

**CARTOGRAFÍA DE LAS ZONAS DE “CLINKER” EN LAS ÁREAS DE
MINERÍA DE LA MINA EL CERREJÓN. Albania, Guajira.**

**SOL ANGEL CANDELA HERRERA
JHON ALEXANDER QUINTERO DIAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2004**

**CARTOGRAFÍA DE LAS ZONAS DE “CLINKER” EN LAS ÁREAS DE
MINERÍA DE LA MINA EL CERREJÓN. Albania, Guajira.**

**SOL ANGEL CANDELA HERRERA
JHON ALEXANDER QUINTERO DIAZ**

Trabajo de grado como requisito para optar al titulo de: GEÓLOGOS

**Director
CARLOS ALBERTO RÍOS REYES
Geólogo, M. Sc.**

**Co-Director
CESAR AUGUSTO JARAMILLO MALDONADO
Ingeniero Geólogo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

A Dios por la Vida
A mis padres Silverio y Eva Maria, por su gran sacrificio e incondicional apoyo en el
logro de esta meta.
A Luisito allá en el cielo donde estoy segura se encuentra.
A Raul, Ramiro y Javier, gracias por su incansable ayuda.
A Carlos Hernando especialmente, el sabe mejor que nadie porque.
A Mery y Ana Victoria por estar siempre junto a mí.
A todos y cada una de esas personas que forman la pequeña familia a la cual
pertenezco los CANDELA HERRERA

Por último a Jhon Alexander mi compañero de Proyecto e inseparable amigo por todo
lo que representa y sigue representando.

Sol Angel

Este trabajo está dedicado a mis viejitos, Carlos Daniel y Ma. Del Carmen, a quienes les debo la materialización de este sueño. A mis hermanos Abel, Cristina, Rocio y Diana y a mis sobrinos David y Nicole, quienes fueron un constante aliciente y mi motivo de superación.

A mis amigos y amigas, ellos saben a quienes me refiero, que siempre fueron un apoyo sincero e incondicional...

A Candelita, mi piedra de toque. Siempre me hizo ver las cosas desde otro punto de vista, generalmente el correcto.

... y a ese ser suprahumano, que debe existir...

todos ellos fueron fuente de inspiración.

Jhon Alexander

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Carbones del Cerrejón LLC, al Señor Angus Cristhie y a Don German Hernández por la oportunidad que nos brindaron. A todo el equipo de Geología y Exploración (Strong Room y G7), especialmente a Wilson Mendoza y a Cesar Jaramillo por su recibimiento, asistencia, colaboración y comprensión.

Al profe Juan Diego y a los evaluadores de esta tesis por sus comentarios y aportes, los cuales la enriquecieron. Especiales agradecimientos al profesor y amigo Carlos A. Ríos R. quien siempre estuvo con nosotros desde el principio, por su dedicación, tiempo, correcciones, paciencia y por habernos ayudado a darle la forma final a este documento.

A Aldemar y a la papelería la Mona.com.

Y a nuestros amigos y amigas (*los de verdad*), simplemente gracias por todo y por estar ahí... menos mal estaban ahí.

Sol y Jhon

Para honrar y expresar este amor poderoso, complejo, no nos hemos limitado, (...), al método científico, tal como habría exigido la prudencia. Pero, ¿Qué es el amor prudente? Nuestros métodos fueron los de los sabios, pero también los de los teólogos, los de los poetas, los de los brujos, los de los magos y los de los niños. En resumidas cuentas, nos hemos portado como bárbaros, prefiriendo la invasión a la evasión. Y es que algo nos decía que, en efecto, formábamos parte de tropas extrañas, de hordas fantasmagóricas, guiadas por trompetas ultrasonoras, de cohortes transparentes y desordenadas que empiezan a desparramarse sobre nuestra civilización. Estamos al lado de los invasores, al lado de la vida que viene, al lado del cambio de edad y del cambio de pensamiento. ¿Error? ¿Locura? La vida del hombre solo se justifica por el esfuerzo, aun desdichado, para comprender mejor. Y la mejor comprensión es la mejor adherencia. Cuanto mas comprendo, mas amo: porque todo lo comprendido es bueno.

Paulsels & Bergier (Le Matin Des Magiciens)

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	2
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. LOCALIZACIÓN	3
1.3. ANTECEDENTES	4
1.4. METODOLOGÍA	6
1.5. TERMINOLOGIA EMPLEADA	7
2. MARCO GEOLÓGICO	11
2.1. ESTRATIGRAFÍA	11
2.1.1. Precámbrico	13
2.1.2. Paleozoico	13
2.1.3. Triásico - Jurasico	14
2.1.4. Cretácico	14
2.1.5. Paleoceno Inferior a Medio	16
2.1.6. Paleoceno Superior	17
2.1.7. Eoceno - Oligoceno	17
2.1.8. Depósitos Paleocenos a Recientes	18
2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	19
2.2.1. Cabalgamiento Cerrejón	21
2.2.2. Cabalgamiento Ranchería	22
2.3. GEOLOGÍA HISTÓRICA	23
3. COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA Y GENERACIÓN DE “CLINKER”	26

3.1. COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA	26
3.1.1 Zonas de alteración por combustión espontánea	30
3.2. “CLINKER”	30
3.3. FORMACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL “CLINKER”	31
3.4. CONTROL ESTRUCTURAL DE LAS ÁREAS DE “CLINKER” EN EL CERREJÓN	34
3.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS ÁREAS DE “CLINKER”	37
3.5.1. Zona Centro	37
3.5.2. Nuevas áreas de minería (NAM)	42
4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	48
4.1. COMPARACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA OBTENIDA EN EL PRESENTE INFORME CON LOS TRABAJOS PREVIOS	48
4.2. POSIBLES CAUSAS DE LA COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA DE LOS CARBONES DE LA FORMACIÓN CERREJÓN	54
5. CONCLUSIONES	56
6. RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFIA	59
ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Localización del depósito carbonífero del Cerrejón. Tomado de www.cerrejoncoal.com .	4
FIGURA 2. Diagrama que ilustra el desarrollo de la minería en un tajo y las diferentes etapas del que este se compone. en el cerrejón la explotación del manto de carbón se hace en sentido contrario al mostrado en la figura, es decir contra el buzamiento de las capas. Modificado de www.mining-technology.com/projects/greenhills/greenhills5.html .	9
FIGURA 3. Esquema de un tajo mostrando las diferentes fases de la minería y las paredes que lo componen. Modificado de www.mining-technology.com/projects/greenhills/greenhills5.html .	10
FIGURA 4. Columna estratigráfica detallada del depósito carbonífero el Cerrejón. Modificado de Davidson y Lowe (2000).	12
FIGURA 5. Marco geológico regional, con los principales rasgos estratigráficos y estructurales del norte de Suramérica. Modificado de Van der Merwe (1999).	20
FIGURA 6. Marco geológico-estructural del depósito del Cerrejón. Modificado de Van der Merwe (1999).	21
FIGURA 7. Perfil estratigráfico simplificado e historia tectónica de la secuencia sedimentaria del campo carbonífero del Cerrejón. Modificado de Van der Merwe (1999).	25
FIGURA 8. Esquema de una zona de combustión espontánea del carbón. obsérvese la reducción del manto de carbón a una delgada capa de cenizas debido a la combustión y la relación entre la roca sana, la quemada y la fundida. Modificado de http://www.geology.yale.edu/~reiners/gsa2002clinker101402_files/frame.htm	27

FIGURA 9. Principales características de una zona típica de “*clinker*”. Modificado de Geology and Reserves (2000). 32

FIGURA 10. Relación estratigráfica – estructural de la parte superior de la formación Cerrejón. se observa toda la secuencia de los mantos agrupados en 3 grupos y como estos son afectados por el juego de cabalgamientos menores asociados al duplex Cerrejón-Ranchería. También localiza las zonas de “*clinker*” según el manto quemado. Modificado de Summary Report (2000). 35

