	51
4.3.	DELIMITACION DE ZONAS CON POTENCIAL DE CARBÓN	54
4.3.1.	Visualización de los carbones.	55

4.3.2.	Clasificación estadística de carbón por nivel de altura.	56
4.3.3.	Disposición de los niveles de carbón en la Formación Cerrito.	58
4.3.4.	Interpretación de los niveles de carbón en vistas de perfil.	62
5.	CONCLUSIONES	70
6.	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA	72

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización del área de estudio y rasgos estructurales que controlan el depósito de Cerro Matoso	19
Figura 2. Rasgos estructurales del Cinturón del Sinú, Cinturón plegado de San Jacinto y subcuencas Plato y San Jorge	24
Figura 3. Principales estructuras regionales en el departamento de Córdoba	25
Figura 4. Ubicación de la Cuenca Sinú - San Jacinto y sus límites estructurales	26
Figura 5. Ubicación de la Cuenca Valle Inferior del Magdalena y sus límites estructurales	28
Figura 6. Columna estratigráfica del Cinturón plegado de San Jacinto (Anticlinorio de San Jerónimo)	33
Figura 7. Región carbonífera de Atlántico	35
Figura 8. Columna generalizada de la zona de estudio	42
Figura 9. Perforación de circulación reversa (RC)	43
Figura 10. Muestreo de ripios de perforación en intervalos de 2 metros	44
Figura 11. Interpretación litológica de las secciones en sentido Norte-Sur, donde se identifican los diferentes tipos de roca, evidenciando zonas transicionales en el depósito marcadas por el contacto irregular.	46
Figura 12. Indicadores de lineamientos proyectados en superficie a partir de las secciones Norte-Sur y Este-Oeste (Vista en corte orientado en N-S).	48
Figura 13. Modelamiento de las unidades geológicas del área de interés, se observa la profundización de la cuenca avanzando en sentido Sur	49
Figura 14. Distribución del carbón en la superficie que modela la base de la Formación Cerrito	50
Figura 15. Proyección de fallas a partir de Tomografías Eléctricas	51

Figura 16. Proyecciones indicadoras de estructuras en la superficie de la Formación Cerrito	52
Figura 17. Definición de lineamientos estructurales y distribución del carbón por número de tramos estructurales	53
Figura 18. Modelo superficial de la base de la Formación Cerrito para la visualización de los niveles de carbón. En ella se observan zonas bajas y altas en diferentes sectores de la cuenca	55
Figura 19. Histograma de frecuencia en el carbón por altura, donde la altura cero representa la base de la Formación Cerrito	57
Figura 20. Niveles de carbón clasificados por rangos de altura	58
Figura 21. Distribución estadística correspondiente al Nivel N° 1 de carbón en la base de la Formación Cerrito	59
Figura 22. Distribución de la clasificación estadística correspondiente al Nivel N° 2 de carbón en la base de la Formación Cerrito	60
Figura 23. Distribución de la clasificación estadística correspondiente a los Niveles 3 y 4 de carbón. Se observa una zona sin contenido de carbón	61
Figura 24. Línea de perfil A-A' con área de influencia de 100 m ubicada y extendida en la zona baja de la cuenca	63
Figura 25. Interpretación y distribución del Nivel N°1 de carbón en perfil. Se observa la cercanía de este nivel con la base de la Formación Cerrito	64
Figura 26. Interpretación y distribución del Nivel N°2 de carbón en perfil a lo largo de la base de la Formación Cerrito	65
Figura 27. Interpretación y distribución del Nivel N°3 de carbón en perfil, donde se aprecia dispersión en el carbón	66
Figura 28. Interpretación y distribución del Nivel N°4 de carbón en vista de perfil	67
Figura 29. Zonificación potencial para el nivel 1 y 2 de carbón con espesor de estéril, distribuidos dentro del área de influencia del perfil A-A'	68
Figura 30. Zonificación potencial para el nivel 3 y 4 de carbón con espesor de estéril, distribuidos dentro del área de influencia del perfil A-A'	69

## RESUMEN

**TITULO: DELIMITACION DE ZONAS CON POTENCIAL DE CARBÓN EN UN AREA DE BALSILLAS, CERRO MATOSO S.A. MONTELÍBANO, CÓRDOBA\***

**AUTOR: CIRO RAÚL SÁNCHEZ BOTELLO\*\***

**PALABRAS CLAVE:** Cerro Matoso, Laterita, Cuenca, Lineamientos, Roca Estéril, Descapote.

### **DESCRIPCIÓN:**

La producción de ferroníquel en Cerro Matoso S.A., consta de 5 fases: explotación minera, secado parcial de mineral, calcinación, fundición y granulación. La fase de calcinación, utiliza carbón para reducir el material laterítico, producir derivados y pasar a las siguientes fases hasta completar el proceso. En los alrededores de Cerro Matoso, se han identificado niveles de carbón asociados a la Formación Cerrito ubicados en una cuenca, que presenta de base a tope las siguientes litologías; Ultramáfita de Cerro Matoso, Depósitos de ladera y Formación Cerrito.

Debido a la importancia del carbón en el proceso de calcinación, se realiza este proyecto, en la unidad de negocio exploración, de Cerro Matoso S.A cuyo objetivo es la delimitación de zonas con potencial de carbón. Para su desarrollo, se utilizan datos de 698 perforaciones y 41 perfiles, orientados en sentido N-S y E-W. Con lo anterior, se modeló la cuenca donde está depositado el carbón, definiendo lineamientos estructurales sin un evidente control en el depósito del mineral dentro de la cuenca. Siguiendo a esto, se clasifican estadísticamente los niveles de carbón medidos a partir de la base de la Formación Cerrito, obteniendo cuatro niveles clasificados por rangos de altura. Los niveles 1 (-8 a 10 m) y 2 (10 a 20 m) están en un área de influencia máxima de 20 m, presentan espesores de 0.5 a 1 m y están cercanos a la base de la Formación Cerrito, con un espesor de descapote mínimo en roca estéril de 10 m y máximo de 50 m. En consecuencia, los niveles 3 (20 a 28 m) y 4 (28 a 40 m) se encuentran dispersos en la cuenca, sin posibilidad de realizar un seguimiento por rango de altura, por tanto los niveles 1 y 2 presentan mayor potencial, delimitados en las zonas a y b.

---

\*Proyecto de Grado. Modalidad: Práctica Empresarial.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos A. Ríos Reyes

## ABSTRACT

**TITLE: DELIMITATION OF COAL POTENTIAL ZONES IN SOME AREA OF BALSILLAS, CERRO MATOSO S.A. MONTELÍBANO, CÓRDOBA\***

**AUTHOR: CIRO RAÚL SÁNCHEZ BOTELLO\*\***

**KEY WORDS:** Cerro Matoso, Laterites, Basin, Structural-Features, Waste Rock, Stripping.

### **DESCRIPTION:**

The ferronickel production at Cerro Matoso S.A, consist of 5 stages: mining exploitation, partial drying of mineral, calcination, melting and granulation. During calcination stage, mineral coal is used for: chemical reduction of lateritic materials, obtaining by-products, and moving to further stages to complete the production process. At Balsillas area of Cerro Matoso, some coal layers have been found, which are associated with Cerrito formation, and located in a basin which the following lithological units, from bottom to top: Cerro Matoso's ultramafites, slope deposits, and Cerrito formation.

Due to the relevance of the coal in this economic process, this project is executed by the exploration department of Cerro Matoso S.A, which aims to the delimitation of areas with potential presence of coal. For development, data from 698 drillings and 41 outlines (N-S and E-W oriented) were used to make a digital model of the basin where the coal is deposited; Structural features were defined, and showed no evidence of been related with the mineral distribution within the basin. The coal layers were classified statistically from to base of the Cerrito formation, this resulted in 4 levels classified by altitude (MAMSL); level 1 (from -8 m to 10 m) and level 2 (10 m to 20 m) are present within an influence area of max. 20 m, they are 0.5 to 1 m thick and can be found nearby de bottom of Cerrito formation, with a thickness of 10 m to 50 m on waste materials. In the other hand, level 3 (20 m to 28 m) and 4 (28 m to 40 m) are found widespread within the basin, with no possibilities of being tracked by altitude, hence, layers level 1 and 2 have a higher coal potential than 3 and 4 and were delimitated in two areas; a and b

---

\* Graduate Project. Modality: Business Practice.

\*\* Faculty of Physical and Chemical Engineering. Geology School. Director: Carlos A. Ríos Reyes

## INTRODUCCIÓN

Cerro Matoso está localizado al Suroeste del municipio de Montelíbano, en la región alta del río San Jorge en el Departamento de Córdoba, fue descubierto por la compañía petrolera Shell. En 1979 se dio inicio a la etapa de Explotación, participando en esta las compañías IFI, Conicol S.A. y Billiton Overseas Ltda., consolidando lo que hoy se conoce como Cerro Matoso S.A. y donde se encuentran las instalaciones de la empresa Cerro Matoso S.A., hoy propiedad de BHP BILLITON. (Modificado de: FORERO, J., LONDOÑO, J. 2009. El níquel en Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética, 42 P. Bogotá.)

En la actualidad Cerro Matoso S.A, ha localizado en sus alrededores mantos de carbón, que según su potencial podría ser empleado en el proceso de producción de ferroníquel, dando la posibilidad de utilizar su propio recurso reduciendo los costos de compra para esta materia prima.

En el área de estudio, existe información de diversas campañas de perforación a diferente malla o espaciado entre pozos, que requieren de un estudio detallado para evaluar el potencial de carbón (esta información no incluye ningún tipo de registros). De las cuales se obtuvieron secciones geológicas de 378 pozos a partir de descripción geológica de campo, que permite correlacionar litológicamente los diferentes tipos de roca recuperados por perforación destructiva. Además, existen estudios previos e interpretados de tomografías eléctricas, secciones sísmicas y modelo digital de elevación, que integradas dan la posibilidad de identificar zonas potenciales de carbón objetivo principal del caso de estudio.

## 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

### 1.1. OBJETIVOS

**1.1.1. Objetivo General.** Delimitar zonas con presencia de carbón que puedan representar un potencial económico.

#### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar correlación litológica utilizando las secciones N-S y E-W obtenidas a partir de los pozos perforados en el área de interés.
- Definir las posibles estructuras que controlan la depositación sedimentaria a partir de información previa como tomografías eléctricas, secciones sísmicas y modelo digital de elevación de Cerro Matoso S.A.
- Delimitar las áreas con mayor potencial de carbón.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

El proceso de producción de ferroníquel en Cerro Matoso consta de 5 fases fundamentales: fase de explotación minera, secado parcial de mineral, fase de calcinación, fundición y granulación. En la fase de calcinación, principalmente se usa carbón y otros reactivos químicos para reducir el material laterítico oxidado, producir derivados y pasar a las siguientes fases hasta completar el proceso. Dada la importancia del carbón en este proceso y con el ánimo de reducir costos aprovechando un recurso propio, Cerro Matoso S.A ha descubierto en sus alrededores, zonas con presencia de carbón que según su potencial podría ser utilizado en el proceso pirometalúrgico para la producción de ferroníquel.

Actualmente la información obtenida de las diferentes mallas de perforación por el método de Circulación Reversa y muestreo de ripios por intervalos de 2 (dos) metros (Figura 2 y 3), está dispuesta en base de datos con descripción litológica, química, y secciones o cortes orientados en sentido N-S y E-W que están sin interpretar.

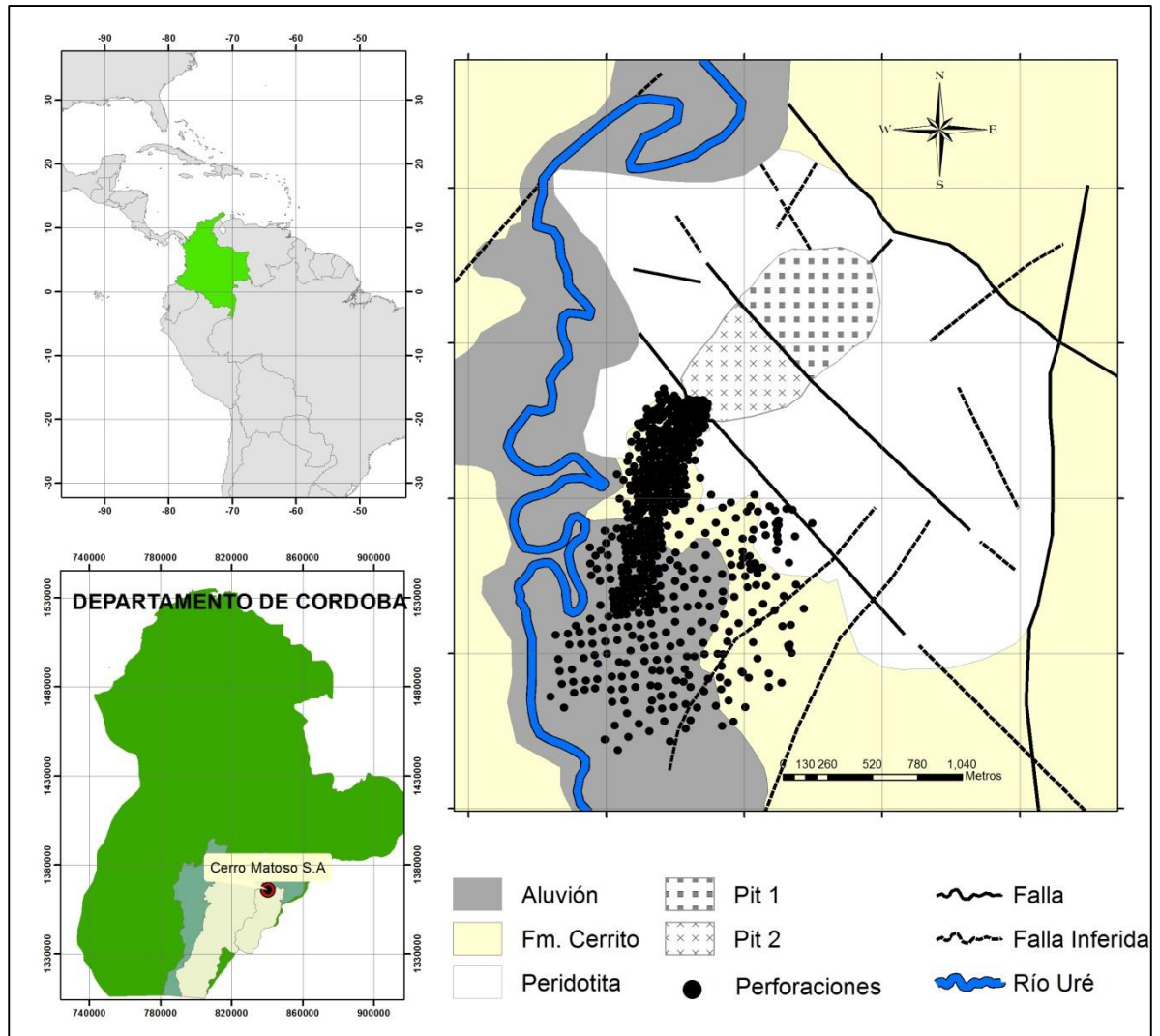
Dentro del análisis de varias propuestas de estudios a realizar en la Unidad de Negocios de Exploración como desarrollo de práctica empresarial, se consideró utilizar la información antes mencionada para sectorizar zonas de carbón con mayor interés económico realizando correlaciones litológicas y delimitando lineamientos estructurales, con el ánimo de evaluar el potencial de carbón para una posible extracción minera en la zona de interés.

### 1.3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Cerro Matoso S.A. está localizado en la zona noroccidental de Colombia, Departamento de Córdoba, a una latitud de 7°54'N y longitud 75°33'W. El acceso al cerro se realiza a través de una carretera pavimentada de 22 km, desde el municipio de Montelíbano, ubicada al noreste de Cerro Matoso (**Figura 1**).

El área de Balsillas se encuentra en el extremo sur occidental (SW) de Cerro Matoso S.A, y consta de 241 hectáreas o 2.41 Km<sup>2</sup> de extensión áreal, representada en la figura 1 por puntos negros que indican las perforación.

Figura 1. Localización del área de estudio y rasgos estructurales que controlan el depósito de Cerro Matoso



Fuente: Adaptado de GLEESON, S., HERRINGTON, R., DURANGO, J., VELÁSQUEZ, C., Y KOLL, G. 2004. The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia. Edited by Economic Geology. 17 P.

#### 1.4. METODOLOGÍA

**Revisión Bibliográfica:** durante el tiempo de realización de la práctica empresarial, se llevó a cabo la revisión bibliográfica de estudios anteriores de Cerro Matoso S.A. para dar enfoque en el área de interés estudiada.

**Análisis de datos:** en esta fase se revisa la base de datos con información de pozos perforados en el área de Balsillas, que integra información geológica de campo y resultados químicos de elementos como níquel, sílice, aluminio, cobalto, calcio, manganeso. Se chequean las interpretaciones previas de secciones sísmicas, tomografías eléctricas y modelo digital de elevación de Cerro Matoso S.A.

**Interpretación:** el insumo principal de este trabajo, son las secciones geológicas de 378 pozos impresas del área de interés, realizadas con el software Datamine proporcionado por la empresa, donde se diferencian los diferentes tipos de roca presentes en la zona. A partir de estas secciones se realiza la correlación por tipo de roca, que evidencian variaciones en el espacio de acomodación, se integra la información de secciones sísmicas, tomografías eléctricas, modelo digital de elevación y se realizan 3 modelos tridimensionales que representan la superficie del basamento cristalino, los depósitos de ladera transportados principalmente de la mina y el tope de la Formación Cerrito, utilizando la profundidad a la cual se encuentra cada tipo de roca para posteriormente interpolarla utilizando el método IDW (Inverso de la distancia al cuadrado) realizado en el software ArcGis 10.1, proporcionado por la empresa.

**Definición de áreas con potencial de carbón y redacción del informe:** la información obtenida durante las etapas antes mencionadas, comprendida entre febrero y agosto del año 2014, permitieron alcanzar el objetivo propuesto para dar inicio a la redacción de este informe.

## 2. GEOLOGÍA REGIONAL

### 2.1. GEOLOGIA ESTRUCTURAL REGIONAL

Estructuralmente la zona está dividida en tres dominios principales: el cinturón de Sinú, el cinturón de San Jacinto y el borde occidental del valle inferior del Magdalena, el cual a su vez se divide en las subcuencas de Plato y San Jorge. **(Figura 2)**

El cinturón de San Jacinto, se encuentra fragmentado en varios bloques que corresponden topográficamente con las serranías de Luruaco, San Jacinto, San Jerónimo y con gran parte de las cuchillas de Cispata al sur del golfo de Morrosquillo. Estas serranías constituyen los bloques con mayor deformación tectónica y se encuentran “rodeadas” por zonas o depresiones con menor deformación. (GUZMÁN, G., GOMÉZ, E., Y SERRANO, E. 2004. Geología de los cinturones del Sinú, san Jacinto y borde occidental del valle inferior del magdalena. Instituto Colombiano de Geología y Minería, 134 P. Bogotá)

**2.1.1. Sistema de Falla de Romeral.** Barrero et al. (1969) usan el nombre de Falla fundamental de Romeral para designar una zona de falla con longitud de más de 800 Km a partir del sur de Colombia hacia el norte, hasta el área de Montelíbano y Planeta Rica, con un buzamiento hacia el este que separa las cordilleras Central y Occidental (Figura 2). (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba)

Según Duque Caro (1980), la Falla de Romeral en el área de Planeta Rica y Cerro Matoso, no es claramente reconocible como en el área donde fue descrita originalmente, ya que el rasgo geomorfológico principal está fosilizado por los depósitos terciarios y cuaternarios de la cuenca del San Jorge. Distingue dos elementos geotectónicos principales: una región estable o de plataforma que suprayace a una corteza continental no plegada, como es el caso de la cuenca del San Jorge, con los sedimentos de la Formación Sincelejo, y una región geosinclinal que suprayace a una corteza oceánica plegada, al occidente de la Falla Romeral, que comprende los sedimentos que están alrededor de los cuerpos de peridotita de Planeta Rica, Cerro Matoso y Uré. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba))

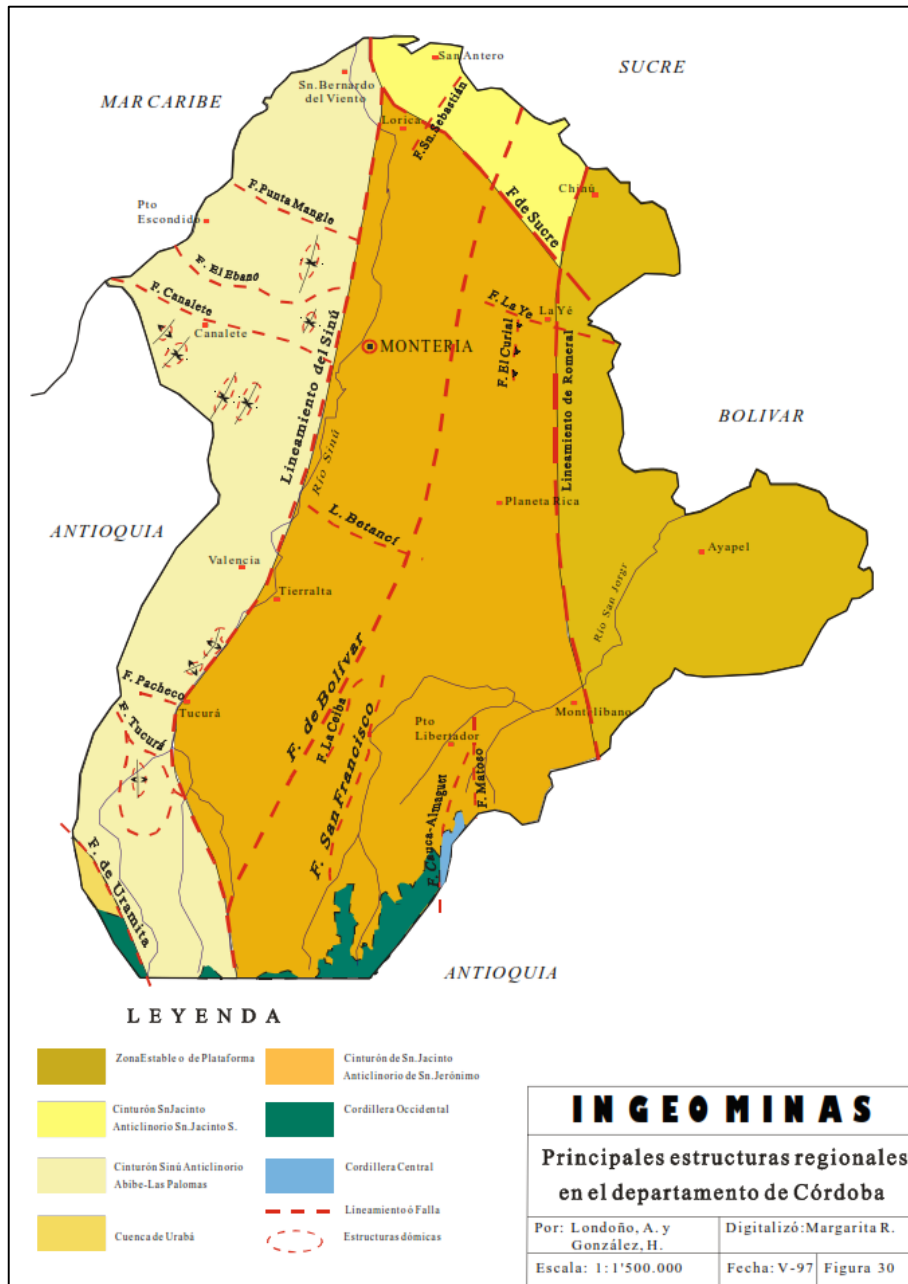
**2.1.2. Cinturón de San Jacinto.** Esta unidad estructural (DUQUE, 1979) marca el límite oriental del Terreno Sinú-San Jacinto y está localizada adyacente a la zona de plataforma. El cinturón está limitado al oriente por el lineamiento estructural de Romeral y al occidente por el del Sinú (Figura 2) y está constituido por una faja sedimentaria plegada y fallada, parte de un prisma de acreción plegado y fallado como consecuencia de la convergencia entre las placas Caribe y Suramericana. (GUZMÁN, G., GOMÉZ, E., Y SERRANO, E. 2004. Geología de los cinturones del Sinú, san Jacinto y borde occidental del valle inferior del magdalena. Instituto Colombiano de Geología y Minería, 134 P. Bogotá)

Con base en la orientación de las estructuras presentes y las características estratigráficas, este cinturón puede ser dividido en cuatro segmentos cuyos límites corresponden a lineamientos con dirección W-NW; estos segmentos han sido denominados de sur a norte: Anticlinorios de San Jerónimo, San Jacinto Sur, San Jacinto Norte y Luruaco, (**Figura 3**) de los cuales los dos primeros se encuentran en el Departamento de Córdoba. En general, las fallas principales en este cinturón

tienen dirección NS - N5°E y son de cabalgamiento con vergencia hacia el occidente. Las fallas NNE son principalmente de rumbo con desplazamiento sinistral. (GONZÁLEZ, H., LONDOÑO, A. 2001. Mapa geológico del departamento de Córdoba. Documento Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear, 144 P. Bogotá)



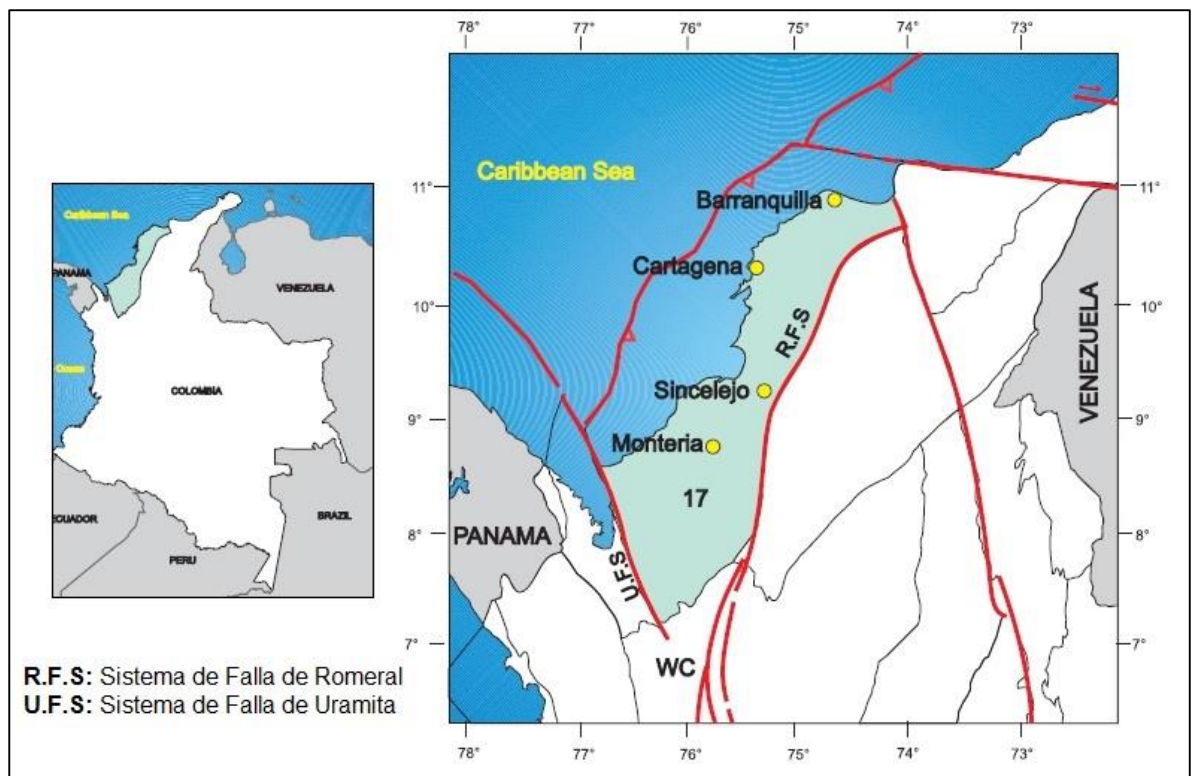
Figura 3. Principales estructuras regionales en el departamento de Córdoba



Fuente: GONZÁLEZ, H., LONDOÑO, A. 2001. Mapa geológico del departamento de Córdoba. Documento Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear, 144 P. Bogotá

**2.1.3. Cuenca Sinú - San Jacinto.** La cuenca Sinú-San Jacinto está ubicada al norte de Colombia, se encuentra limitada al este por el sistema de Falla de Romeral, al noroeste con la Costa del Caribe, al oeste con el sistema de Falla de Uramita y al sur con rocas sedimentarias y volcánicas cretácicas de la Cordillera Occidental (**Figura 4**). El desarrollo estructural de la cuenca, está ligada a la zona de deformación transpresional generada por el desplazamiento de la placa del Caribe. (BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C., Y MARTINEZ, J. 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos, 91 P. Bogotá)

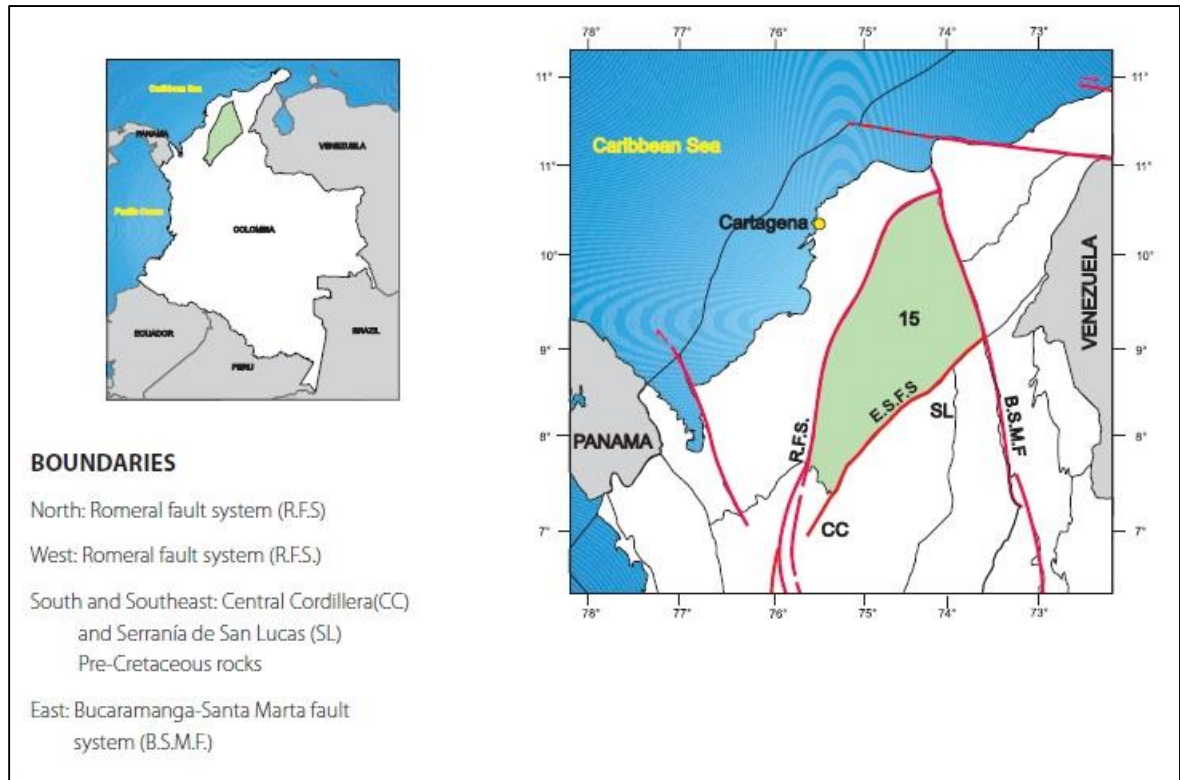
Figura 4. Ubicación de la Cuenca Sinú - San Jacinto y sus límites estructurales



Fuente: BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C., Y MARTINEZ, J. 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos, 91 P. Bogotá

**2.1.4. Cuenca Valle Inferior del Magdalena.** La Cuenca del Valle Inferior del Magdalena, es una cuenca transpresional triangular delimitada al norte y al oeste por el Sistema de Falla de Romeral y al sur y sureste por el complejo ígneo-metamórfico de la Cordillera Central y la Serranía de San Lucas, delimitadas por el Sistema de Falla de desgarre Espíritu Santo, al este la cuenca está limitada por una porción norte del Sistema de Falla Bucaramanga – Santa Marta. Un alto de basamento divide la cuenca de Plato al norte y al sur la Sub-cuenca del San Jorge (Figura 5). (BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C., Y MARTINEZ, J. 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos, 91 P. Bogotá)

Figura 5. Ubicación de la Cuenca Valle Inferior del Magdalena y sus límites estructurales



Fuente: BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C., Y MARTINEZ, J. 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos, 91 P. Bogotá

## 2.2. ESTRATIGRAFÍA DEL CINTURON DE SAN JACINTO

Las formaciones geológicas que corresponden al anticlinorio de San Jerónimo en el departamento de Córdoba, son las siguientes. Ver columna estratigráfica en **(Figura 6)**

**2.2.1. Peridotita de Planeta Rica (Kp).** Nombre asociado el Municipio de Planeta Rica del departamento de Córdoba, propuesto por Dueñas y Duque Caro (1981), para referirse a una peridotita tipo harzburgita con asociaciones locales de serpentinas y gabros. Su edad se considera anterior al Santoniano (Cretácico Tardío) de espesor desconocido. Este cuerpo infrayace la Formación Cansona y hacia su flanco oriental está en contacto con los Basaltos de Nuevo Paraíso; su génesis se reportada como parte de corteza oceánica acrecionada al continente. (GUZMÁN, G., GOMÉZ, E., Y SERRANO, E. 2004. Geología de los cinturones del Sinú, san Jacinto y borde occidental del valle inferior del magdalena. Instituto Colombiano de Geología y Minería, 134 P. Bogotá)

**2.2.2. Basaltos de Nuevo Paraíso (Kb).** La unidad está constituida por basaltos de composición toleítica, de textura porfirítica con matriz microcristalina y una intensa alteración y formación de costras superficiales de óxidos de hierro. Localmente se encuentran intercalados con cuerpos diabásicos y tobas (DUEÑAS & DUQUE, 1981). Su espesor es desconocido y se considera parte de corteza oceánica acrecionada al continente entrando en contacto con las Peridotitas de Planeta Rica en el flanco oriental. Según Etayo en Dueñas y Duque Caro (1981) son de una edad anterior al Coniaciano teniendo en cuenta su posición estratigráfica (GUZMÁN, G., GOMÉZ, E., Y SERRANO, E. 2004. Geología de los cinturones del Sinú, san Jacinto y borde occidental del valle inferior del magdalena. Instituto Colombiano de Geología y Minería, 134 P. Bogotá).