FIGURA 11. Vista transversal de la zona de “*clinker*” del tajo 100, asociada a la quema de los mantos 145 – 150. la introducción de oxígeno al sistema a través de un plano de falla permitió la combustión de los manto en profundidad. Tomado de Geology and Reserves (2000). 40

FIGURA 12. Vista transversal de la misma zona de “*clinker*” del tajo 100, pero sobre la pared final norte. Tomado de Geology and Reserves (2000). 41

FIGURA 13. Vista en el rumbo de la zona de “*clinker*” asociada a la quema del manto 170, contigua a la FIGURA 14. Apréciase la tonalidad roja de la roca quemada, fácilmente reconocible dado el aspecto grisáceo de la estratigrafía de la región. 43

FIGURA 14. Vista de la zona de “*clinker*” sobre la pared final norte del tajo “*tabaco high dip*”, en las nam. Este “*clinker*” se encuentra asociado a la quema del manto 155. 44

FIGURA 15. Las perforaciones realizadas por los taladros sobre el talud sur del tajo “*tabaco high dip*”, revelan la presencia de las áreas de “*clinker*”. 45

FIGURA 16. Modelo geofísico simplificado de las 13 zonas magnéticas o “*clinker*” de Davidson and Lowe (2000). Tomado de Davidson and Lowe (2000). 51

FIGURA 17. Plano mostrando las 13 zonas magnéticas (en negro) y los 28 cuerpos de “*clinker*” (en azul), identificados entre los tajos oreganal, 100 y palotal – tipiala, en el área patilla. Tomado de Smith (2000). 51

FIGURA 18. Lineamientos y localidades de “*clinker*” en el cerrejón zona centro, según Van der Merwe (2002). con excepción de las localidades 1 y 2,

las demás localidades no pudieron ser confirmadas en campo. Modificado de Van der Merwe (2002). 52

FIGURA 19. Mapa geológico simplificado del cerrejón zona centro. Las zonas de “*clinker*” aparecen en color lila. Tomado de Summary Report (2000). 52

FIGURA 20. Distribución de las áreas de “*clinker*” (color magenta) en la zona centro. a diferencia de los trabajos anteriores el “*clinker*” del tajo Palotal 10 – Tipiala no se extiende hasta el tajo 100 y aparecen nuevos cuerpos al sur del tajo Patilla. 53

FIGURA 21. Distribución de las áreas de “*clinker*” (color magenta) en las NAM o Zona Norte. 53

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Localización de los cuerpos de “*clinker*”, mantos de carbón asociados, espesores en profundidad y en superficie, y profundidad de penetración. 47

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. MAPA GENERAL OPERACIÓN MINERA DEL CERREJÓN	64
ANEXO B. CARTOGRAFÍA DE LAS ÁREAS DE “CLINKER”	65
ANEXO C. SECCIONES GEOLÓGICAS TRANSVERSALES POR TAJO	69
ANEXO C - NAM	71
ANEXO C - PALOTAL 10 - TIPIALA	77
ANEXO C - 100	84
ANEXO C - PATILLA	87
ANEXO D. ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS CUERPOS DE “CLINKER” PARA EL DEPÓSITO CARBONÍFERO DEL CERREJÓN	90

NOMENCLATURA

°C	(Temperatura en) Grados centígrados
MPa	MegaPascal (1×10^6 Pa)
atm.	Atmósferas
M	Metro
N	Norte
S	Sur
E	Este
W	Oeste

CARTOGRAFÍA DE LAS ZONAS DE “CLINKER” EN LAS ÁREAS DE MINERÍA DE LA MINA EL CERREJÓN. Albania, Guajira.^α

CANDELA HERRERA, SOL ANGEL^β
QUINTERO DIAZ, JHON ALEXANDER^β

Palabras claves: combustión espontánea, carbón, “*clinker*”, Cerrejón

El “*clinker*” es una roca pirometamórfica formada por la alteración térmica extrema de lodolitas y areniscas durante la combustión natural de los mantos de carbón. Es un material poroso, extremadamente duro y de color rojo. La combustión del carbón ocurre de manera natural dada la oxidación del mismo, lo cual sucede por su exposición en superficie o por la introducción de aire y agua en profundidad a través de discontinuidades tectónicas.

El depósito del Cerrejón, localizado en el valle del río Ranchería, departamento de la Guajira (Colombia), presenta la autocombustión de los mantos de carbón de la formación Cerrejón del Paleoceno superior, que ha generado las áreas de “*clinker*” en la concesión minera. Estratigráficamente está constituido de base a techo por un basamento cristalino Precámbrico y una secuencia sedimentaria principalmente clástica algo volcánica y calcárea que va desde el Paleozoico al Oligoceno, hasta los depósitos recientes no consolidados. Estructuralmente es muy complejo, ubicado dentro del cinturón de cabalgamiento Cerrejón – Ranchería y limitado al Norte por la falla de Oca. Presenta un gran juego de fallas menores y algunos pliegues anticlinales como los de Papayal y Cerrejón y el sinclinal Tabaco.

Las áreas de “*clinker*” en el Cerrejón están controladas estructuralmente por las discontinuidades tectónicas asociadas a los sistemas de fallas del cinturón Cerrejón-Ranchería y a los plegamientos del sector, producidos conjuntamente durante las etapas recientes de la orogenia Andina. Se identificaron cuatro áreas de “*clinker*” localizadas en los tajos 100, Palotal 10-Tipiala, Patilla y en las NAM. Se trata de cuerpos alargados semi-rectangulares que siguen la dirección del rumbo de los mantos de carbón, alcanzando hasta 1800m de extensión, 100m de espesor y una profundidad de penetración hasta de 448m. Estos parámetros varían de acuerdo al control estructural en cada sector del depósito carbonífero.

^α Proyecto de grado (Investigación)

^β Facultad de Ingenierías Físico-Químicas (UIS). Escuela de Geología: **Carlos A. Ríos R.** Carbones del Cerrejón LLC. Geología y Exploración: **Cesar A. Jaramillo M.**

MAPPING OF CLINKER ZONES IN MINING AREAS OF THE EL CERREJÓN MINE. Albania, Guajira.^α

CANDELA HERRERA, SOL ANGEL^β
QUINTERO DIAZ, JHON ALEXANDER^β

Keywords: spontaneous combustion, coal, clinker, Cerrejón

Clinker is a pyrometamorphic rock formed by extreme thermic alteration of mudstone and sandstone during natural combustion of coal seams. It is a porous material extremely hard in red color. Combustion of coal occurs of natural way given its oxidation, which can happen by its exposure in surface or by percolation of oxygen at depth through tectonic discontinuities.

The El Cerrejón Coal Deposit, located in the Ranchería River Valley, Department of Guajira, presents self-combustion of the coal-seams Cerrejón Formation, of upper Paleocene age, forming clinker zones in the mine lease areas of Carbones del Cerrejón LLC. Stratigraphically the El Cerrejón coal Deposit is constituted, of floor to roof by a Precambrian crystalline basement and a sedimentary sequence, principally clastic, some volcanic and calcareous, from Paleozoic to Oligocene and unconsolidated deposit recents. Structurally, El Cerrejón is a coal-field very complex, limited into Cerrejón-Ranchería thrusting belt and Oca fault to north. The coal-bearing deposit presents minor structures associated to the late Andean deformation, including low angle thrust faults parallel to the main thrusts, high angle faults, folding and ductile structures, like the Papayal and Cerrejón anticlines and the Tabaco Syncline.

The clinker zones at El Cerrejón are structurally controlled by the tectonic discontinuities associated to the fault systems of the Cerrejón-Ranchería thrusting belt and to the foldings of sector, produced jointly during late phases of the Andean Orogeny. There are 4 clinker zones, located in the open-pits 100, Palotal 10 – Tipiala, Patilla and NAM. These clinker zones formed on surface in the same strike direction of the coal seams. The clinker zones are semirectangular alargated bodies, which extend strike to 1800m, in dip direction to 448m and to 100m in thickness. Strike and dip extend and thickness of clinker bodies depend of structural control ejerced over them in each sector of the coal-bearing deposit.

^α Grade Thesis (Investigation)

^β Faculty of Physic-Chemical Engineerings (UIS). School of Geology: **Carlos A. Ríos R.** Carbones del Cerrejón LLC. Geology and Exploration: **Cesar A. Jaramillo M.**

INTRODUCCIÓN

Las áreas de “*clinker*” y los fenómenos de combustión espontánea del carbón en afloramiento representan zonas de inestabilidad geológica que dificultan el desarrollo de la operación minera ya que no ofrecen garantías geotécnicas dadas las características físicas que adquiere la roca adyacente al someterse a las altas temperaturas alcanzadas durante la combustión del manto y porque representa una reducción en las toneladas de carbón explotable.

El presente informe contiene la cartografía geológica de las áreas de “*clinker*” para toda el área de minería de Carbones del Cerrejón LLC (Cerrejón). La cartografía realizada es de mucha importancia para el desarrollo del plan de factibilidad de la compañía o de planeación a futuro, ya que permite tener información veraz acerca de las reales reservas de carbón, debido a que localiza las zonas con ausencia del mineral por combustión y además porque determina la viabilidad y las medidas a adoptar para el frente de avance minero.

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

Este informe es el resultado de una labor realizada durante un periodo de seis meses que respondía a las prioridades de la Superintendencia de Geología y Exploración de Carbones del Cerrejón LLC y que consistió en el reconocimiento de campo y la cartografía geológica de las áreas de “*clinker*”.

Esta labor permite identificar y localizar las áreas críticas para el desarrollo minero, determinar el límite del carbón explotable, corregir el cálculo de las reservas y la viabilidad y el tipo de minería en las zonas afectadas en el pasado por el fenómeno de combustión espontánea o áreas de “*clinker*”.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

- Realizar la cartografía geológica a escala 1:25000 de las zonas de “*clinker*”, mediante el trabajo de campo en las áreas de los tajos y sus alrededores.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis bibliográfico acerca de los fenómenos de autocombustión del carbón y generación del “*clinker*”.
- Adquirir información geológico – estructural en las áreas de minería y de avance de la mina para reconocer las zonas de “*clinker*”.

- Revisar los registros geofísicos de los pozos de exploración para determinar la presencia o no de las zonas de “*clinker*” en el subsuelo, y así definir su geometría, tendencia y comportamiento.
- Identificar los mantos asociados al fenómeno de autocombustión en las zonas de “*clinker*”.
- Generar secciones geológicas transversales de las zonas de “*clinker*” a escala 1:1000 y 1:2000.

1.2. LOCALIZACIÓN

El área de la concesión minera de Carbones del Cerrejón LLC se encuentra localizada en la esquina noreste de Colombia (FIGURA 1), límite con Venezuela, más exactamente al sur del departamento de La Guajira y comprendiendo buena parte del Valle del Río Ranchería, limitada al suroeste por la cuña tectónica de la Sierra Nevada de Santa Marta y al sureste por la Serranía de Perijá.

El depósito carbonífero ha sido dividido por razones administrativas en tres áreas: Zona Norte, Zona Centro y Zona Sur. En la actualidad las dos primeras están siendo explotadas y la tercera se encuentra en fase de exploración. Cada una de las zonas esta dividida a su vez por tajos o minas a cielo abierto, los cuales representan los frentes de explotación y de avance minero.

El Cerrejón Zona Norte esta constituido por los tajos La Puente, “*La Puente West*”, Tabaco, Tabaco 1, “*Tabaco High Dip*”, “*Tabaco Low Dip*” y “*Tabaco Extension*”. La Zona Centro la conforman los tajos “*Expanded West Pit*” (*EWP*), Patilla, Oreganal 1 y 2, 831, 45, 100 y Palotal 1, 2 y 10.

FIGURA 1. Localización del depósito carbonífero del Cerrejón.



Tomado de www.cerrejoncoal.com

1.3. ANTECEDENTES

El “clinker” ha sido tema de estudio en varias regiones del mundo, especialmente en aquellas en donde el fenómeno de combustión espontánea del carbón es común en el presente o lo fue en un pasado geológico no muy remoto. Este fenómeno que ha llegado a tener un significativo impacto a nivel mundial ha ocurrido en los EUA (Lyman y Volkmer, 2001), Rumania (IAGA, 2004), Republica Checa y Nueva Zelanda (de Boer y otros, 2001), Turquía (Guyaguler y otros, 2003), Polonia (Cygankiewics, 1998), India y China (Walker, 1999).

Rocas quemadas y fundidas producidas por la combustión natural de los mantos de carbón o "*clinker*" han sido reportadas en Republica Checa, Australia, Nueva Zelanda, India y China (de Boer y otros, 2001), EUA (Heffern y otros, 1983 y Eichhubl y otros, 1999) y Rumania (IAGA, 2004).

Los trabajos de Heffern y otros (1983) y Hammarstrom y otros (1998) presentan la cartografía geológica de las áreas de "*clinker*" al norte de Powder River Basin (PRB) y en los parques nacionales de Custer y Gallatin (Montana) respectivamente. Dataciones sobre circones detríticos en muestras de "*clinker*" se han realizado para estimar las edades de los distintos eventos térmicos que han afectado a este material en Powder River Basin. Heffern y otros (1983) utilizaron trazas de fisión para conocer la distribución de las edades del "*clinker*", mientras que Reiners y Heffern (2002) determinaron la rata de exhumación de las cuencas intermontanas de Wyoming para el Pleistoceno usando datación (U-Th)/He. Eichhubl y otros (1999) estimaron el rango de temperaturas y su variación dentro del radio de influencia de la combustión, a partir de las fases de estabilidad de la sílice y de las arcillas, en cada una de las seis zonas de alteración térmica determinadas.

Aprovechando las propiedades geofísicas del "*clinker*" se han realizado algunos estudios afines sobre este material. Balachandran (1987) analizó la pésima respuesta del "*clinker*" ante las pruebas sísmicas realizadas en Powder River Basin. Por otra parte IAGA (2004) ha realizado estudios magnéticos y paleomagnéticos sobre el "*clinker*" de la Cuenca del Río Dacic (Rumania – Hungría), que aprovechan la alta fidelidad magnética de estas rocas para conocer las variaciones del campo geomagnético al momento de la alteración térmica.

En Colombia Geology and Reserves (2000, FIGURA 1), Summary Report (2000), Smith (2000), Davidson y Lowe (2000, FIGURA 2) y Trofimczyc (2001) modelaron y cartografiaron las áreas de “*clinker*” en la zona centro (CZC) del deposito carbonífero del Cerrejón (Guajira), a partir de las mediciones de las anomalías magnéticas de este material, pero indicaron que este modelamiento debía de ser complementado con un control estructural y un reconocimiento de campo. Trabajos como los de Geology and Reserves (2000) y Van der Merwe (2002) explican la relación existente entre la discontinuidades tectónicas y el control estructural ejercido por ellas sobre la distribución y el desarrollo del “*clinker*” en este mismo sector del Cerrejón.

1.4. METODOLOGÍA

El desarrollo de la cartografía del “*clinker*” se realizó de acuerdo a una metodología de trabajo que consistió de cuatro etapas consecutivas una de la otra, a lo largo de las cuales se alcanzó el objetivo primordial de esta tesis de grado.

La etapa inicial o de documentación preliminar consistió en la recopilación de la bibliografía pertinente a la temática del proyecto a realizar, la cual está referida en su apartado; y su respectivo análisis, con el fin de establecer los criterios de detalle que orientaron el trabajo durante las etapas siguientes. La recopilación de la Bibliografía se realizó en entidades como el INGEOMINAS (Seccional Bucaramanga), la Universidad Industrial de Santander, Carbones del Cerrejón LLC y en la Internet, recurriendo a publicaciones geológicas especializadas, tales como publicaciones seriadas, no seriadas, informes internos y tesis de grado.

La etapa de campo se inició con el reconocimiento de las áreas de minería y de avance del frente de explotación o en los afloramientos de los distintos tajos del depósito carbonífero, con el fin de llevar a cabo un control geológico a partir de la adquisición de información estructural (datos de rumbo y buzamiento) en puntos de control o estaciones, además de otras observaciones hechas en campo, que permitieron identificar las áreas de “*clinker*” y entender su distribución en superficie.