**2.2.3. Formación Cansona (K<sub>2c</sub>).** Su nombre es asociado al Cerro Cansona ubicado en los Montes de María en el departamento de Bolívar. Consta de chert estratificado en capas delgadas, intercalado con limolitas silíceas con restos fosfáticos, con un espesor promedio de 100 metros. Este cuerpo del Cretácico Superior (Santoniano - Maastrichtiano), descansa discordante sobre la Peridotita de Planeta Rica y su contacto superior es considerado discordante en la región de Santa Rosa. (GUZMÁN, G., GOMÉZ, E., Y SERRANO, E. 2004. Geología de los cinturones del Sinú, san Jacinto y borde occidental del valle inferior del magdalena. Instituto Colombiano de Geología y Minería, 134 P. Bogotá).

**2.2.4. Formación San Cayetano (E<sub>1</sub>E<sub>2sc</sub>).** Originalmente utilizado por *Chenevart* (1963), donde aparentemente su nombre tiene origen en el corregimiento de San Cayetano, departamento de Bolívar. Estas secuencias granodecrecientes de litoarenitas arcósicas de cemento silíceo y localmente calcáreo del Paleoceno Tardío – Eoceno Temprano, en promedio tiene un espesor de 240 m y está en contacto discordante con la suprayacente Formación Péndales. (GUZMÁN, G., GOMÉZ, E., Y SERRANO, E. 2004. Geología de los cinturones del Sinú, san Jacinto y borde occidental del valle inferior del magdalena. Instituto Colombiano de Geología y Minería, 134 P. Bogotá).

**2.2.5. Formación La Tampa (P<sub>get</sub>).** Esta unidad fué definida por Duque et al. (1983) como una secuencia de lodolitas silíceas y calizas compactas de color gris que aflora en la carretera Montería-Planeta Rica. En la cantera La Balastrea, aparece como una secuencia de capas delgadas de calizas compactas, de color gris y lodolitas silíceas con estratificación plana paralela (INGEOMINAS-ECOPETROL, 1994) muy meteorizadas y fracturadas. Al sur, entre las poblaciones de Santa Isabel y Las Palomas afloran calizas blanco-amarillentas fosilíferas con macro y microfósiles calcáreos, en una matriz micrítica con glauconita. (GONZÁLEZ, H., LONDOÑO, A. 2001. Mapa geológico del departamento de Córdoba. Documento Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear, 144 P. Bogotá)

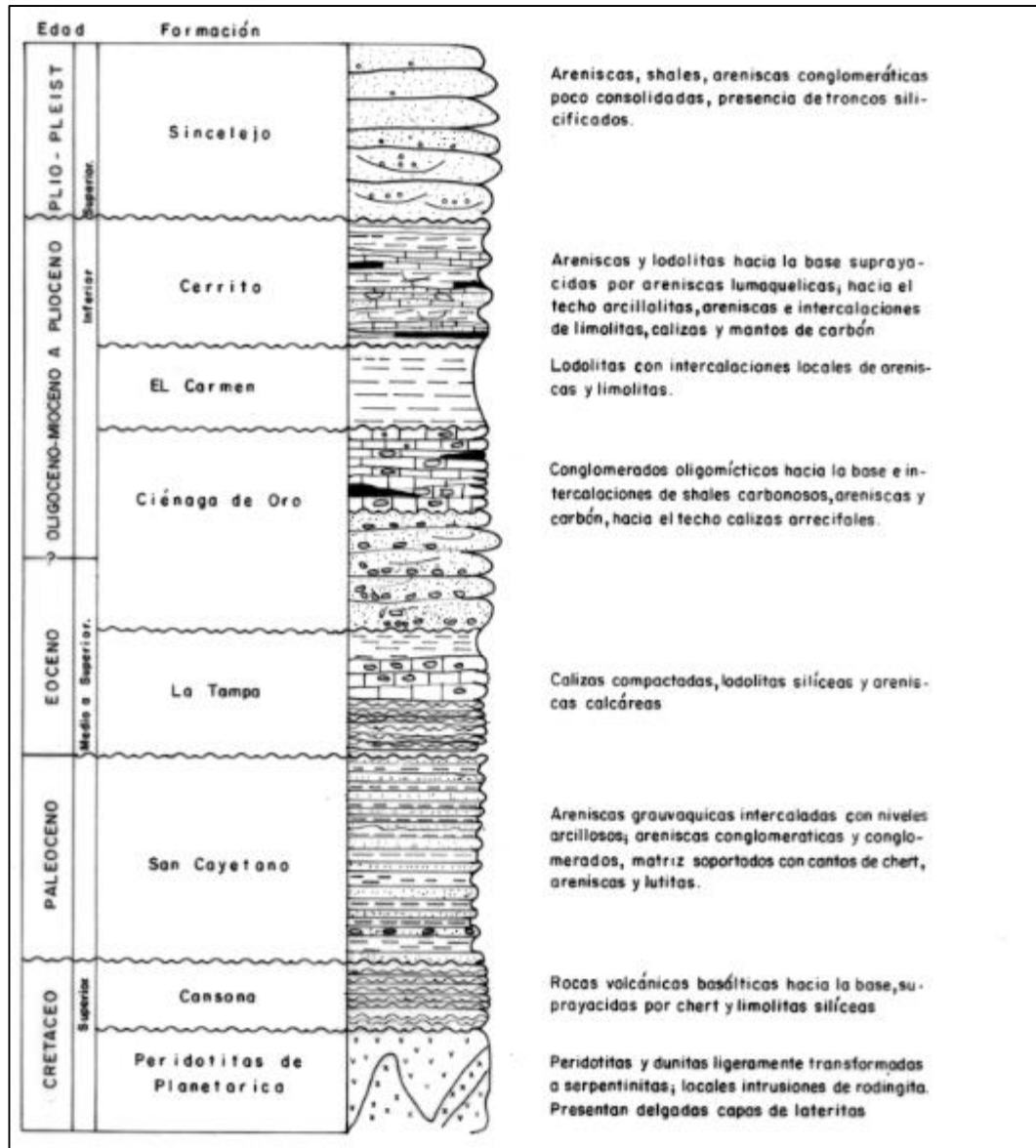
**2.2.6. Formación Ciénaga de Oro (Pgoco).** Nombre asignado por Duque (1973) para una secuencia de areniscas y shales que afloran en la carretera Montería - Planeta Rica. Es una formación arenosa a conglomerática principalmente con intercalaciones de estratos arenosos, calcáreos y shales carbonosos. Las areniscas son abirragadas, con concentración de óxidos de hierro. (GONZÁLEZ, H., LONDOÑO, A. 2001. Mapa geológico del departamento de Córdoba. Documento Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear, 144 P. Bogotá)

**2.2.7. Formación Cerrito (Tpc).** Originalmente descrita por Werenfels (1926). La base de la formación está representada por un nivel calcáreo que en el área de Planeta Rica (Miraflores) y Loma Azul (km 6 carretera Planeta Rica – Montería) es una caliza maciza, compacta, dura, de color amarillo oscuro y abundante contenido de moluscos, con un espesor promedio de 20 m (Tpla) y en el área de Colomboy – Bajo Grande consiste en arenas calcáreas, blanco amarillentas, con nódulos arcillosos incluidos; en la carretera la Ye – Ciénaga de Oro presenta una intercalación de arenas calcáreas, amarillentas muy fosilíferas, con un banco intercalado de caliza fosilífera, amarillenta de 0.50 metros de espesor. (DUEÑAS & DUQUE, 1981). En la parte media, es arcillosa con pequeñas intercalaciones arenosas amarillentas con abundantes moluscos con un espesor máximo de 0.5 m; la coloración de los shales es muy variable, rojizos y café en el medio y blanco grisáceo en el tope donde además de shales negros, se encuentran mantos de carbón. Según Guzmán et al (2004) la Formación Cerrito tiene un espesor promedio de 257 metros, aunque se estima que su espesor es del orden de los 700 metros. Las condiciones ambientales reconocidas dentro de esta formación, indican profundidades menores de 600 m hacia la base y marinas muy someras a continentales hacia su parte superior. (DUEÑAS, H., DUQUE, H. 1981. Geología del cuadrángulo F-8. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras, 35 P. Bogotá).

**2.2.8. Formación Sincelejo (N<sub>2</sub>Q<sub>1s</sub>).** La Formación Sincelejo es de carácter continental y se compone de arenas y shales. Su parte inferior es más arcillosa que arenosa, presentándose shales grises claros con cantidades menores de arenas, que localmente pueden ser calcáreos como se observa en El Crucero; la parte intermedia y superior de la secuencia es arenosa, presentándose arenas de grano medio a grueso, color amarillo, poco consolidadas, en parte conglomeráticas, estratificación cruzada muy notoria y ocasionales fragmentos de troncos silicificados (Morrocoy). Los conglomerados cuarzosos son abundantes en la parte superior, encontrándose como lentes o como interestratificaciones dentro de las arenas. Es abundante el contenido arcilloso dentro de los conglomerados. (DUEÑAS, H., DUQUE, H. 1981. Geología del cuadrángulo F-8. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras, 35 P. Bogotá)

La Formación Sincelejo tiene un espesor de 1550 metros en la sección Villa Betty-troncal de occidente. El INGEOMINAS reporta una edad Mioceno Superior-Plioceno para la Formación Sincelejo. (DUEÑAS, H., DUQUE, H. 1981. Geología del cuadrángulo F-8. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras, 35 P. Bogotá)

Figura 6. Columna estratigráfica del Cinturón plegado de San Jacinto (Anticlinorio de San Jerónimo)



Fuente: GONZÁLEZ, H., LONDOÑO, A. 2001. Mapa geológico del departamento de Córdoba. Documento Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear, 144 P. Bogotá

### **2.3. REGIONES CARBONÍFERAS DE COLOMBIA**

En la historia geológica existen tres grandes épocas de formación de carbones: los del Carbonífero que corresponden a carbones euro-americanos del hemisferio norte; los del Pérmico, desarrollados en condiciones un poco diferentes a los anteriores; en el hemisferio sur, son llamados carbones de Godwana y por último los carbones más jóvenes, formados en el Mesozoico Superior y en el Cenozoico, tanto en América como en Europa a los cuales pertenecen los carbones Colombianos (MEJÍA, L., PULIDO, O. 1993. Regiones y zonas de Carbón en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 25 P. Bogotá).

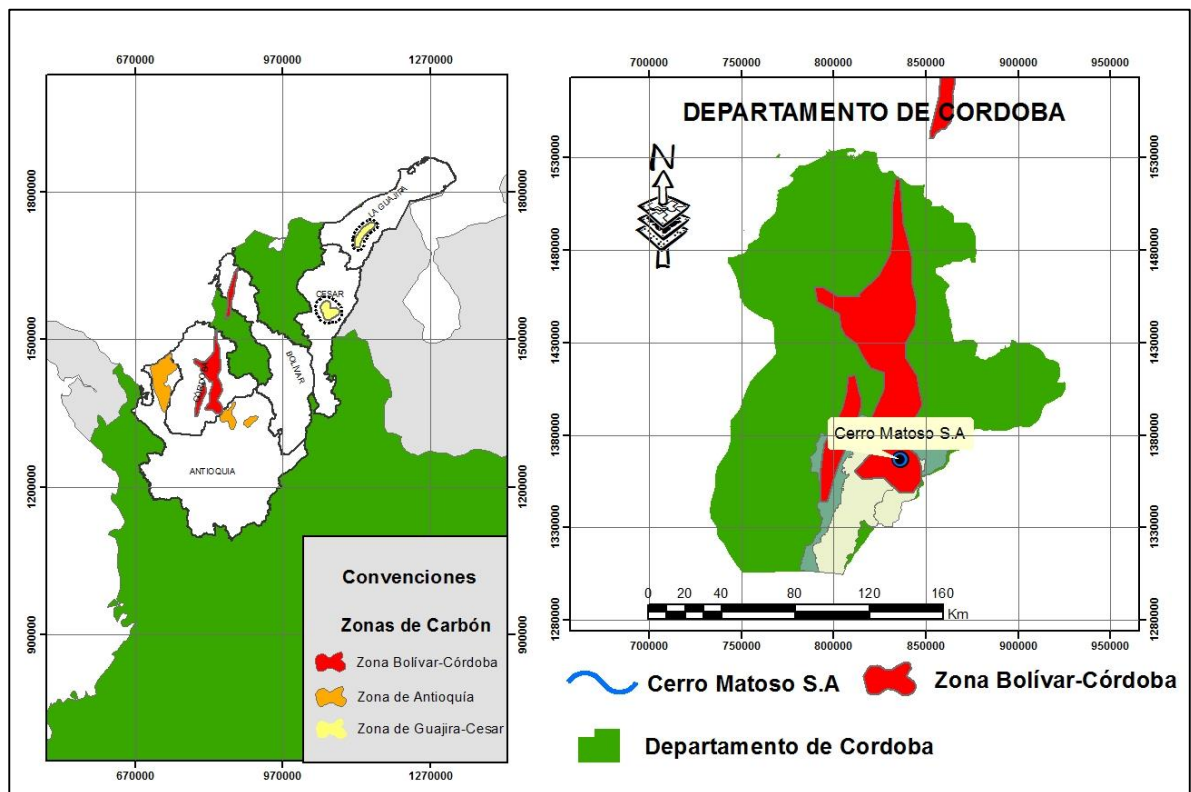
El actual territorio Colombiano estuvo cubierto por el mar casi en su totalidad durante el Cretáceo, a finales del cual comienza su retirada. Durante esa regresión marina se dio origen a una gran llanura aluvial que dejó cubierta lo que hoy se conoce como la Cordillera Oriental y parte de lo que ocupan los Llanos Orientales. Esta amplia llanura sumado a otros eventos geológicos dieron origen a los carbones en los departamentos de Norte de Santander, Santander, Cundinamarca y Boyacá durante el Cretáceo Superior (Maestrichtiano). Posteriormente la línea de costa en el Terciario (Paleoceno) se mueve un poco hacia el occidente y se depositan principalmente los carbones de la Guajira y Cesar. Finalmente, después de diversos eventos se depositan principalmente los carbones de Antioquia, Valle y Cauca durante el Terciario Medio y Superior (MEJÍA, L., PULIDO, O. 1993. Regiones y zonas de Carbón en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 25 P. Bogotá).

Desde el punto de vista geográfico y de mercadeo, el país se dividió en cinco regiones carboníferas denominadas: Atlántica, Central, Pacífica, Borde Llanero y Amazónica (MEJÍA, L., PULIDO, O. 1993. Regiones y zonas de Carbón en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 25 P. Bogotá).

Para efectos prácticos de este trabajo de investigación, se hará énfasis en la Región Atlántica, teniendo presente la zona Bolívar-Córdoba, área de interés particular para el desarrollo del proyecto (**Figura 7**).

**2.3.1. Región Atlántica.** Esta región comprende toda la zona de la Costa Atlántica de Colombia, que tiene gran importancia debido a la facilidad de exportación de los carbones. Para su descripción se subdividió en tres zonas denominadas: Guajira-Cesar, Bolívar-Córdoba y Antioquía (**Figura 7**).

Figura 7. Región carbonífera de Atlántico



Fuente: Adaptado de MEJÍA, L., PULIDO, O. 1993. Regiones y zonas de Carbón en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 25 P. Bogotá

**2.3.1.1. Zona Bolívar – Córdoba.** Está situada en la parte centro – occidental de la región e incluye tres subzonas denominadas San Jacinto, Ciénaga de Oro y Alto San Jorge. Ha adquirido cierta importancia, al comprobarse la existencia de carbón en cantidades apreciables. Por los resultados parciales reportados por Carbocol (1985), el sector del Alto San Jorge tiene recursos geológicos cercanos a los 5.000 millones de toneladas con carbón de alto poder calorífico, con un promedio de 7.132 cal/gr.

### 3. GEOLOGÍA LOCAL

#### 3.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Cerro Matoso presenta dos sistemas principales de fallas; el primero con rumbo noreste es paralelo al sistema de Falla Romeral (BARRERO et al, 1969 en LÓPEZ-RENDÓN, 1986), asociado a fallas normales de alto ángulo y buzamientos entre 65° y 70° hacia el este; Durango y Gaviria (1987) indican que el buzamiento de este sistema es en dirección NW. El segundo sistema de falla tiene un rumbo noroeste y está asociado a fallas normales de muy alto ángulo, con buzamientos mayores a los 78° hacia el noreste (**Figura 1**). (HOYOS, N., VELÁSQUEZ, C. 1996. Análisis del origen de la laterización y saprolitización del yacimiento niquelífero de Cerro Matoso departamento de Córdoba. Universidad EAFIT, 99 P. Medellín)

#### 3.2. ESTRATIGRAFÍA DE CERRO MATOSO S.A.

Las diferentes unidades litológicas, pertenecen únicamente al área de interés (**Figura 8**). Para las unidades que corresponden al perfil de alteración y los depósitos de ladera, no existen dataciones que permitan dar un rango de edad cercano a la realidad para la formación de cada una de ellas.