Finalizada la fase de campo, se procedió a la etapa de análisis e interpretación de la información obtenida y a su complementación y comparación con estudios previos relacionados con la cartografía del “*clinker*” en el Cerrejón (ver Antecedentes). Durante esta etapa se organizó la información, se registró en un mapa realizado a partir de los datos obtenidos en campo y se complementó con la revisión de los registros geofísicos corridos en los pozos exploratorios y las muestras de roca extraídas de los mismos; en donde se localizaron y definieron las áreas de “*clinker*” en un grado de detalle superior al de los estudios previos; además se elaboraron secciones geológicas transversales que permitieron obtener relaciones de carácter espacial en superficie y en profundidad del material cartografiado y conocer su distribución en el subsuelo y sus parámetros físicos como espesor y propagación en dirección del buzamiento. Por último, se presentaron los resultados obtenidos para ser discutidos y evaluados y así posteriormente entregar el informe definitivo.

1.5. TERMINOLOGIA EMPLEADA

En el desarrollo de esta práctica y más exactamente durante la elaboración del presente informe se utilizará terminología que aunque no es muy complicada, puede ser desconocida, por consiguiente el objeto de este

apartado es presentar la definición de algunos conceptos técnicos básicos comunes en la terminología de la minería a cielo abierto (FIGURAS 2 y 3).

- **Tajo o Mina a cielo abierto**

Mina, cantera o excavación en la que se trabaja por el método de extracción a cielo abierto para obtener material de valor.

- **Pared Final o Lateral**

Paredes verticales terminales de un tajo.

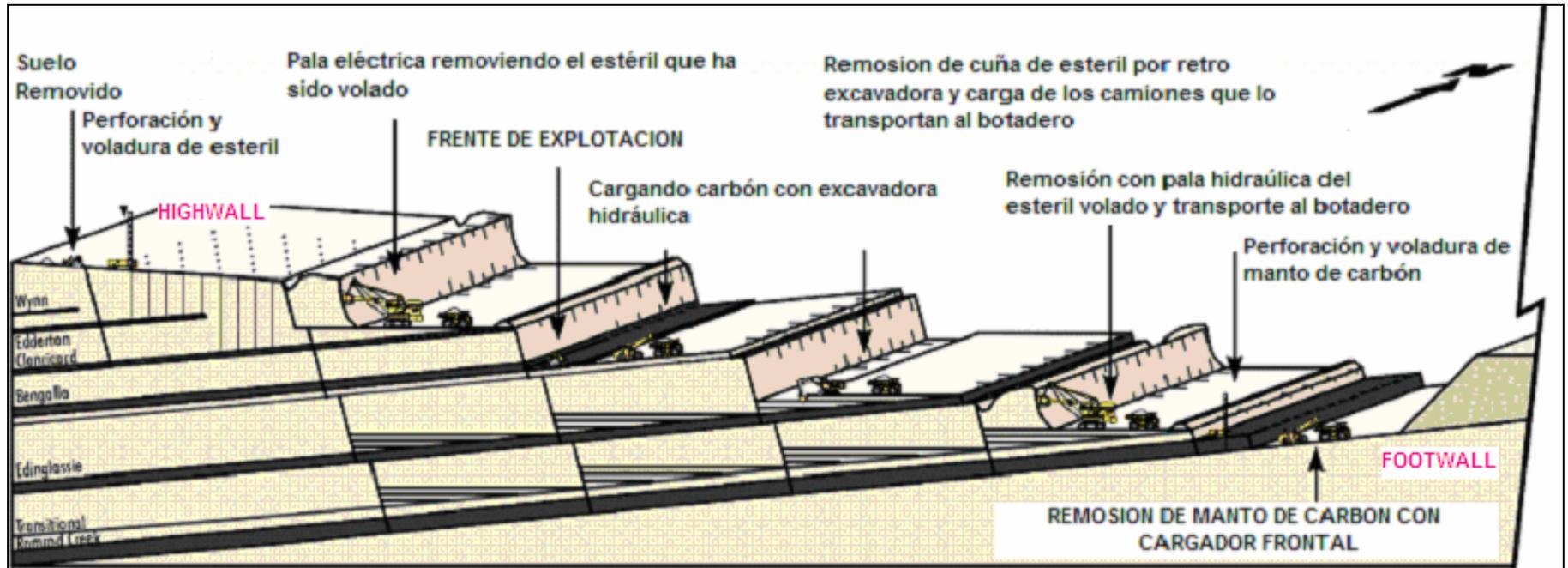
- **Pared Baja**

En minería, el lado inferior de un depósito, frecuentemente el piso del talud y corresponde a la base del último manto explotable para ese tajo. Pared opuesta a la Pared Alta. Su inclinación depende del buzamiento del manto.

- **Pared Alta**

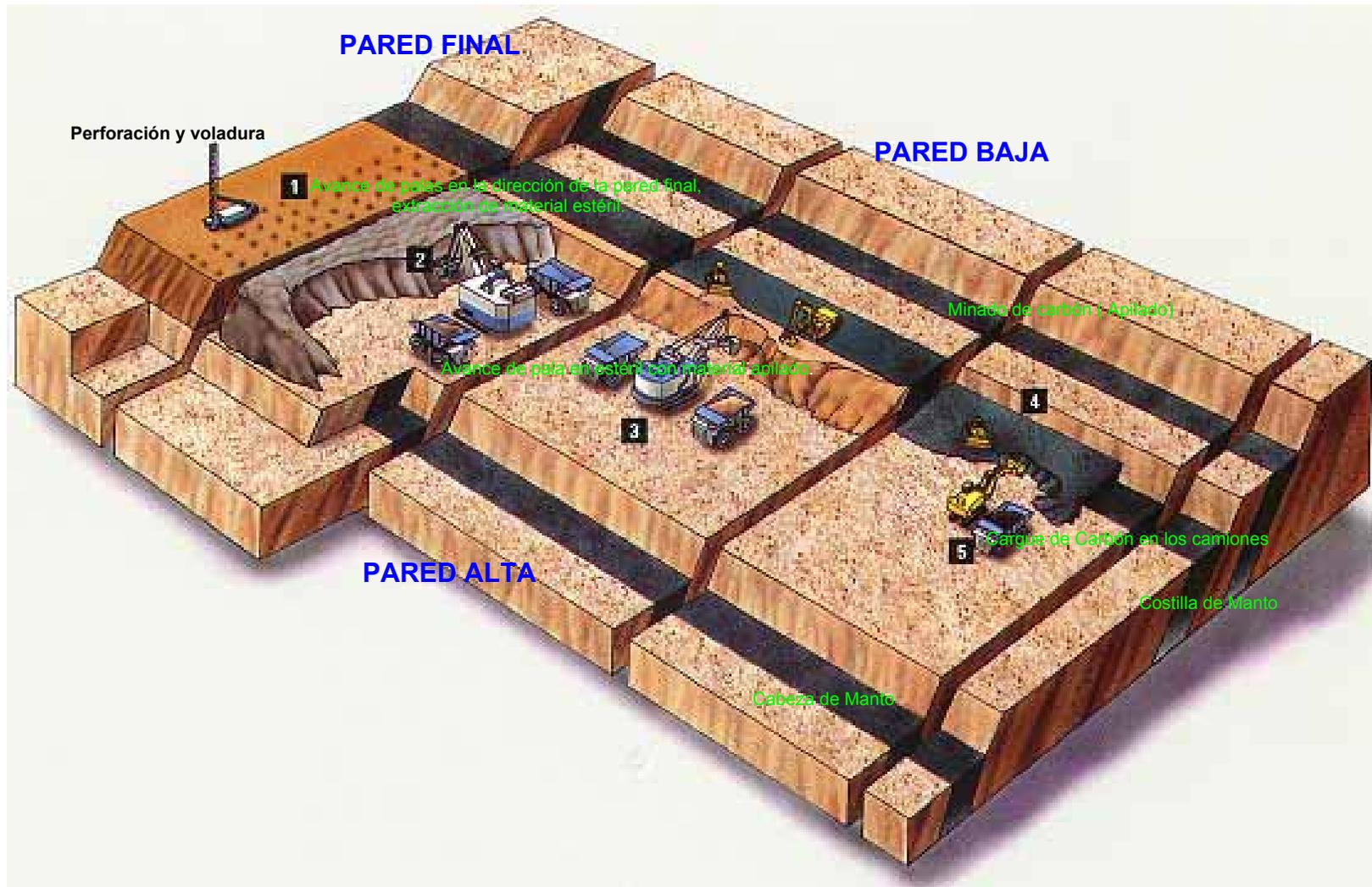
Cara no excavada de un tajo o mina a cielo abierto que expone tanto carbón como material de roca.