**3.2.1. Ultramafitas de Cerro Matoso (Ksucm).** Según Mejía y Durango (1982), la roca madre de Cerro Matoso, es una peridotita piroxenífera (tipo harzburgita), que presenta diques pequeños de dunita y lentes de peridotita serpentinizada con abundantes vetillas de magnesita. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba).

La roca madre está compuesta principalmente por olivino (82%), ortopiroxeno (10%), serpentina (5 %) y como accesorios picotita, magnetita y cromita. Estas rocas al meteorizarse, producen suelos residuales con alta concentración de níquel denominados saprolitos verdes. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba).

Este cuerpo ha sido explotado para la extracción de ferro-níquel, dividido en unidades-bloques de acuerdo con el contenido de MgO-SiO<sub>2</sub>, Ni, Fe y litología. (GONZÁLEZ, H., LONDOÑO, A. 2001. Mapa geológico del departamento de Córdoba. Documento Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear, 144 P. Bogotá)

**3.2.1.1. Perfil de Alteración.** La laterización de peridotitas ha producido una concentración residual de níquel, integrando procesos físicos y químicos complejos. En Cerro Matoso, este proceso generó el siguiente perfil de alteración de techo a base: canga, laterita, saprolito negro, taquilita, saprolito café, saprolito verde, peridotita saprolitizada y peridotita.

Canga: es la unidad superior del perfil laterítico, se presenta en forma endurecida y cementada, con un alto contenido de hierro y en el cual no se presenta rastro textural y composicional de la roca original presentándose en forma masiva y laminar. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba).

- Laterita: material de coloración roja que se encuentra por debajo de la canga, comúnmente se observa abundante cuarzo formando una textura tipo drusiforme - cruciforme, sin conservar la textura de la roca original. En general,

esta capa laterítica se caracteriza por ser un suelo blando y amorfo. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba)

- Sapolito Negro: material verde negruzco, verde oscuro, verde azulado y negro, con alto contenido de cromo, producto de la alteración composicional de la roca madre. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba)
- Taquilita: material café oscuro, quebradizo de poca densidad, fisible de espesor variable con textura cataclástica debido a esfuerzos tectónicos. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba)
- Sapolito Café: material de color café a rojizo, donde aún conserva alguna característica de la roca original, con vestigios de piroxenos muy alterados. El contenido de níquel es considerable, en algunos sitios puede pasar el 3%. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba)
- Sapolito Verde: es la unidad de mayor concentración de níquel y se caracteriza por conservar las estructuras de la roca madre. En estado avanzado de meteorización varía su color a café pardo amarillento, disminuyendo el contenido de magnesio y aumentando el contenido de hierro. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba)
- Peridotita Sapolitizada: es la primera etapa de meteorización de la peridotita, su aspecto es de roca fresca, excepto en las caras expuestas a la meteorización, que son de coloración naranja a verde azulado, presentando

broncita. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba)

- Peridotita: se encuentra en la base del depósito, y es la roca de la cual se formó la mineralización luego de un proceso prolongado de meteorización. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba)

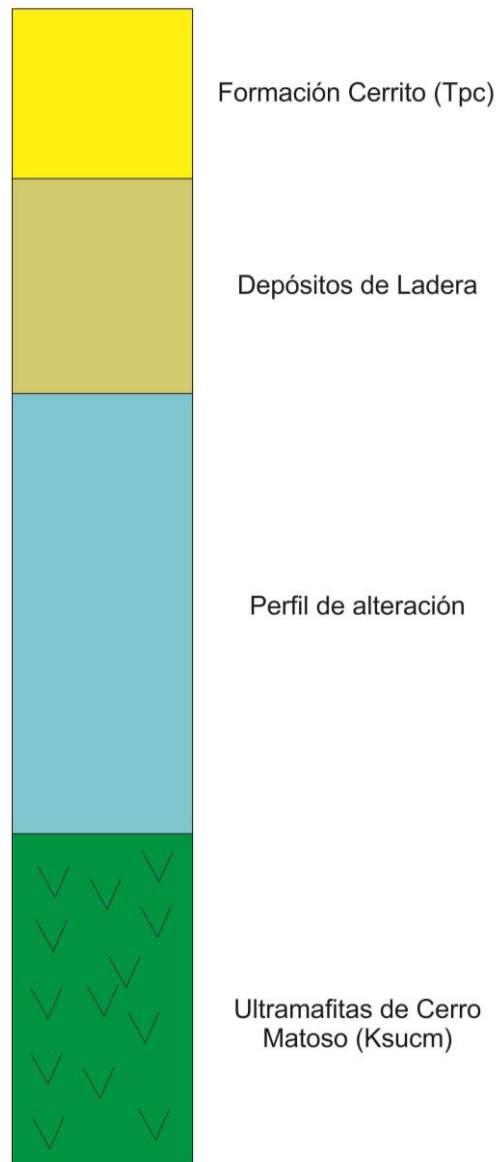
**3.2.2. Depósitos de ladera.** Con un espesor máximo de 80 metros medidos, es predominantemente arenosa, consta en general de una alternancia de areniscas de grano fino a ligeramente conglomerática con pequeñas capas de lodolitas verdosas, frágil y localmente bioturbada. Presenta variaciones en la coloración que van desde tonos rojos hasta verdosos, con presencia de fragmentos de diferentes tipos de roca identificados principalmente en el depósito de Cerro Matoso S.A. Para este tipo de roca, no existen dataciones que permitan acercarse a una edad de depósito, sin embargo por ser parte de una mezcla del perfil de alteración y de roca fresca, se estima que su rango de edad es Cenozoica. (DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba))

**3.2.3. Formación Cerrito (Tpc).** Originalmente descrita por Werenfels (1926). La base de la formación está representada por un nivel calcáreo que en el área de Planeta Rica (Miraflores) y Loma Azul (km 6 carretera Planeta Rica – Montería) es una caliza maciza, compacta, dura, de color amarillo oscuro y abundante contenido de moluscos, con un espesor promedio de 20 m (Tpla) y en el área de Colomboy – Bajo Grande consiste en arenas calcáreas, blanco amarillentas, con nódulos arcillosos incluidos; en la carretera la Ye – Ciénaga de Oro presenta una intercalación de arenas calcáreas, amarillentas muy fosilíferas, con un banco intercalado de caliza fosilífera, amarillenta de 0.50 metros de espesor. (DUEÑAS, H., DUQUE, H. 1981. Geología del cuadrángulo F-8. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras, 35 P. Bogotá).

En la parte media, es arcillosa con pequeñas intercalaciones arenosas amarillentas con abundantes moluscos con un espesor máximo de 0.5 m; la coloración de los shales es muy variable, rojizos y café en el medio y blanco grisáceo en el tope donde además de shales negros, se encuentran mantos de carbón. Según Guzmán et al (2004) la Formación Cerrito tiene un espesor promedio de 257 metros, aunque se estima que su espesor es del orden de los 700 metros. Las condiciones ambientales reconocidas dentro de esta formación,

indican profundidades menores de 600 m hacia la base y marinas muy someras a continentales hacia su parte superior. (DUEÑAS, H., DUQUE, H. 1981. Geología del cuadrángulo F-8. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras, 35 P. Bogotá).

Figura 8. Columna generalizada de la zona de estudio



Fuente: Autor

#### 4. RESULTADOS

La información utilizada para la realización de este proyecto, fue obtenida a partir de pozos perforados por el método de circulación inversa (**Figura 9**) con un muestreo de 2 metros (**Figura 10**), por tanto la descripción de espesores para cada uno de los intervalos descritos en esta fase es cualitativo, ya que este valor varía según el criterio visual de cada geólogo. Previo a este capítulo, se realizó la revisión de la base de datos, donde se identifican y seleccionan los pozos perforados en el área de interés para la asignación de coordenadas en “Z” que corresponde a la altura de inicio de perforación de cada pozo para su posterior interpretación.

Figura 9. Perforación de circulación reversa (RC)



Fuente: Autor

Figura 10. Muestreo de ripios de perforación en intervalos de 2 metros

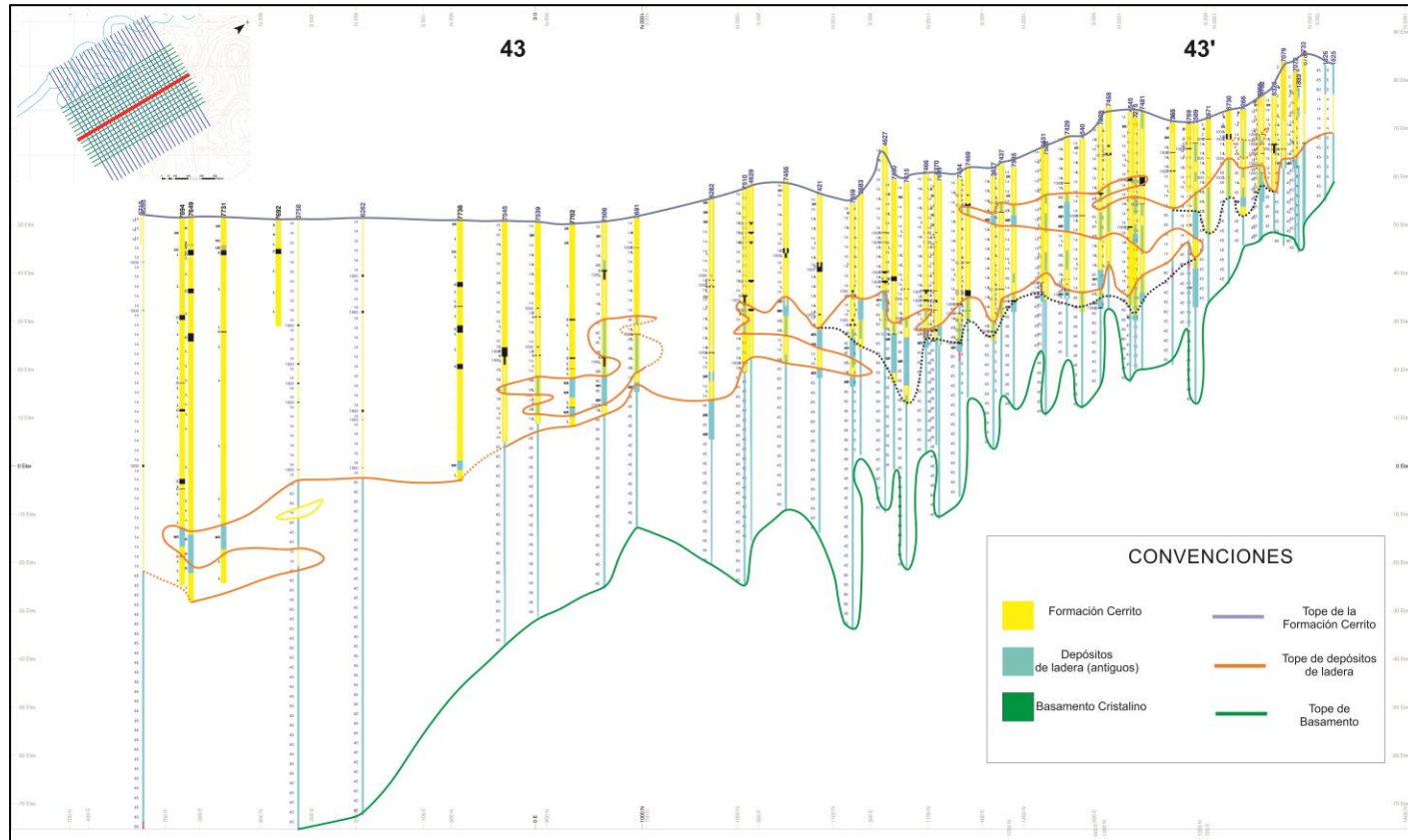


Fuente: Autor

#### 4.1. INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE LAS SECCIONES

Las diferentes secciones geológicas estudiadas, fueron realizadas en el software Datamine Studio 3 a partir de información química y descripción geológica de campo en la que se identifican los diferentes tipos de rocas dentro de la descripción de rípios, para finalmente obtener un total de 41 perfiles con litología y profundidad orientados en sentido Norte-Sur y Este-Oeste, de los cuales 15 son N-S y 26 E-W. En la interpretación litológica (como correlación estratigráfica), se definieron 3 (tres) parámetros sencillos. En el primero, se delimitó el tope de la roca cristalina (en la literatura, ultramáficas de Cerro Matoso) posterior a esto, se marcó el límite superior de los depósitos no consolidados que infrayacen la Formación Cerrito, descritos internamente como depósitos de laderas, de granulometría gruesa, mal calibrado dispuestos en forma de abanico, y finalmente se interpreta el tope de la Formación Cerrito (**Figura 11**) con el fin de entender mejor el espacio de acomodación, teniendo como resultado contactos irregulares en forma de lentes a la base de la Formación Cerrito, interpretando que dicho contacto en el área de estudio, se debe a episodios transicionales en el depósito.

Figura 11. Interpretación litológica de las secciones en sentido Norte-Sur, donde se identifican los diferentes tipos de roca, evidenciando zonas transicionales en el depósito marcadas por el contacto irregular.



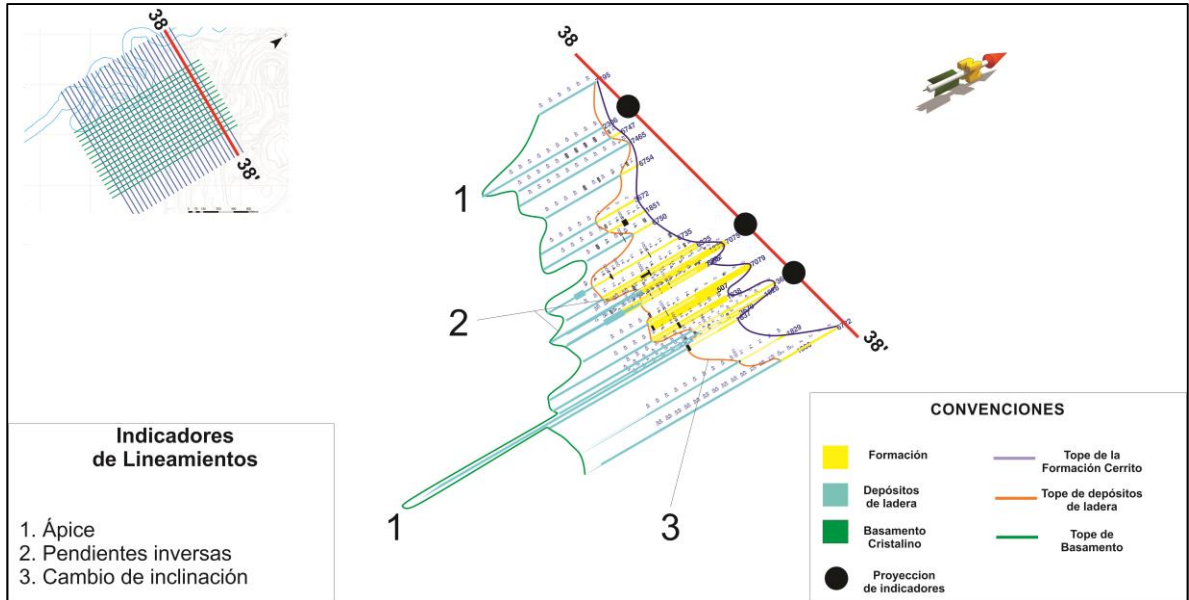
Fuente: Autor

## 4.2. LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES

Para la identificación de posibles estructuras que controlan el depósito de los carbones, se utiliza la correlación (estratigráfica) por tipos de roca en sentido N-S y E-W identificada en las secciones, utilizando como parámetros los ápices, pendientes inversas y cambios de inclinación (**Figura 12**) que sirve de insumo para generar el modelo tridimensional del área de interés, integrando información de estudios previos como tomografías eléctricas, secciones sísmicas y modelo digital de elevación de Cerro Matoso S.A. con el fin de tener la mayor cantidad de datos y generar un trazado confiable de las estructuras.

**4.2.1. Información obtenida a partir de las secciones.** En la identificación de lineamientos estructurales, se tomó como punto de partida la base de la Formación Cerrito que sirve como nivel cero para la depositación del carbón, en ella se observan patrones indicadores de lineamientos como ápices, cambios de inclinación y pendientes inversas en la base de los depósitos de ladera y en la base de la Formación Cerrito (**Figura 12**), que fueron proyectados en superficie a la línea de corte para cada una de las secciones.

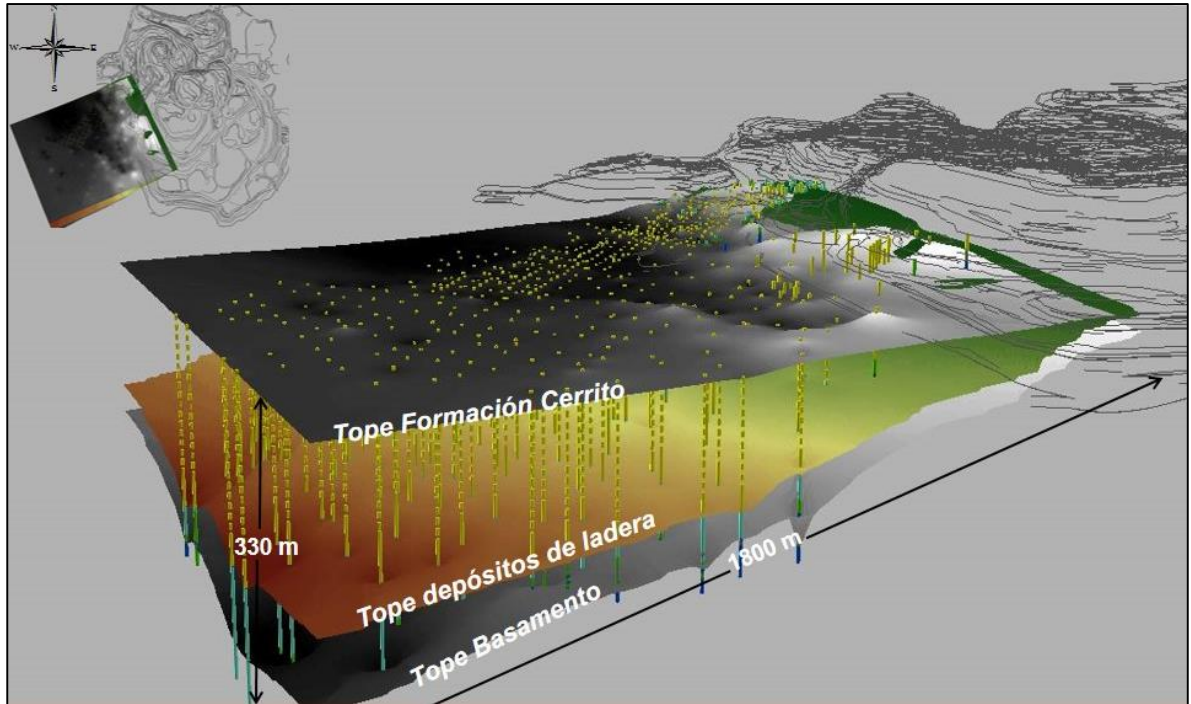
Figura 12. Indicadores de lineamientos proyectados en superficie a partir de las secciones Norte-Sur y Este-Oeste (Vista en corte orientado en N-S).



Fuente: Autor

**4.2.2. Modelamiento Tridimensional (3D) del área de estudio.** Un trazado confiable de lineamientos estructurales, depende en gran medida del conocimiento de la cuenca objeto de estudio. Para este caso, se utiliza información del subsuelo obtenida de la base de datos derivada en diversas campañas de perforación, generando un modelo tridimensional con los diferentes tipos de roca, que corresponden de base a tope a las siguientes: Ultramáfitas de Cerro Matoso, Depósitos de ladera antiguos y Formación Cerrito (**Figura 13**), para la cual se utiliza la coordenada “Z” del tope en cada unidad geológica interpolada por el método Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW) utilizando el software ArcGis 10.1.

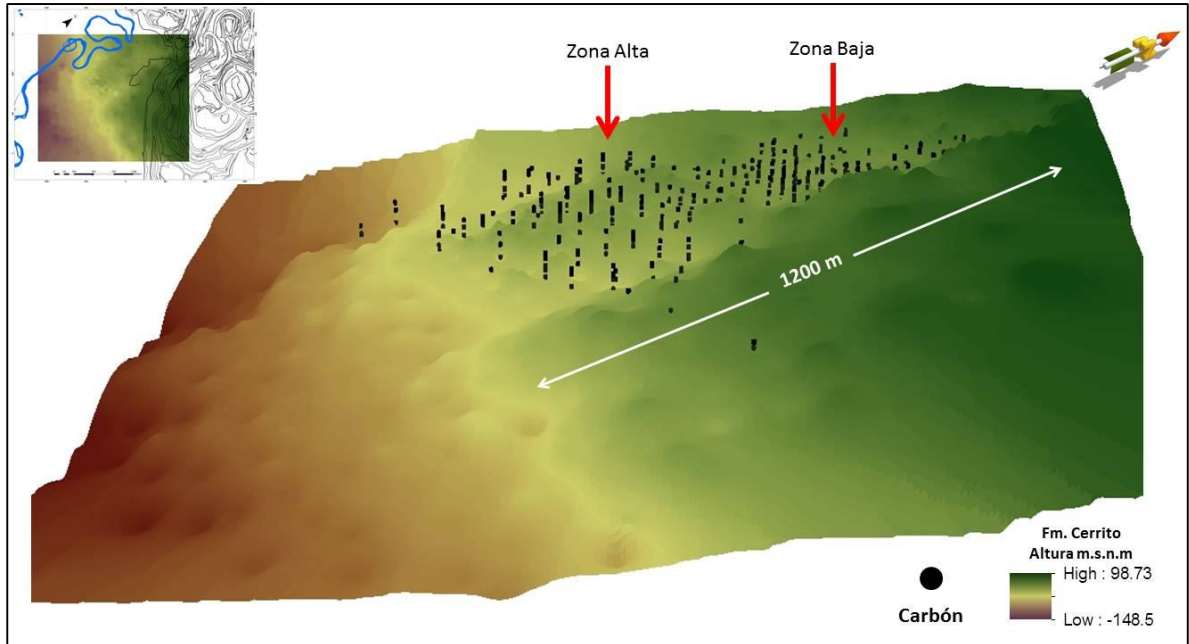
Figura 13. Modelamiento de las unidades geológicas del área de interés, se observa la profundización de la cuenca avanzando en sentido Sur



Fuente: Autor

**4.2.2.1. Superficie de la Formación Cerrito.** Dado que la Formación Cerrito, es la unidad que contiene el carbón objeto de estudio, se realiza la interpolación de 658 pozos, asumiendo que la depositación de esta formación fue homogénea y continua con el fin de facilitar el análisis (teniendo claro que existe un ambiente transicional en el depósito de la Formación Cerrito y los depósitos antiguos de ladera que se evidencian en el corte de la figura 8, interpretado a partir del contacto irregular) En esta superficie, se observan zonas bajas que concentran gran parte de los carbones y zonas altas con menor proporción del mineral (Figura 14). Esta interpolación muestra variaciones en altura respecto al nivel del mar de 98 m a -148 m, evidenciando una profundización del espacio de acomodación con forme se avanza en sentido Sur en la zona estudiada.

Figura 14. Distribución del carbón en la superficie que modela la base de la Formación Cerrito

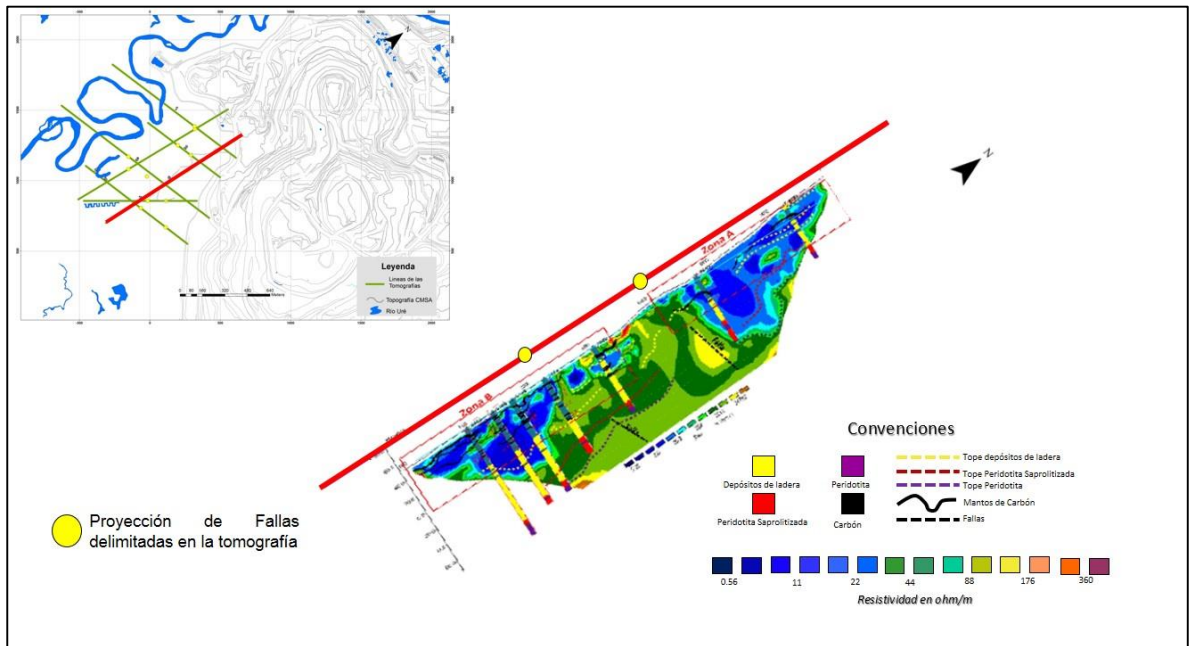


Fuente: Autor

**4.2.3. Uso de Tomografías eléctricas.** El área estudiada consta de siete (7) secciones de tomografías eléctricas extendidas entre 800 y 1000 metros alcanzando profundidades de 160 metros, interpretadas en estudios anteriores, que delimitan fallas sin cinemática en base a las variaciones de la resistividad para cada tipo de roca. Las fallas indicadas en cada sección, se proyectan en superficie a la línea de corte para cada tomografía (**Figura 15**).

Anteriormente se mencionó el uso del Modelo Digital de Elevación de Cerro Matoso S.A y de líneas sísmicas que permitió delimitar estructuras en menor medida. Estos resultados no se muestran en este estudio por ser información de uso exclusivo de Cerro Matoso S.A.

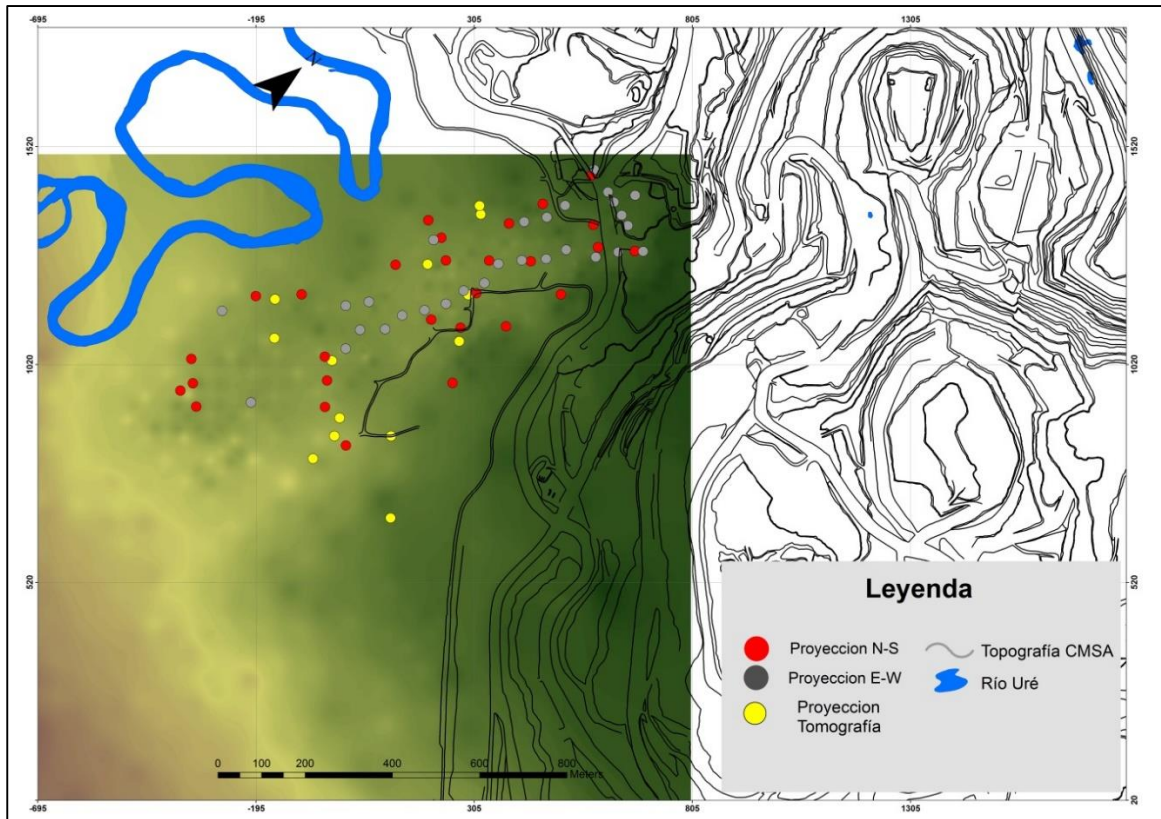
Figura 15. Proyección de fallas a partir de Tomografías Eléctricas



Fuente: Cerro Matoso S.A

**4.2.4. Trazo de lineamientos.** Integrando la información mencionada en el subcapítulo 4.2, se genera una densidad de puntos correspondiente a los indicadores de lineamientos en las secciones y proyección de fallas en las tomografías eléctricas (Figura 16). De los argumentos analizados de las secciones N-S y E-W como ápices, pendientes inversas y cambios de inclinación ilustrados en la Figura 9, se proyectan los ápices presentes en cada sección, dado que es el parámetro que mejor marca la identificación de estructuras en los cortes. Estos parámetros, fueron superpuestos en el modelo digital de elevación de la Formación Cerrito para verificar que exista relación entre las proyecciones y las variaciones del relieve en la base o paleotopografía de esta Formación.

Figura 16. Proyecciones indicadoras de estructuras en la superficie de la Formación Cerrito



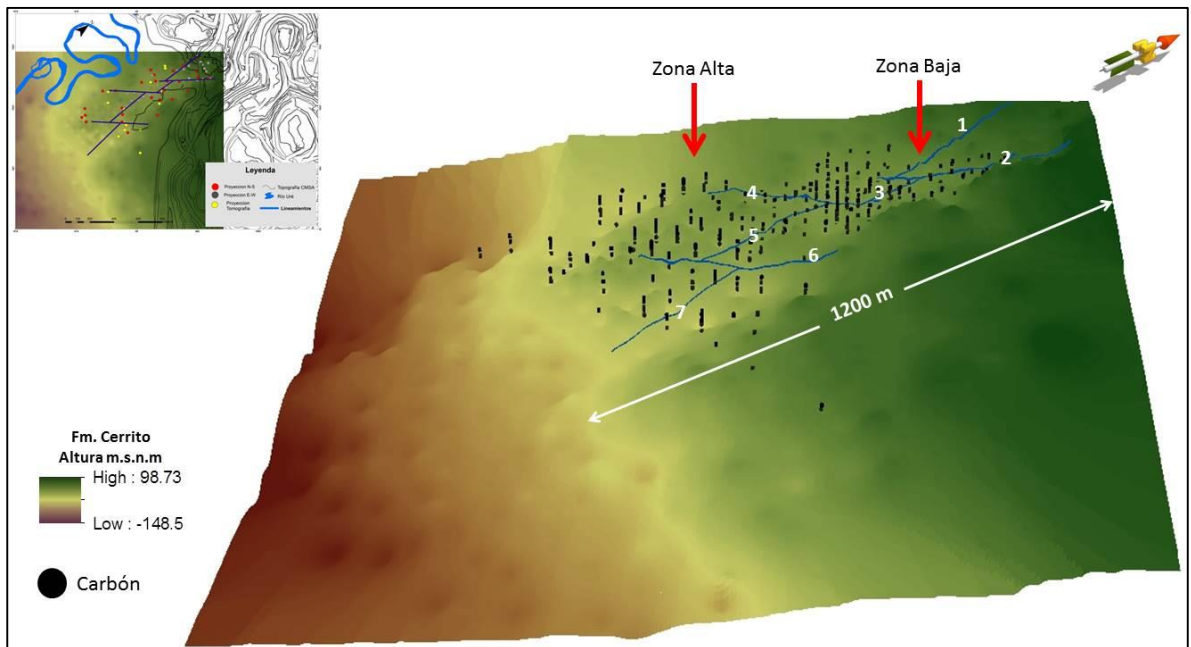
Fuente: Autor

El trazado de los lineamientos se realizó relacionando la información de las secciones N-S y E-W, las fallas de las tomografías eléctricas, el modelo digital de elevación de la Formación Cerrito, secciones sísmicas y modelo digital de elevación de Cerro Matoso S.A, donde los tramos del 1 al 6 presentan continuidad en el trazado por la densidad de información, mientras que el tramo 7 es inferido **(Figura 17)**.

Adicional a esto, el modelo superficial de la Formación Cerrito, permite identificar que existen zonas bajas donde se acumula mayor cantidad de carbón, asociado a un posible movimiento relativo de bloques como se observa en los tramos 1, 2 y 3;

los tramos del 4 al 7 corresponden a un paleoalto topográfico que muestra carbón en menor proporción.