FIGURA 2. Diagrama que ilustra el desarrollo de la minería en un tajo y las diferentes etapas del que este se compone. En el Cerrejón la explotación del manto de carbón se hace en sentido contrario al mostrado en la figura, es decir contra el buzamiento de las capas.



Modificado de www.mining-technology.com/projects/greenhills/greenhills5.html.

FIGURA 3. Esquema de un Tajo mostrando las diferentes fases de la minería y las paredes que lo componen.



Modificado de www.mining-technology.com/projects/greenhills/greenhills5.html.

2. MARCO GEOLÓGICO

Van der Merwe (1999) señala que la estratigrafía del depósito carbonífero del Cerrejón corresponde a un sistema depositacional continental de planicie deltáica somera con estructuras sedimentarias y secuencias faciales propias de este ambiente, acompañado de un tectonismo originalmente pasivo que controló la subsidencia, los aportes de detríticos y la velocidad de enterramiento de los sedimentos.

Según este mismo autor, el depósito del Cerrejón, contrario a la mayoría de depósitos carboníferos del mundo, es una secuencia sedimentaria que fue sujeta desde las etapas tardías de la diagénesis a una fuerte, extensa y penetrativa deformación por compresión en dirección nor-occidental asociada a la Orogenia Andina, que ha generado una fuerte complejidad tectónica que incluye cabalgamientos, fallamientos, plegamientos y replegamientos a diferentes escalas y de carácter masivo.

2.1. ESTRATIGRAFÍA

De acuerdo a Van der Merwe (1999) la depositación en esta parte de Colombia se inicia con la separación de Norte y Sur América y continúa dentro de la cuenca de Back – Arc al este de la zona de subducción Andina.

La acreción de la Cordillera Occidental durante el Maestrichtiano y hasta el Eoceno temprano creó una cuenca Foreland Andina en la cual se acumularon sedimentos de planicie aluvial ricos en materia orgánica, de planicie costera y de estuario. La depositación terminó durante la

deformación Eocena inferior a media. A lo que siguieron épocas de actividad continental marcadas por la agresiva formación de meandros durante periodos de alto flujo que dieron origen a diferentes abanicos aluviales a lo largo del tiempo y a depósitos de terraza.

FIGURA 4. Columna estratigráfica detallada del depósito carbonífero El Cerrejón.

		LITOLOGÍA	FORMACIÓN	AMBIENTE				
CUATERNARIO			Aluvión	Continental	CUENCA FORELAND			
TERCIARIO	PLIOCENO			Continental				
	MIOCENO			Marino Somero				
	OLIGOCENO			Fluvio deltáico/Marino Marginal				
			Palmito	Fluvial trenzado				
	PALEOCENO		Cerrejón	Fluvio deltáico/Marino marginal				
CRETÁCICO	Superior		Manantial Hato nuevo	Marino	CUENCA MARGINAL			
			Molino					
			La Luna	Marino Restringido				
			Inferior	Aguas Blancas		Gp. Cogollo	Marino somero	
				Lagunitas			Fluvial	
	Río Negro							
	JURASICO		TITONIANO			La Quinta	Continental	BACK-ARC
			KIMMERIDGIANO					
			OXFORDIANO					

Modificado de Davidson y Lowe (2000).

Carbocol (1979, en Duran y otros, 1981) señala que en el área afloran rocas de edad Paleozoica hasta Cuaternaria, en una progresión de mas antiguas hacia el NW, en el basamento de la Sierra Nevada, a los depósitos mas recientes no consolidados en el SE (FIGURA 4). El carbón se encuentra en la Formación Cerrejón del Cenozoico, expuesta justo debajo del cabalgamiento

del mismo nombre, al borde SE del valle del río Ranchería y reposa trancionalmente sobre la formación Hato Nuevo. Encima se encuentra la formación Tabaco. El cuaternario que cubre el valle del río Ranchería y la parte meridional del yacimiento, esta constituido por terrazas aluviales, coluviones recientes y depósitos de talud de espesor variable.

2.1.1. Precámbrico

Terreno Granulítico de Los Mangos

Según Van der Merwe (1999) representa el basamento cristalino el cual consta principalmente de neises cuarzo - feldespáticos y hornblendo - biotíticos bandeados, de colores tanto claros como oscuros, granulitas cuarzo-pertíticas y granulitas granatíferas generalmente en contacto fallado con las rocas vecinas, con un alto estilo de deformación dúctil.

2.1.2. Paleozoico

De acuerdo a Van der Merwe (1999) en esta región el Paleozoico superior a medio está representado por areniscas ferruginosas de grano fino, arcosas y lodolitas rojas y negras, con estratificación gradacional, laminación flasser y ondulosa y capas ricas en carbón que contienen fósiles de braquiópodos y crinoides. Hacia el tope de esta secuencia se encuentran capas de caliza y de arcosas rojas, con fósiles de braquiópodos típicamente globulares.

La base del paleozoico medio está caracterizada por un conglomerado con granos de cuarzo subredondeados a angulares y fragmentos líticos de cuarcita y esquistos grises.

2.1.3. Triásico - Jurásico

Formación La Quinta

Radelli (1962c, en Julivert, 1968) la describe como una secuencia continental o sub-continental predominantemente detrítica, con la presencia de material de origen volcánico. Hacia la base esta constituida por conglomerados con cantos de lava ácida. También aparecen rocas volcánicas ácidas asociadas con areniscas, areniscas rojas de grano fino que constituyen la mayor parte de la Formación, tobas, tufas y material piroclástico interestratificado con las areniscas y lavas andesíticas concordantes y discordantes con los sedimentos descritos.

2.1.4. Cretácico

Cretácico Medio

Formación Rionegro

Según Hedberg y Sass (1937, en Julivert, 1968) consta de areniscas y arcosas de grano grueso con algunas capas de conglomerados, areniscas de grano fino y lodolitas interestratificadas. En la sección tipo localizada en la Sierra de Perijá, Zulia (Venezuela), alcanza su máximo espesor (3000 m). Según Van der Merwe (1999) hacia la región del valle del río Ranchería tienen una potencia de 300 a 400 m y está constituida por capas de conglomerados gravosos, compuestos de clastos redondeados de lavas rojas y piroclastos gris verdosos en arenas de matriz subarcósica. Estas se alternan con conglomerados lodolíticos y lodolitas calcáreas verdes y rojizas con laminación ondulosa.

Formación Lagunitas

De acuerdo a Van der Merwe (1999) se trata de una alternancia de aproximadamente 450 m de espesor de calizas micríticas grises de 10 a 15

m, calco – arenitas de grano fino de 3 m y capas de caliza micrita fosilífera de color café de 10 a 40 m.

Formación Aguablanca

Es una alternancia de capas de caliza micrítica de color gris a café y calizas fosilíferas, en paquetes de hasta 5 m, que descansan en conformidad sobre la Formación Lagunitas (Van der Merwe, 1999). Petters (1954*b*, en Julivert, 1968) le asigna una edad Aptiense inferior a partir de su gran contenido fosilífero.