Figura 17. Definición de lineamientos estructurales y distribución del carbón por número de tramos estructurales



Fuente: Autor

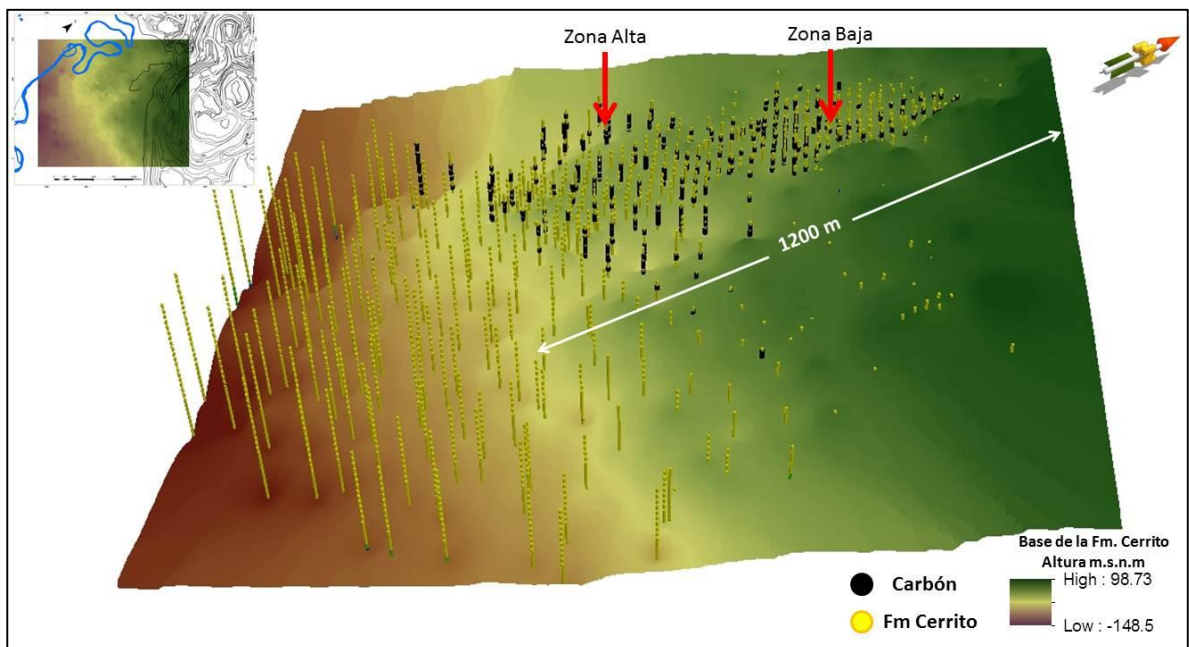
### **4.3. DELIMITACION DE ZONAS CON POTENCIAL DE CARBÓN**

La base de datos geológica, consta de 658 perforaciones de los cuales 264 contienen diferentes niveles de carbón en un mismo pozo. La descripción geológica de campo no resalta detritos fosilíferos que definan un nivel guía, los espesores de los mantos de carbón son cualitativos por el tipo de muestreo utilizado (la recuperación es por medio de detritos), no existe una caracterización química en los diferentes niveles de carbón y en la interpretación litológica de las secciones N-S y E-W no se evidencian capas continuas correlacionables.

Debido a la limitación en el contenido de la información, se aborda este análisis desde la siguiente perspectiva: se utiliza la superficie de la Formación Cerrito como base para el depósito del carbón, es decir que se asume una depositación normal de abajo hacia arriba, midiendo las alturas donde aparece carbón en cada uno de los 264 pozos. Esto con la finalidad de tener una altura medida que relacione mantos en un mismo nivel que permita seguir o “correlacionar” para potencializar o descartar zonas a una misma cota de elevación, ya sea en la parte baja cercana a la base de la Formación Cerrito, media o alta de la misma Formación. Con estos nuevos datos, se realiza un análisis estadístico separando los mantos de carbón a diferentes niveles de altura y se integra toda la información de la base de datos para tener un conocimiento generalizado del carbón en todo el espacio de acomodación; una vez concluido el análisis a nivel general, se realiza este mismo estudio en un área de influencia de 100 m medidos a partir de una línea de corte y se interpreta la distribución de estos niveles utilizando espesores de carbón mayor a 50 cm.

**4.3.1. Visualización de los carbones.** El resultado obtenido del análisis en la superficie de la Formación Cerrito, muestra una pendiente suave de 5° que sirve como base de depósito para las unidades terciarias que contienen los niveles de carbón (**Figura 18**).

Figura 18. Modelo superficial de la base de la Formación Cerrito para la visualización de los niveles de carbón. En ella se observan zonas bajas y altas en diferentes sectores de la cuenca



Fuente: Autor

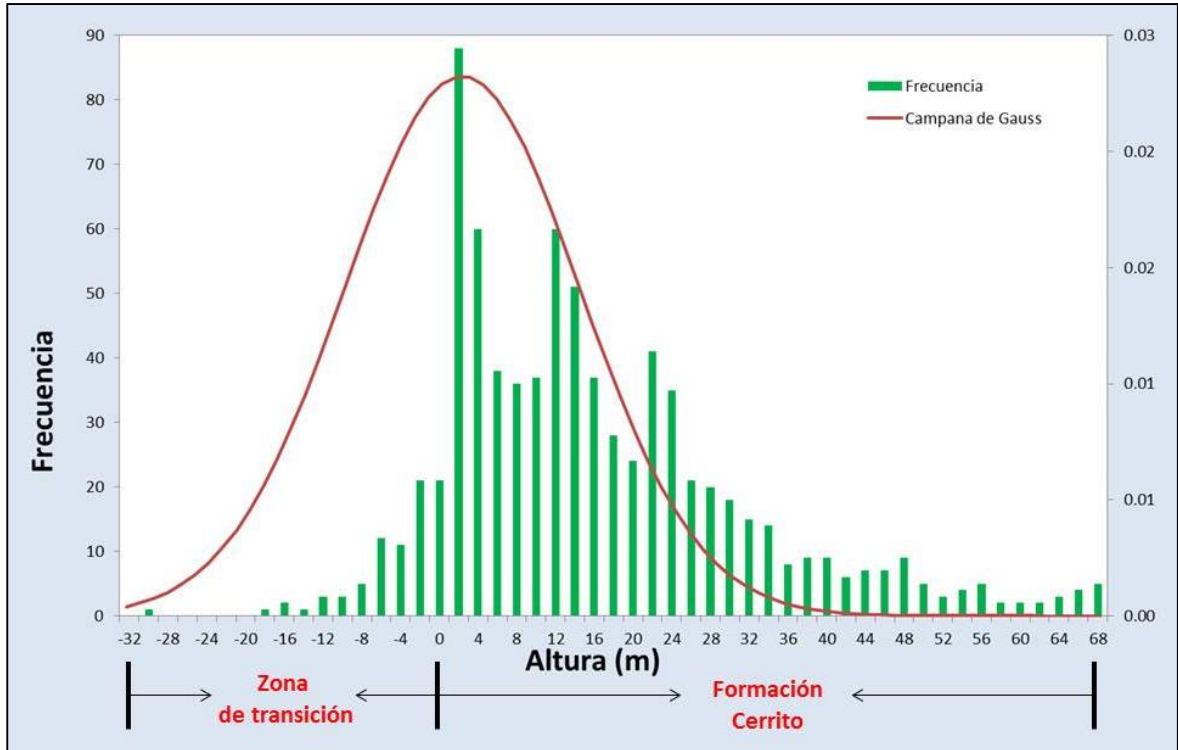
La descripción de pozos con información de carbón está restringida a una distancia máxima de 1200 m en sentido Sur, esto se debe a que en el caso de estudio, puede ser económicamente rentable extraer el carbón que posea un espesor suprayacente máximo de 50 m en roca estéril, por tanto cada descripción de muestreo cumple esta condición. Debido a la característica anterior de

descripción, solo el 40% de los pozos perforados contiene esta información que corresponde a 796 mantos de carbón **(Figura 18)**.

La visualización tridimensional en la extensión del carbón, permite interpretar que no existe una distribución continua en el depósito de este material, debido a que el mineral se concentra en mayor proporción hacia la base de la Formación Cerrito, que corresponde a partes bajas en la cuenca y no mantiene un espesor similar al tope de la formación.

**4.3.2. Clasificación estadística de carbón por nivel de altura.** La distribución de frecuencia en altura de los niveles de carbón se realizó con 32 intervalos de clase y 796 datos que corresponden al 100% de la población que contiene carbón en los pozos perforados registrados en la base de datos. El histograma presenta una distribución Gaussiana con una *media* de 16.3 y *desviación estándar* de 17.16 **(Figura 19)** donde se aprecian los niveles transicionales entre los Depósitos de ladera y la Formación Cerrito, confirmando que la mayor concentración de carbón se encuentra a la base de esta Formación.

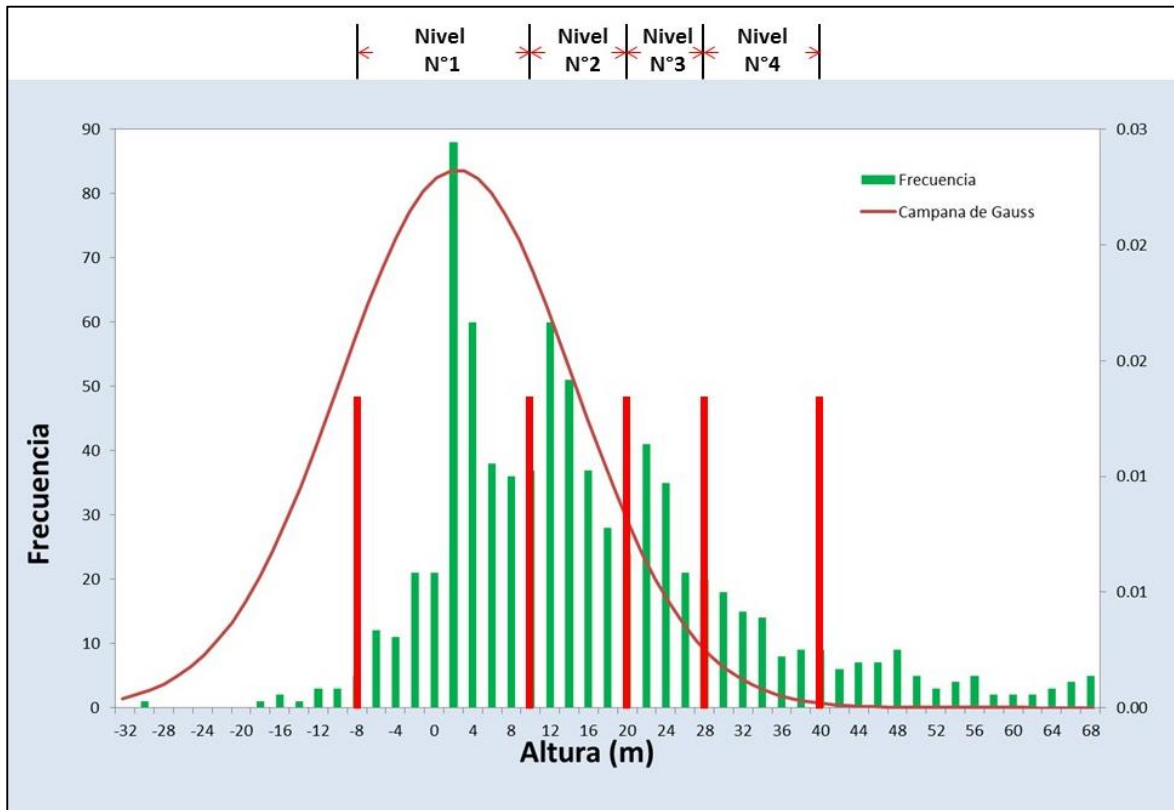
Figura 19. Histograma de frecuencia en el carbón por altura, donde la altura cero representa la base de la Formación Cerrito



Fuente: Autor

Dado que la mayor concentración de carbón está a partir de la altura cero (0) indicado en la figura 16, se clasifican estadísticamente los diferentes rangos de altura agrupados en cuatro niveles (**Figura 20**) numerados de la siguiente manera: nivel 1, de - 8 a 10 metros de altura que incluye una pequeña zona transicional, nivel 2, corresponde al intervalo de 10 a 20 metros, nivel 3, altura entre 20 y 28 metros y nivel 4 rango de 28 a 40 m.

Figura 20. Niveles de carbón clasificados por rangos de altura



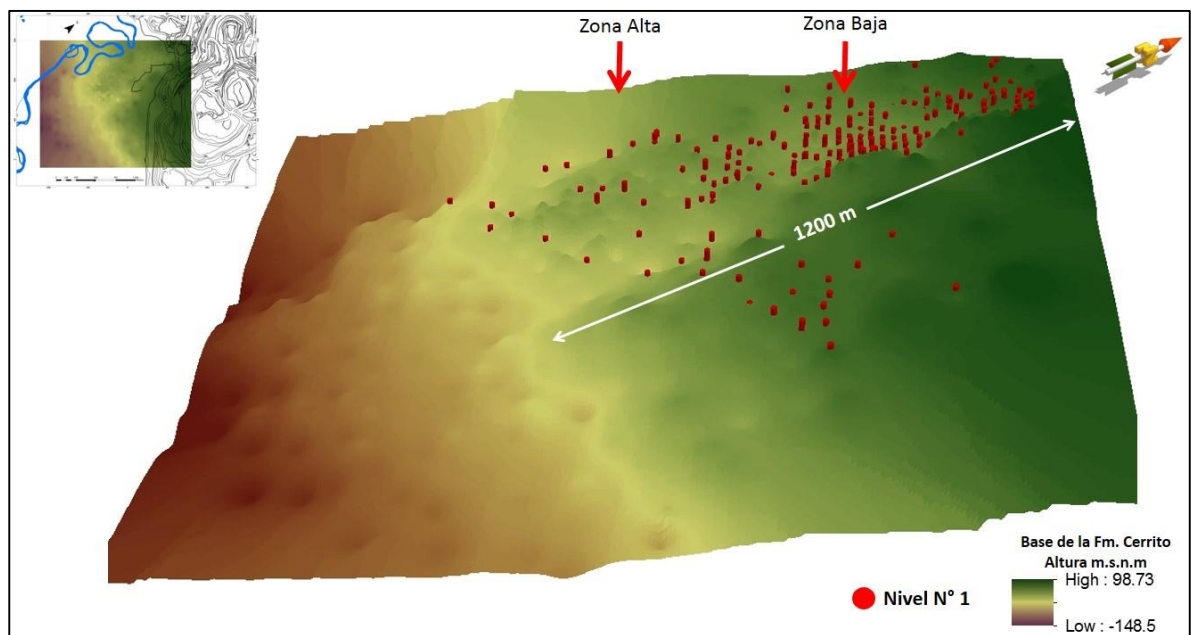
Fuente: Autor

**4.3.3. Disposición de los niveles de carbón en la Formación Cerrito.** Los diferentes niveles agrupados por rangos de altura corresponden a todas las capas descritas en la base de datos, mostrando una distribución areal completa del carbón en la zona de estudio. Es importante tener presente, que los espesores indicados en la base de datos hacen referencia a un valor subjetivo, dado que en la interpretación geológica de campo estos valores corresponden a un estimado visual.

El nivel estadístico N°1, (de -8 a 10 m de altura), incluye 186 pozos que contienen 323 mantos de carbón de los cuales 83 de ellos tienen un espesor mayor a 0.5 metros, es decir que para este rango de altura existe un estimado de 40 metros de carbón distribuidos a lo largo de la superficie (como ilustra en la figura 21) equivalente al 40.5% del total de la población (**Figura 21**). Esta clasificación, contiene gran cantidad de carbón en la zona baja marcada en la superficie de la Formación Cerrito que estructuralmente corresponde a los tramos 1, 2, 3 y 4.

La agrupación siguiente, nivel N° 2, es similar al nivel anterior; con 138 pozos y 198 intervalos con presencia de carbón, 53 de ellos tienen un espesor mayor a 0.5 metros concentrado en partes bajas de la Formación Cerrito, que hace parte principalmente de los tramos estructurales 1, 2, 3 y 4 (**Figura 22**) con un espesor acumulado mínimo de 26.5 metros de carbón, representando un 24.8% de la población total.

Figura 21. Distribución estadística correspondiente al Nivel N° 1 de carbón en la base de la Formación Cerrito

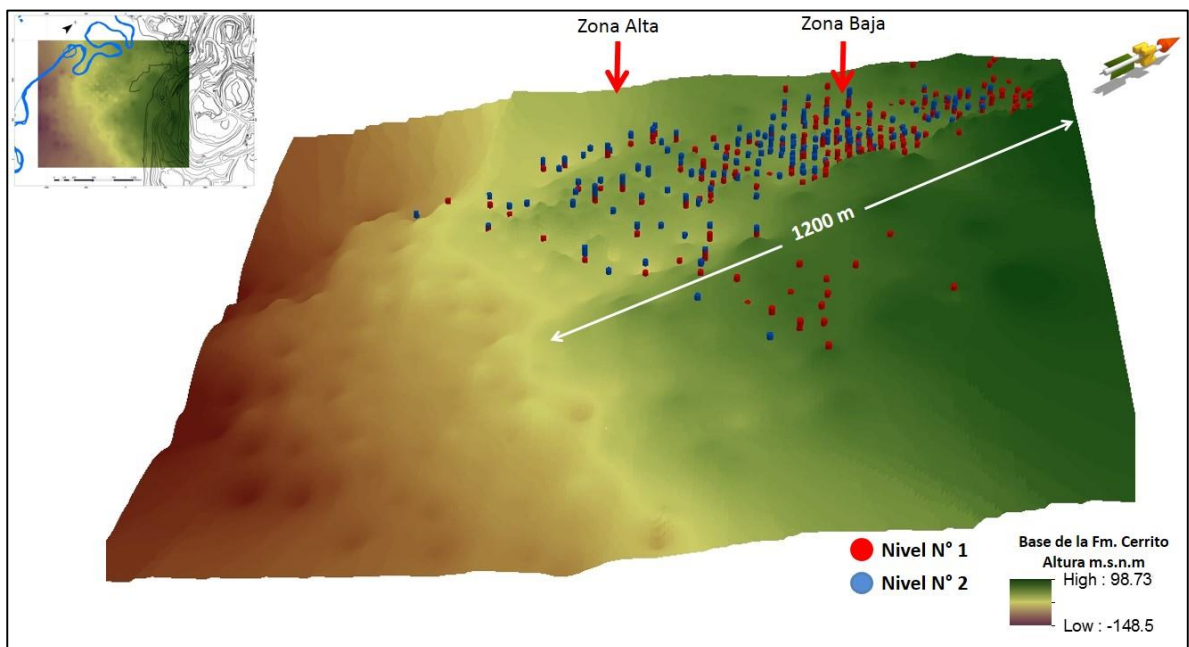


Fuente: Autor

Opuesto a las agrupaciones anteriores, los niveles 3 y 4 tienen una distribución más espaciada y restringida con espacios sin contenido de carbón, donde la concentración del mineral disminuye progresivamente hacia el tope de la Formación Cerrito. El nivel 3 comprende 94 intervalos en 77 pozos, de los cuales 24 tienen un espesor mayor a 0.5 metros, para un mínimo de 12 metros de carbón acumulado en este nivel, para un 11.8% en la población total.

El nivel más cercano al tope de la Formación Cerrito, nivel 4, está conformado por 90 intervalos con carbón donde 20 de ellos tienen un espesor mayor a 0.5 metros en 56 pozos que representan solo el 11.3% de la población (**Figura 23**). El porcentaje restante para completar el 100% de la población mencionada no se incluye en este análisis, debido a que los espesores registrados no superan los 40 cm de carbón.

Figura 22. Distribución de la clasificación estadística correspondiente al Nivel N° 2 de carbón en la base de la Formación Cerrito

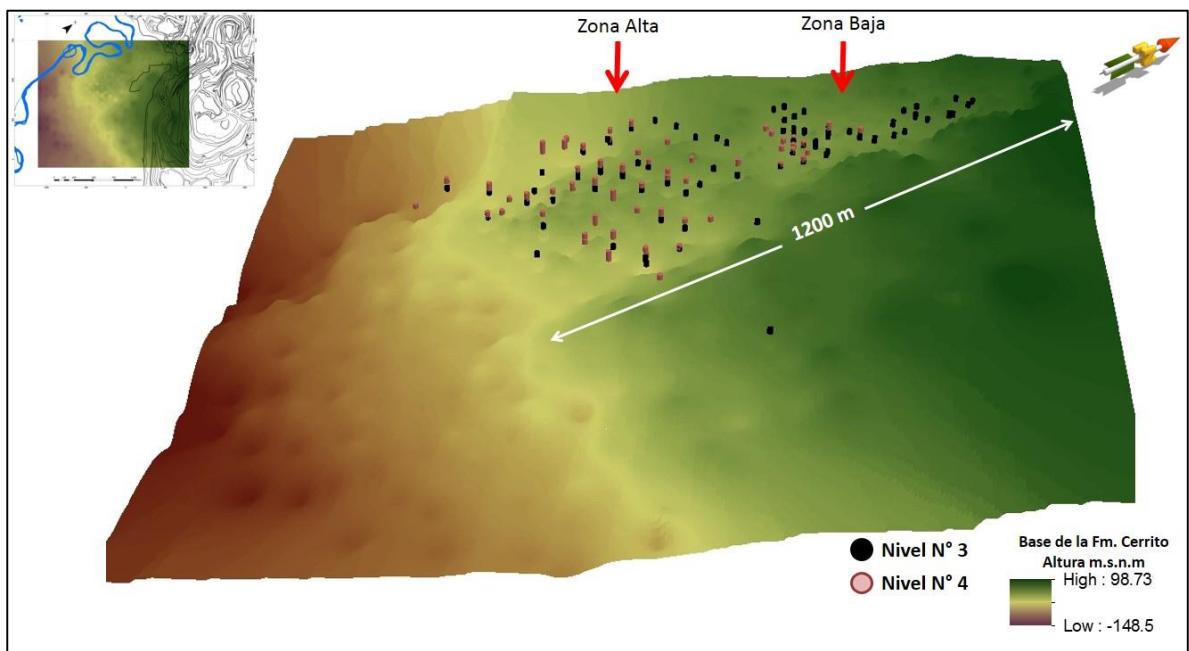


Fuente: Autor

La clasificación estadística de los niveles en mención, representan un 25.5% de los mantos de carbón que tienen un espesor mayor a 0.5 metros, con un posible potencial para explotación en los niveles 1 y 2. El 74,5% restante, hace parte de los intervalos con espesor menor a 0.5 metros.

Es importante resaltar, que aunque en el presente estudio se estén indicando porcentajes y valores numéricos para los espesores de carbón, estos representan datos cualitativos y continúan siendo una estimación visual debido al tipo de perforación realizada.

Figura 23. Distribución de la clasificación estadística correspondiente a los Niveles 3 y 4 de carbón. Se observa una zona sin contenido de carbón

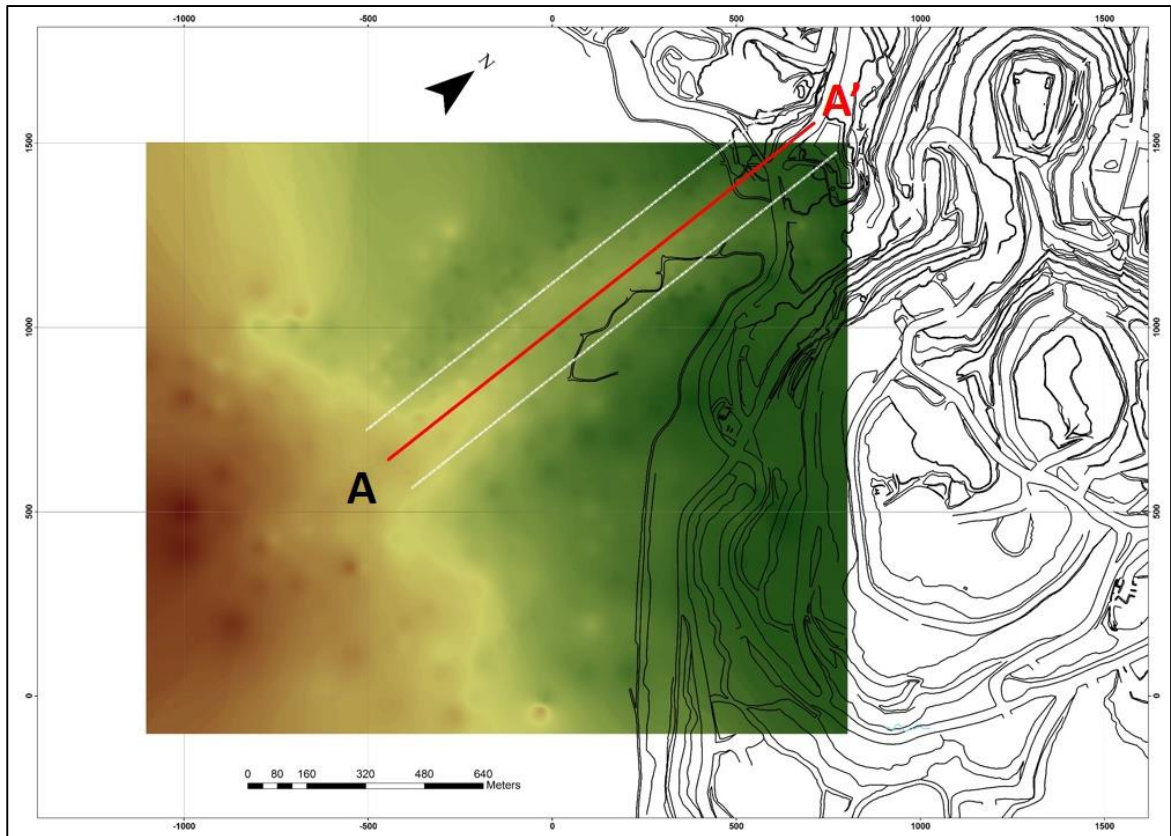


Fuente: Autor

**4.3.4. Interpretación de los niveles de carbón en vistas de perfil.** La distribución de los niveles de carbón agrupados en alturas puede ser visualizada en cuatro perfiles (A-A'), que corresponden a cada nivel clasificado con su respectiva interpretación. Con esto se busca trazar guías por rangos de altura que puedan ser delimitados y clasificados como áreas de mayor o menor potencial. Para la definición de la orientación del perfil A-A' se tomó como punto de referencia visual, las zonas que presentan mayor concentración de carbón en el modelo superficial de la Formación Cerrito; en este orden de ideas la zona alta y baja indicadas en la figura 11, muestran una amplia distribución de mineral y gran parte de ella, se concentra en un ancho de 100 metros medidos a partir de la línea de corte A-A'. Es decir, que la zona estudiada en el perfil tiene un área de influencia de 100 metros en ambos sentidos **(Figura 24)**.

La distribución del nivel N° 1 de carbón en el perfil siguiente **(Figura 25)** permite observar una zona transicional con algunos mantos de carbón en los depósitos de ladera cercanos a la base de la Formación Cerrito, y por encima de este nivel, están depositados los mantos con mayor espesor de carbón en un rango de altura de -8 a 10 metros, medidos a partir del tope de los depósitos de ladera (*indicada en la línea azul del perfil*), que incluye una fracción de la zona transicional antes mencionada. Esta agrupación da la posibilidad de realizar una “correlación por altura” que puede ser considerada como potencial económico ya que presenta sectores donde la acumulación de carbón que desde el punto de vista minero, significa una relación de descapote baja (mineral Vs estéril) y una extracción de minado poco selectiva.

Figura 24. Línea de perfil A-A' con área de influencia de 100 m ubicada y extendida en la zona baja de la cuenca

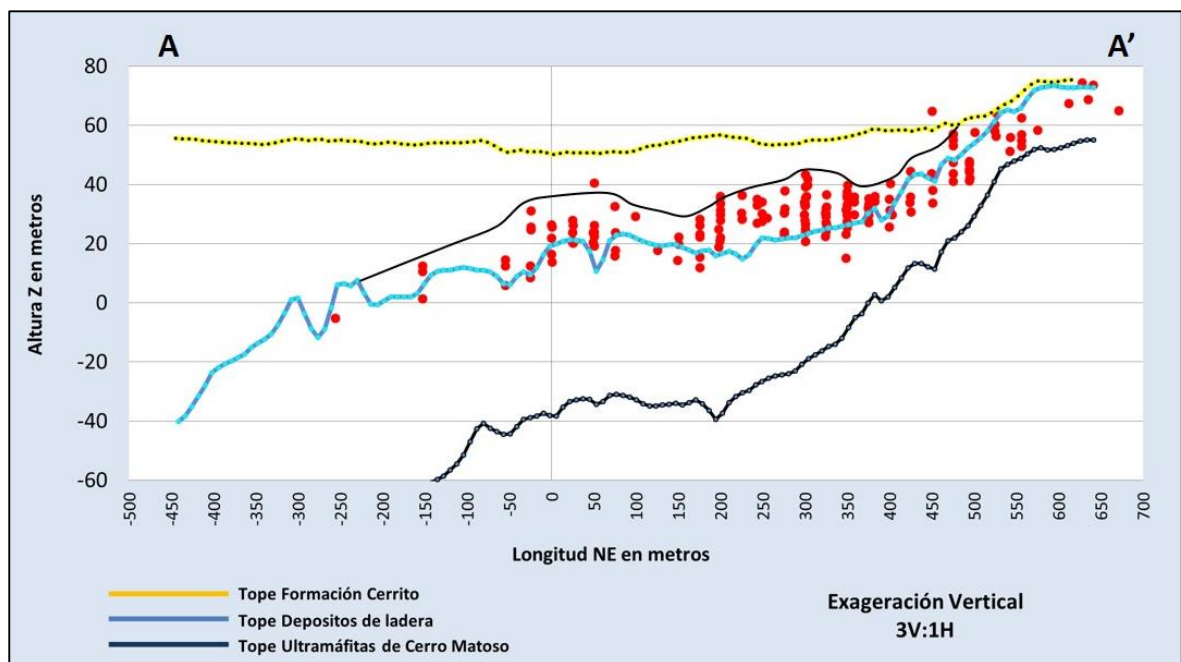


Fuente: Autor

Es interesante resaltar que cerca de la base de la Formación Cerrito se deposita gran parte del carbón que contiene los mayores espesores ajustándose al espacio de acomodación, siguiendo una paleotopografía inclinada  $5^\circ$ , donde solo existe un nivel aflorante en el pit 2 sur de la mina. Esto puede indicar un ambiente marino somero para la depositación del carbón en la Formación Cerrito, y da la posibilidad de interpretar que existieron diferentes episodios de depósito y al menos dos fuentes principales de aporte de material; la primera relacionada con la acumulación de sedimentos desprendidos a causa del levantamiento en el pit 2

sur de Cerro Matoso con acumulación de materia orgánica y el segundo aporte, asociado a los cambios eustáticos del nivel del mar, seguido de periodos tranquilos creando condiciones favorables para el enterramiento, formación y preservación del mineral.

Figura 25. Interpretación y distribución del Nivel N°1 de carbón en perfil. Se observa la cercanía de este nivel con la base de la Formación Cerrito

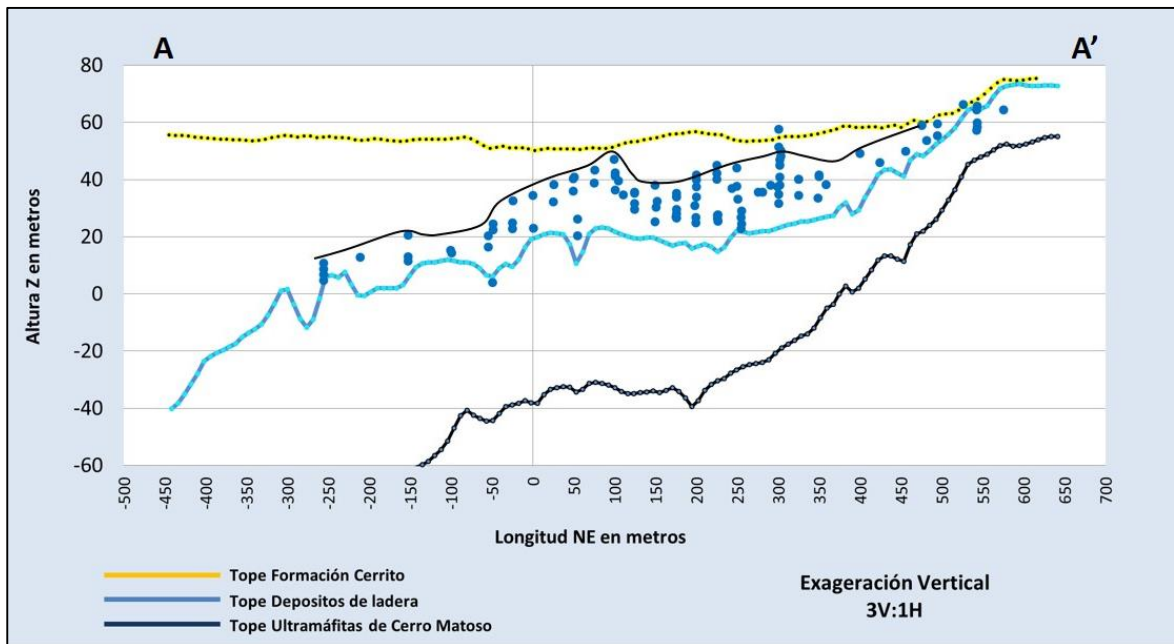


Fuente: Autor

La agrupación del nivel N° 2 (**Figura 26**) presenta características similares al nivel anterior, dado que tiene poca dispersión y permite realizar un seguimiento al rango de altura estipulado para este nivel (de 10 a 20 metros), siendo este un posible rango con potencial minero. Aunque la distribución no inicia como en el anterior caso, cercano al pit 2 sur, se observa que la mayor acumulación del mineral está en la parte media de la superficie que modela la base de la Formación Cerrito, es

decir, desde la coordenada NE de 300 metros, hasta -50 metros, guardando relación con el nivel más inferior.