Cretácico Superior

Formación La Luna

En su sección tipo en el estado de Zulia (Venezuela) Garner (1926, en Julivert, 1968) la describió como una sucesión de shale calcáreo negro fosilífero con concreciones. Según Van der Merwe (1999) hacia la región del valle del río Ranchería la Formación está constituida por intercalaciones de lodolitas calcáreas negras con areniscas de grano fino y areniscas subarcósicas de color gris a café con nódulos de chert de 3 a 10 m de diámetro. En la mitad de la secuencia, aparecen grandes fósiles de amonites con diámetros que llegan a exceder los 30 cm.

Formación Molino

Van der Merwe (1999) la definió como una secuencia clástica de grano fino constituida por limolitas calcáreas gris verdosas, interestratificadas con areniscas de grano fino ricas en arcillas, shales grises y delgadas capas de calizas y lodolitas calcáreas. Tiene un espesor total de 550 m.

2.1.5. Paleoceno Inferior a Medio

Formación Hato Nuevo

Equivalente a la Formación Guasare en Venezuela (de Porta, 1974). Renz (1960, en de Porta, 1974) la definió como una secuencia de arenisca micácea, marrón, maciza, en parte ferruginosa y localmente con fragmentos de *Lithothamnium*. Esta zona está cubierta por capas delgadas de caliza arenosa, color rojo-castaño con fragmentos de conchas e intercalaciones de lodolitas calcáreas sideríticas de color rojo-castaño oscuro. En su sección tipo presenta un espesor de 100 m. Van der Merwe (1999) en la cuenca del río Ranchería la describe como una serie clástica de lodolitas arcillosas micáceas de color café claro, areniscas subarcólicas de grano fino micáceas de color café claro y arcillolitas arenosas grises. La parte superior de la secuencia tiene una alternancia de lodolitas arcillosas amarillas con arenas calcáreas de grano fino. Descansa en contacto transicional sobre la formación Molino.

Formación Manantial

Tschanz (1969, en de Porta, 1974) solo la describe como constituida por areniscas y calizas y en la cartografía no la separa de las formaciones Tabaco y Aguas Nuevas. Según Van der Merwe (1999) es una secuencia de calizas claras a oscuras ricas en conchas de ostras. Hacia la parte superior presenta una alternancia de lodolitas micáceas finamente laminadas y arcillolitas con calizas lodosas de color gris verdoso. Su contacto inferior y superior es transicional con las formaciones Hato Nuevo y Cerrejón respectivamente. Tiene un espesor de 300 a 350 m.

2.1.6. Paleoceno Superior

Formación Cerrejón.

Según Duran y otros (1981) esta compuesta por areniscas grises a pardo amarillentas, algunas veces calcáreas, interestratificadas con lodolitas grises y carbonosas, que contienen de 30 a 40 mantos de carbón, mas o menos regularmente distribuidos y cuyo espesor oscila entre pocos centímetros y 10 o mas metros de espesor, llegando ocasionalmente hasta 26 m. Hacia la parte mas alta de la secuencia son comunes las areniscas con fragmentos líticos, algunas veces con matriz calcárea. Los nódulos sideríticos son comunes a lo largo de toda la Formación y llegan a desarrollar tamaños de hasta 1 m de diámetro. Intercor (1980b, en Arboleda, 1987) señala que tiene un espesor promedio de 900 m y se ha definido de edad Paleoceno. Presenta estratificación cruzada de bajo ángulo y estructuras flaser.

Con base en la distribución y espesor de los mantos de carbón, la formación Cerrejón ha sido dividida en tres miembros: el inferior, de cerca de 180 m de espesor, caracterizado por la presencia de mantos delgados; el medio de cerca de 300 m de espesor esta formado por un grupo compacto de mantos de 0.9 a 6 m, regularmente espaciados, y el superior, de unos 400 m que contiene los mantos mas gruesos de 1.4 a mas de 10 m, los cuales están ampliamente distribuidos (Carbocol, 1979, en Duran y otros, 1981).

2.1.7. Eoceno - Oligoceno

Formación Tabaco

Tschanz (1969, en de Porta, 1974) la describe de forma general como constituida por areniscas y arcillolitas y le asigna una edad de Eoceno superior(?). En la cartografía no aparece separada de las formaciones Aguas Nuevas, Cerrejón y Manantial. De acuerdo a Van der Merwe (1999) en la

región del Cerrejón aparece como una secuencia de rocas clásticas de grano grueso con estratificación cruzada. Está constituida por conglomerados básales compuestos de chert negro bien redondeado y gravas de cuarzo lechoso en una arenisca de matriz arcósica, la cual ocasionalmente es carbonácea. La parte superior de la unidad esta conformada por areniscas subarcósicas de grano grueso de color gris claro, las cuales se hacen más finas hacia el tope de la secuencia. Su espesor esta estimado en 120 m.

Formación Palmito

Beck (1921, en de Porta, 1974) describe a esta formación con dos niveles de caliza separados por lodolitas en su localidad tipo, al occidente de la población de Palmito en el Depto. de Sucre. La caliza inferior está dispuesta en capas delgadas, mientras que la superior es más dura, masiva y no presenta planos de estratificación. Van der Merwe (1999) la define en la región del Cerrejón como una unidad clástica de grano fino. La base esta marcada por areniscas arcillosas de grano fino a medio que varían en composición desde cuarzo- feldespáticas a arcósicas. La parte superior tiene areniscas arcillosas y lodolitas, alternando con areniscas lodosas calcáreas. Se observan capas de yeso en la parte superior. Esta Formación es claramente continental, con condiciones de depositación áridas a semiáridas indicadas por la presencia de evaporitas. Posee un espesor variable de 180 a 300 m.

2.1.8. Depósitos Paleocenos a Recientes

Según Van der Merwe (1999) consiste en sedimentos aluviales y coluviales compuestos por gravas de basamento y pre-jurásicas bien redondeadas y altamente resistentes, fragmentos de lavas y piroclastos jurasicos y clastos calcáreos mas recientes. Estos depósitos no consolidados están asociados a

una serie de abanicos aluviales acrecionados y superpuestos de los que solo existen delgadas porciones remanentes debido a eventos denudativos.

El abanico mas destacado es el Abanico de Fonseca, que recibió sus aportes desde la Sierra Nevada de Santa Marta. Más recientemente encontramos el material movido por el río Ranchería y sus tributarios, que se trata de una mezcla del material previo.

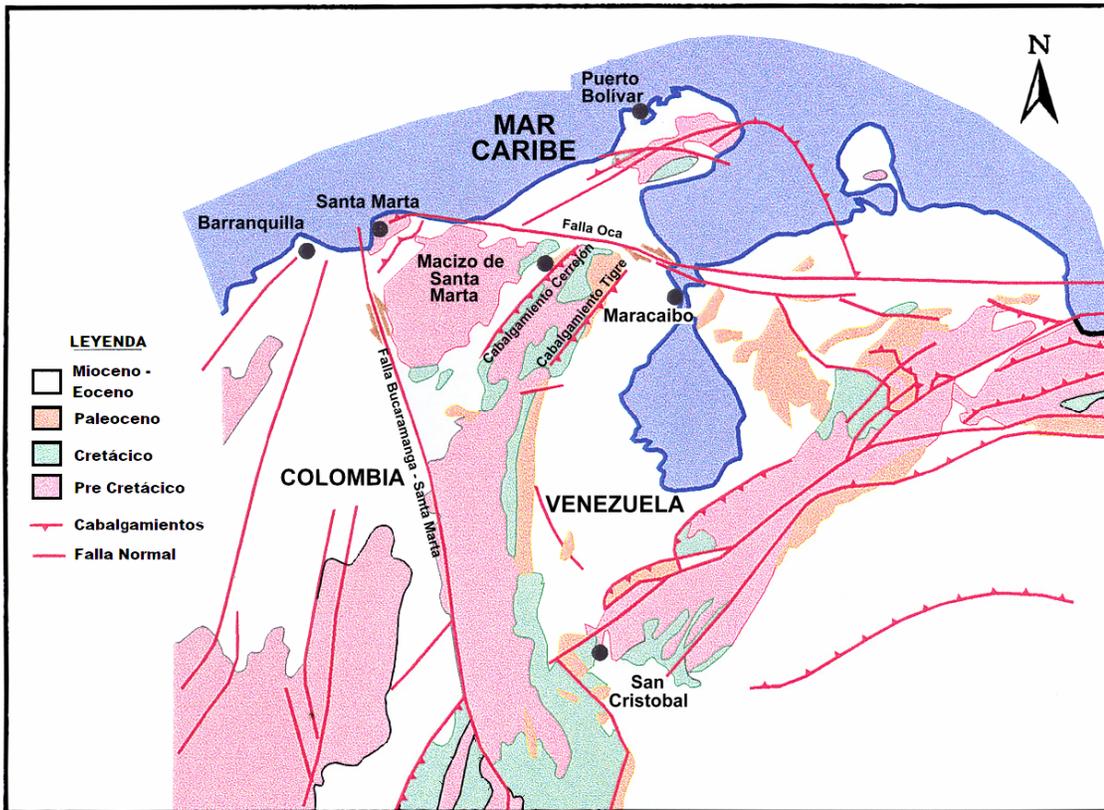
2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El campo carbonífero del Cerrejón es un depósito estructuralmente complejo localizado dentro del cinturón de Cabalgamiento del Cerrejón – Ranchería y está dominado por los rasgos asociados a ellos que forman parte de los efectos de la orogenia Andina en la zona Norte de Suramérica. El cinturón de Cabalgamiento comprende una serie de escamas o laminas de convergencia NW – SE.

La geometría de los cabalgamientos se define por una cuña triangular de escala continental. Dicha cuña tiene su ápice en Santa Marta está limitada al norte por la Falla de Oca con movimiento dextral y de rumbo E-W aproximadamente, y hacia el sur por la falla Bucaramanga – Santa Marta con movimiento sinextral y fue transportada hacia el NW a lo largo de un “*deep – seated detachment*”. La Falla de Oca y Bucaramanga – Santa Marta actuaron como rampas oblicuas a lo largo de las cuales la componente lateral de movimiento se acomodó (FIGURA 5). De acuerdo a Carbocol (1979 en Duran y otros, 1981) hacia el oriente el yacimiento esta limitado por el Cabalgamiento Cerrejón, el cual separa la Serranía del Perijá del valle del río Ranchería, y hacia el oeste por el Cabalgamiento Ranchería, paralelo al anterior, casi vertical y que controla el curso del río homónimo. Además de

estos rasgos mayores se encuentran fallas transversales menores, las cuales dividen la zona en bloques que mantienen la continuidad estratigráfica (FIGURA 6).

FIGURA 5. Marco geológico regional, con los principales rasgos estratigráficos y estructurales del norte de Suramérica.

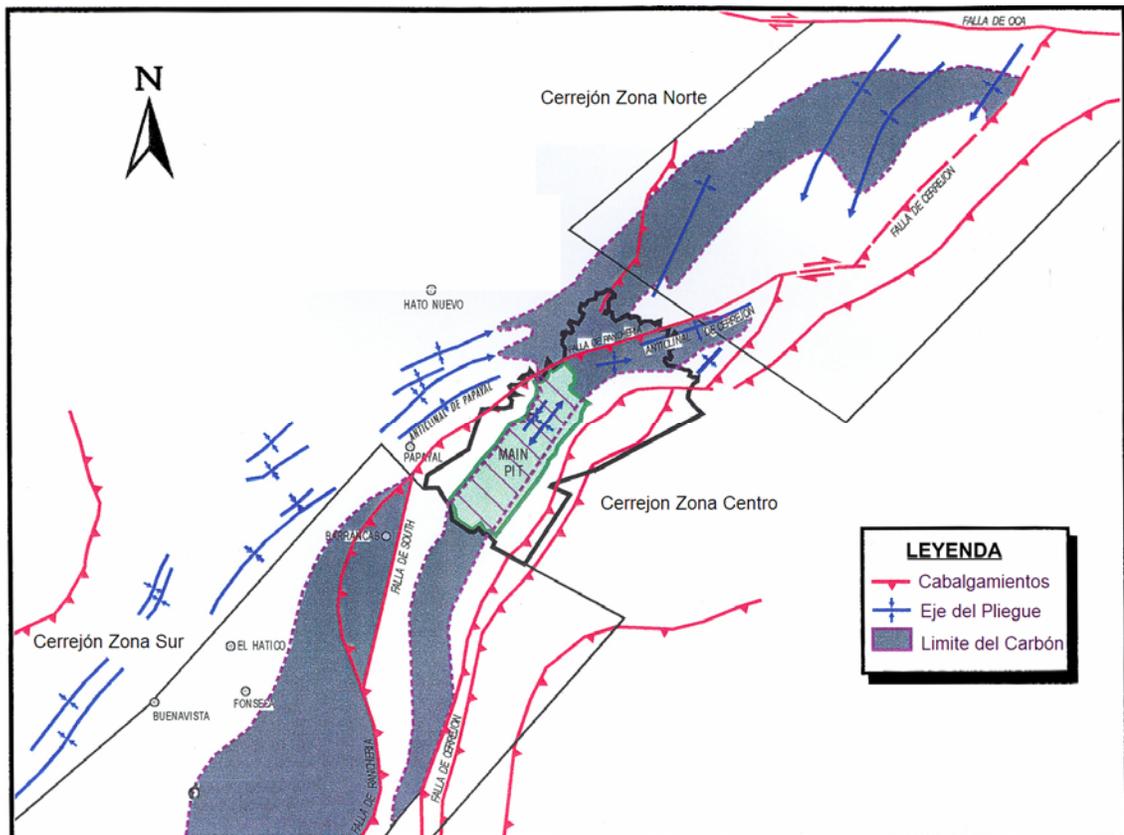


Modificado de Van der Merwe (1999).

El sinclinorio de edad Terciaria con flancos Cretácicos, es la estructura de tipo dúctil dominante, enmarcada por algunos de los rasgos estructurales de carácter frágil ya mencionados. Dentro de él se han determinado varios subpliegues entre los cuales están los Sinclinales de Sarahita y Tabaco y los Anticlinales de Papayal y Cerrejón (Carbocol, 1979, en Duran y otros, 1981)

Aunque la secuencia Carbonífera ha sido expuesta a esfuerzos extensivos penetrativos y localmente muestra los efectos de esta deformación a través de cabalgamientos internos, plegamientos y fallamientos, la secuencia es notablemente indeformada en el contexto de la deformación masiva.

FIGURA 6. Marco geológico-estructural del depósito del Cerrejón.



Modificado de Van der Merwe (1999).

2.2.1. Cabalgamiento Cerrejón

Según Van der Merwe (2002) el Cabalgamiento Cerrejón es una característica a escala regional con rumbo SW – NE y con longitud mayor de 120 Km. Es un sistema duplex que se forma en el bloque levantado del

depósito carbonífero del Cerrejón, en el cual las rocas volcánicas de edad jurásica fueron cabalgadas en el tope de la Formación Cerrejón.

El Cabalgamiento Cerrejón es un cabalgamiento fuera de secuencia formado en el bloque techo del Cabalgamiento Ranchería. La magnitud de su desplazamiento es desconocido, pero dada la duplicación de la columna estratigráfica por debajo del Jurásico, probablemente podría exceder los 5 Km.

La zona del Cabalgamiento con plano basal buzando 20° al SE (datos de sísmica en profundidad) se caracteriza por duplex imbricados a lo largo del rumbo, que se desprenden de un plano basal formando un complejo sistema en el cual una variedad de rocas cretácicas y jurásicas se están apilando una en el tope de la otra.

2.2.2. Cabalgamiento Ranchería

Localizado hacia el centro del yacimiento, posee un rumbo: NE-SW. Según Van der Merwe (2002), este Cabalgamiento no es persistente regionalmente y está expuesto en una longitud de aproximadamente 100 Km. en la dirección del rumbo. Contrario al Cabalgamiento Cerrejón, el Cabalgamiento Ranchería presenta un buzamiento fuerte, cerca de superficie es del orden de los 45° y se aplanan en profundidad (20° a 30°) cerca a la base del cretácico.