Figura 26. Interpretación y distribución del Nivel N°2 de carbón en perfil a lo largo de la base de la Formación Cerrito

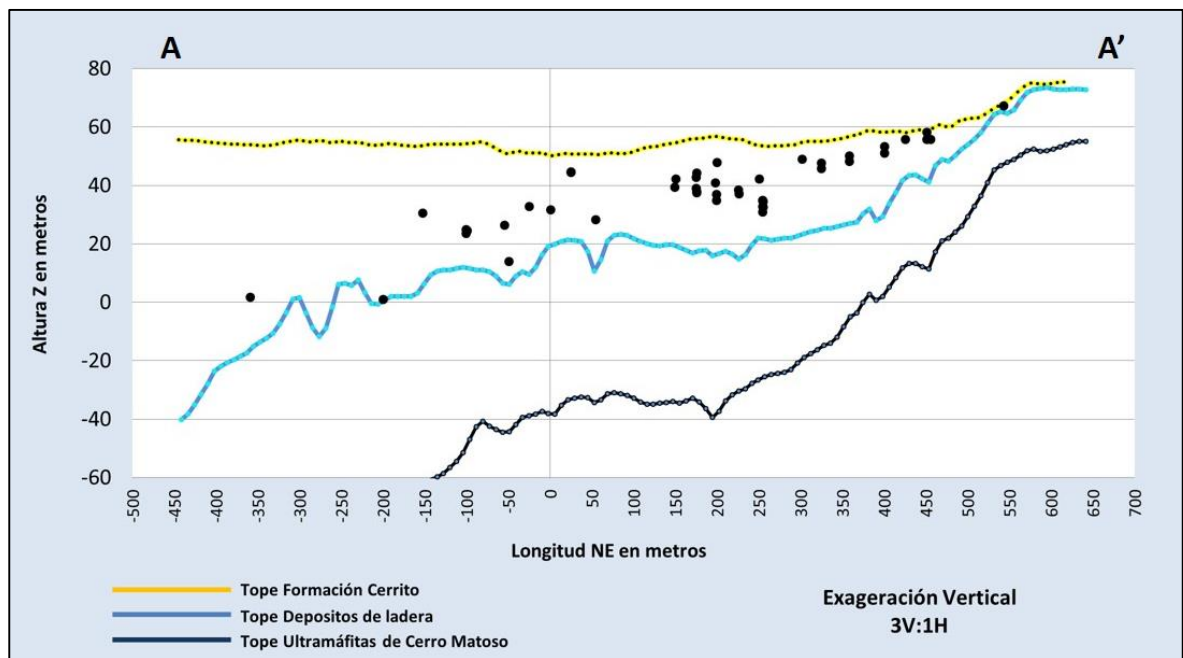


Fuente: Autor

La distribución espacial del Nivel N° 3 de carbón presenta zonas que no permiten realizar un seguimiento “continuo” por altura (**Figura 27**), el mineral se concentra solo en 35 pozos dentro del buffer de 100 metros con 45 intervalos que contienen carbón, donde únicamente 13 de ellos, presentan un espesor estimado mayor a 50 cm. Este comportamiento puede ser asociado a las variaciones en el ambiente de depósito, donde diferentes eventos controlaron las condiciones de la distribución espacial, posibles episodios erosivos limitaron los espesores y posterior a esto, es probable que existiera aporte de material detrítico en un ambiente sin condiciones

para la formación de carbón afectando directamente la continuidad de las capas carboníferas.

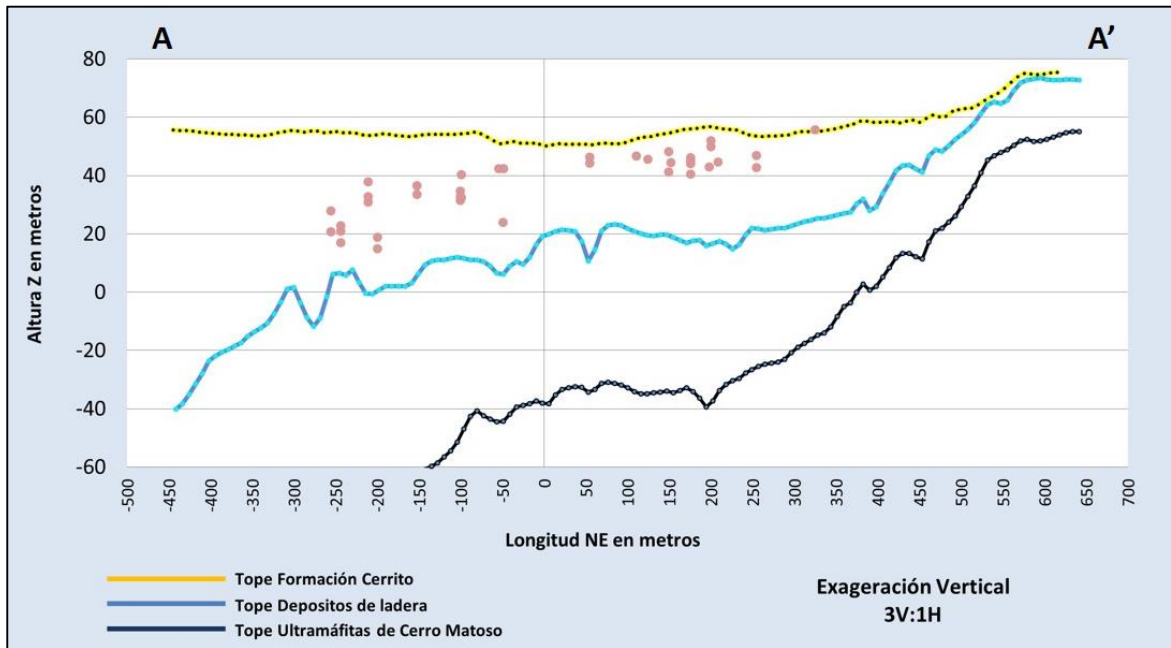
Figura 27. Interpretación y distribución del Nivel N°3 de carbón en perfil, donde se aprecia dispersión en el carbón



Fuente: Autor

Para el caso del nivel más cercano al tope de la Formación Cerrito (de 28 a 40 metros), los resultados del análisis son muy similares al nivel 3. Esta agrupación consta de 25 pozos con 10 intervalos de espesor superior o igual a 50 cm, no facilita la “correlación por altura” dado que el mineral se encuentra disperso a lo largo de la superficie que modela la base de la Formación Cerrito y para su extracción se necesitaría realizar un minado muy selectivo (**Figura 28**).

Figura 28. Interpretación y distribución del Nivel N°4 de carbón en vista de perfil



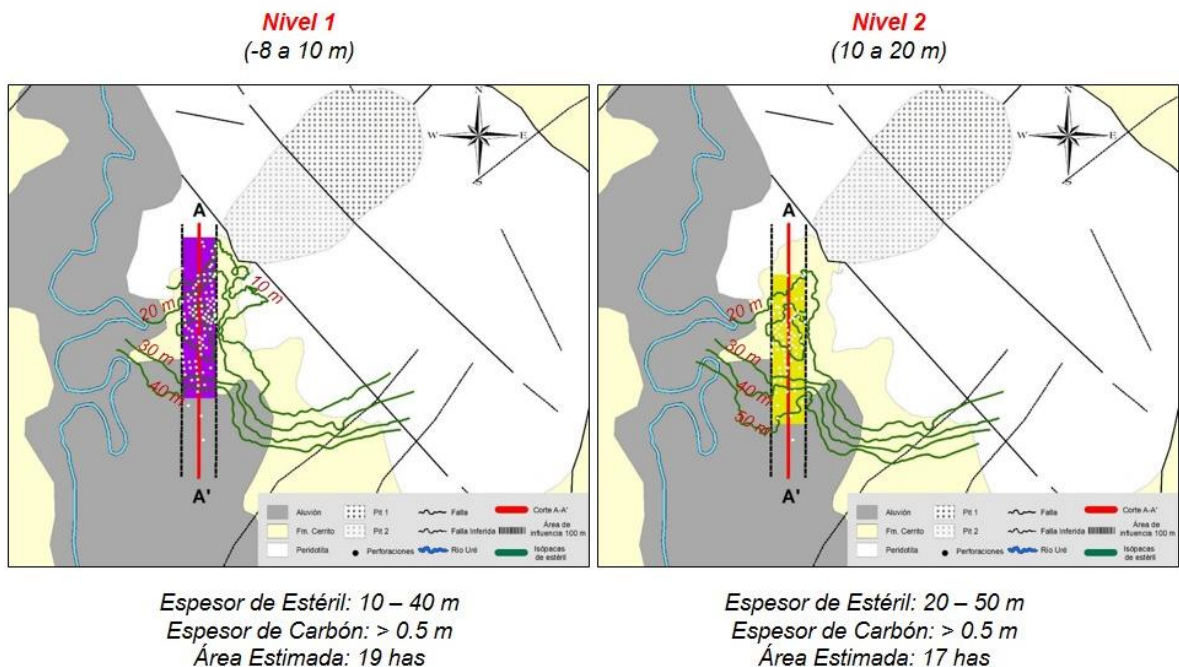
Fuente: Autor

Estas interpretaciones en vista de perfil, integradas con la delimitación de lineamientos estructurales y modelamiento de la base de la Formación Cerrito, permiten definir zonas con mayor cantidad de carbón y diferenciar los niveles más cercanos, intermedios y lejanos de base a tope dentro de la Formación Cerrito, donde el nivel 1 comprende una amplia zona que inicia con mantos de carbón que afloran en el pit 2 sur, y espesores poco potentes de material estéril, con rangos isópacos entre 0 y 40 metros concentrando la mayor cantidad de carbón hasta la isópaca 30 de estéril (**Figura 29**).

Contiguo al nivel anterior, se marcan características similares, el nivel 2 inicia en la isópaca 20 hasta la 50, concentrando la mayor presencia de carbón en la isópaca 30 (**Figura 29**). Esto indica que existe una relación directa en los dos primeros niveles de altura delimitados dentro de la Formación Cerrito, ya que estos están

agrupados en cotas de altura muy cercanas, y en una columna suprayacente máxima de 30 metros con roca estéril, para los mantos que presentan menor dispersión.

Figura 29. Zonificación potencial para el nivel 1 y 2 de carbón con espesor de estéril, distribuidos dentro del área de influencia del perfil A-A'

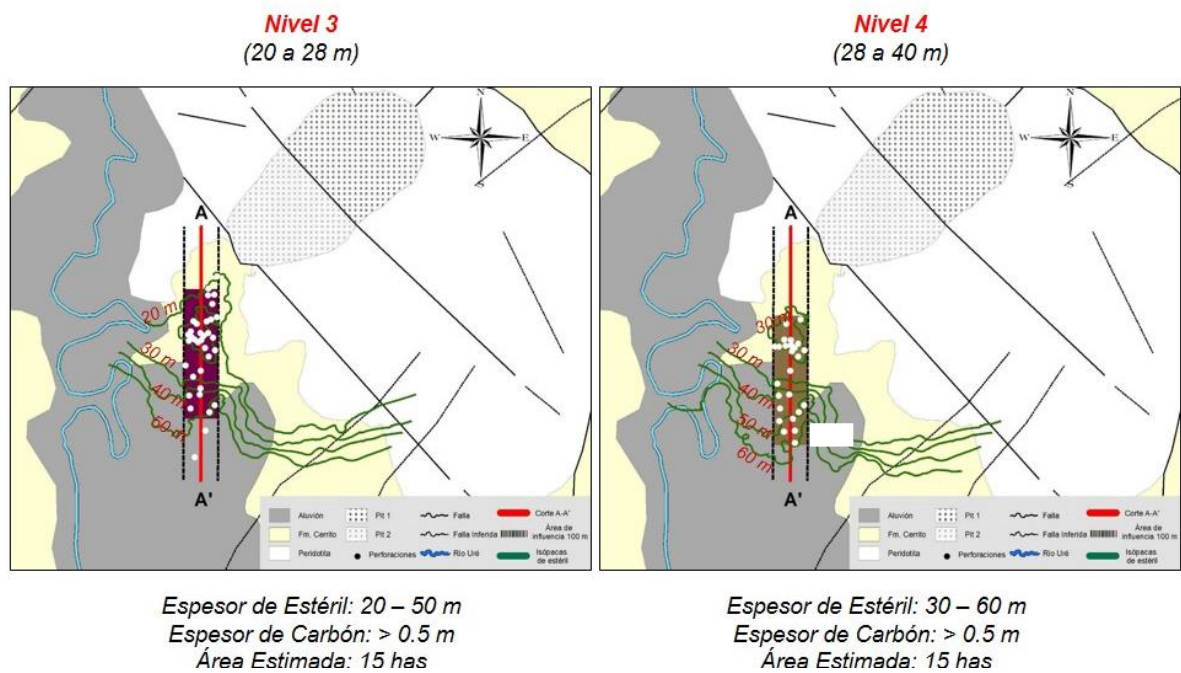


Fuente: Autor

Por otro lado, los niveles más cercanos al tope de la Formación Cerrito (3 y 4), se encuentran dispersos con un grado de “correlación” muy bajo, siendo estos poco atractivos desde el punto de vista minero, ya que no se observa una concentración mínima de carbón en la isópaca 30 como los niveles anteriores (**Figura 30**), por el contrario, presenta espesores suprayacentes de roca estéril mayor a 50 metros,

generando un minado con mayor selectividad comparado con los niveles 1 y 2 mencionados anteriormente

Figura 30. Zonificación potencial para el nivel 3 y 4 de carbón con espesor de estéril, distribuidos dentro del área de influencia del perfil A-A'



Fuente: Autor

La zonificación realizada ilustradas en las **Figuras 29 y 30**, pretende dar un estimado de áreas consideradas como potencial, involucrando la distribución espacial del carbón, su grado de dispersión a lo largo de la cuenca y los espesores (en metros) de roca estéril asociado a cada nivel representado por los contornos de color gris.

## 5. CONCLUSIONES

La delimitación de lineamientos en la zona de estudio permitió definir 7 tramos estructurales que muestran un aparente desplazamiento, pero no brinda la información suficiente para definir si existe un control estructural que tenga influencia en el depósito del carbón (**Figura 17**).

De acuerdo a la información contenida en la base de datos geológica, existe una superficie continua de los depósitos de ladera en dirección SW con una inclinación aproximada de 5°, que sirve como base de depósito para la Formación Cerrito que contiene los niveles de carbón (**Figura 15**).

Según los mismos datos, se encontró que el 65% de los mantos de carbón con espesor > 0.5 m, se ubican cerca a la base de la Formación Cerrito, con una zona de influencia a partir de esta superficie no mayor a 20 metros.

A partir de la clasificación estadística por niveles de altura en el carbón, los perfiles realizados y el modelamiento de la superficie de la Formación Cerrito, es posible clasificar los niveles 1 y 2 como zonas potenciales (**Figura 29**) debido a que se encuentran agrupados cerca a la base de la Formación Cerrito en un rango de altura poco diferencial a partir de la superficie de dicha formación, y tienen un rango espesor en roca estéril entre 20 y 50 metros.

## 6. RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar perforaciones a una malla (o distancia entre pozos) más cerrada (a lo sumo de 12.5 m), donde se describa en mayor detalle el material sedimentario que permita recopilar más información respecto a los niveles de carbón que posiblemente existan entre pozos, con el fin de definir en mayor detalle las zonas delimitadas como potenciales.

Del mismo modo, la realización de núcleos en las diferentes zonas potenciales ayudaría a definir espesores medidos de carbón, disminuyendo el margen de error en el estimado visual de porcentaje que cada geólogo define en campo.

Se recomienda realizar una caracterización fisicoquímica del carbón presente en cada zona potencial, con el propósito de conocer en detalle sus características fisicoquímicas para obtener un mejor aprovechamiento del recurso.

## BIBLIOGRAFÍA

BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C., Y MARTINEZ, J. 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos, 91 P. Bogotá.

DUEÑAS, H., DUQUE, H. 1981. Geología del cuadrángulo F-8. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras, 35 P. Bogotá.

DURANGO, J. 1988. Apuntes sobre geología de Cerro Matoso. Cerro Matoso S.A., 27 P. Montelíbano (Córdoba).

FORERO, J., LONDOÑO, J. 2009. El níquel en Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética, 42 P. Bogotá.

GENERADORA Y COMERCIALIZADORA DE ENERGIA DEL CARIBE S.A ESP – GECELCA. Citado: 26 de julio del 2014. Disponible página web: <http://www.gecelca.com.co/>

GONZÁLEZ, H., LONDOÑO, A. 2001. Mapa geológico del departamento de Córdoba. Documento Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear, 144 P. Bogotá.

GUZMÁN, G., GOMÉZ, E., Y SERRANO, E. 2004. Geología de los cinturones del Sinú, san Jacinto y borde occidental del valle inferior del magdalena. Instituto Colombiano de Geología y Minería, 134 P. Bogotá.

GLEESON, S., HERRINGTON, R., DURANGO, J., VELÁSQUEZ, C., Y KOLL, G. 2004. The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia. Edited by Economic Geology. 17 P.

HOYOS, N., VELÁSQUEZ, C. 1996. Análisis del origen de la laterización y saprolitización del yacimiento niquelífero de Cerro Matoso departamento de Córdoba. Universidad EAFIT, 99 P. Medellín.

LÓPEZ, J. 1986. Geology, mineralogy and geochemistry of the Cerro Matoso nickeliferous laterite, Cordoba, Colombia. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 357 P.

MEJÍA, L., PULIDO, O. 1993. Regiones y zonas de Carbón en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 25 P. Bogotá.