El Cabalgamiento Ranchería es un sistema imbricado con una bifurcación hacia el NE del área de la mina. El movimiento aquí se acomoda a lo largo de una zona estrecha de alto esfuerzo. La orientación y características del plano del Cabalgamiento son similares a los de la falla de Oca. Hacia el SW el

Cabalgamiento Ranchería se divide en dos ramas, el Cabalgamiento superior e inferior. Su importancia económica es representativa, ya que esta duplicando la secuencia carbonífera.

En profundidad es posible que la zona de despegue del Cabalgamiento Cerrejón y Ranchería sea la misma.

2.3. GEOLOGÍA HISTÓRICA

El proceso de depositación inició dentro de la paleocuenca Magdalena, que se extendía desde el escudo de la Guyana hacia el Noroccidente. Su historia tectónica se inicia desde el Jurásico tardío, en un ambiente extensional con sedimentación de tipo rift en una cuenca de retro-arco. Luego, durante el Cretácico temprano y por un breve periodo ocurre una depositación clástica heterogénea y sin selección asociada a abanicos aluviales hacia las zonas marginales o pericratónicas de la cuenca. A lo que siguió una sedimentación calcárea marina y clástica. Según Duran y Arboleda (1990) a finales del Cretácico, la sedimentación en la región comprendida entre los Andes colombianos paso a ser de carácter continental, haciendo que los ambientes favorables para la depositación de los sedimentos orgánicos carbonáceos migraran hacia el norte, al este de la ancestral cordillera Central. Finalmente, estos ambientes de planicie deltáica somera migraron hacia el oeste, posiblemente debido al fenómeno orogénico subsiguiente (FIGURA 7).

Iniciada la actividad tectónica de convergencia de placas y de acreción propia a los periodos de pre-orogenia se forman una serie de cuencas de foreland (post-orogénicas) en donde se depositaron varias secuencias de molasas en condiciones marinas someras y terrestres, que van desde el paleoceno hasta

nuestros días y que incluyen la sucesión sedimentaria de los carbones del Cerrejón.

Desde esta época en adelante, la sedimentación ha sido marina sobre márgenes pasivos en las vecindades de lo que hoy representa la cuenca del Valle de los Ríos Cesar y Ranchería. Este periodo fue alterado abruptamente por episodios de plegamiento y cabalgamiento que duplicaron la estratigrafía y que a su vez crearon una zona de una muy alta complejidad estructural.

Van de Merwe (1999) cree que la Formación Cerrejón, la cual contiene la secuencia de carbones explotables, se depositó en un ambiente fluvio-deltáico progradante, transicional a continental bajo condiciones subaéreas, marcado por una rápida subsidencia; al igual que la Formación Los Cuervos en el área de La Jagua – La Loma, en el departamento del Cesar (Duran y Arboleda, 1990).

FIGURA 7. Perfil estratigráfico simplificado e historia tectónica de la secuencia sedimentaria del Campo Carbonífero del Cerrejón.

ESTRATIGRAFÍA REGIONAL E HISTORIA TECTÓNICA DEL CERREJÓN					
Edad (mA)	Estratigrafía		Espesor (m)	Mantos	Evento
0	Cuaternario		0 – 80		Fallas Normales
5					Levantamiento + Plegamiento + Cabalgamiento
10					
	Mioceno - Eoceno		0 - 750		
50	Fm. Cerrejón	Sup.	400	81 – 175	Levantamiento + Plegamiento + Cabalgamiento
55		Med.	300		
60		Inf.	200		
	Paleoceno		300 – 450		
	Fm. Molino		500		Acreción Cordillera Occidental
80	Periodo de erosión o no depositación				
85					
	Cretácico Inferior		550		Rifting y Fallamiento Normal
125	Basamento Jurásico				

Modificado de van der Merwe (1999).

3. COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA Y GENERACIÓN DE “CLINKER”

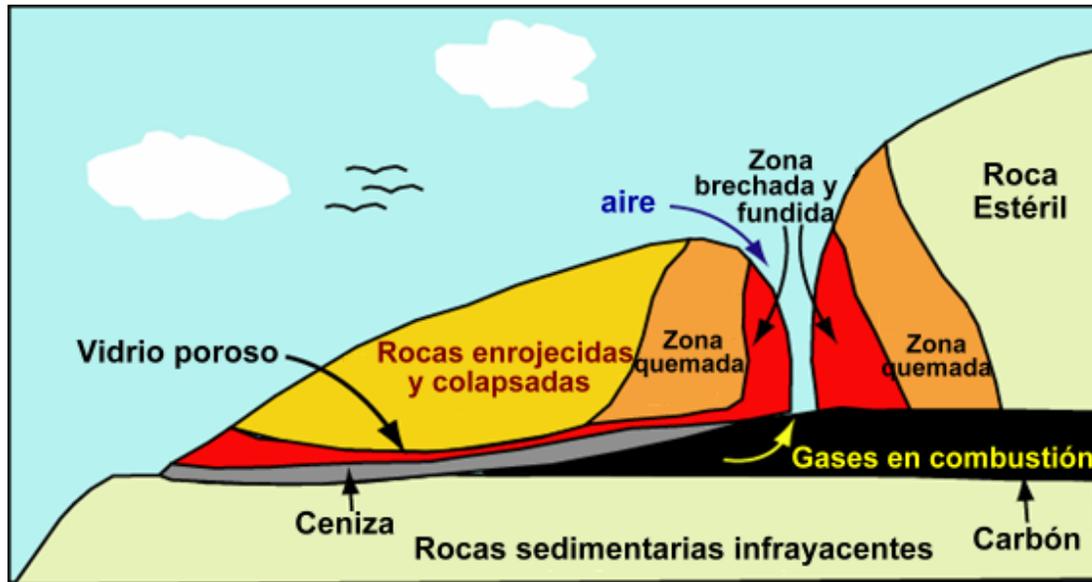
Localizar y mapear las áreas de “*clinker*”, así como conocer su distribución en superficie y en profundidad es importante porque permite definir el plan de avance minero dado su potencial impacto geotécnico, también porque permite estimar las reales reservas de carbón del depósito, ya que representan zonas de carbón reducidas a cenizas.

Estas áreas se forman como resultado de la combustión “*in situ*” de los mantos de carbón en áreas donde el oxígeno ha sido introducido al sistema por discontinuidades tectónicas o por su exposición en superficie, quemando y reduciendo la roca adyacente, liberándola de materia volátil, enrojeciéndola, silicificándola, caolinizándola y concentrando los minerales metálicos alrededor de la combustión, lo que permite definir la geometría y dimensiones o extensión del cuerpo, utilizando métodos indirectos como los aeromagnéticos (Geology and Reserves, 2000 y Summary Report, 2000).

3.1. COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA

La combustión espontánea (sponcom) o autocombustión del carbón es un fenómeno típico, que ocurre naturalmente durante su oxidación al exponerse a condiciones atmosféricas, por erosión o por las prácticas mineras a cielo abierto y por el contacto con oxígeno introducido a profundidad, bien sea a través de las discontinuidades tectónicas o por la presencia de agua en el sistema. Bajo las condiciones apropiadas la oxidación natural “*in situ*” del carbón se acelera rápidamente, iniciando el autocalentamiento y posteriormente la combustión espontánea (FIGURA 8).

FIGURA 8. Esquema de una zona de combustión espontánea del carbón. Obsérvese la reducción del manto de carbón a una delgada capa de cenizas debido a la combustión y la relación entre la roca sana, la quemada y la fundida.

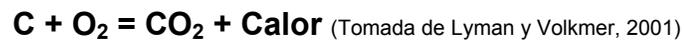


Modificado de http://www.geology.yale.edu/~reiners/GSA2002clinker101402_files/frame.htm

De acuerdo al **DOE/EH-0320** (1993) al entrar en contacto el carbón con el oxígeno se inicia el proceso de oxidación. El calor generado durante esta reacción comienza a incrementar paulatinamente la temperatura del carbón y a liberar medidas cantidades de gas. La producción de calor y el incremento de la temperatura dependen principalmente de la interacción del oxígeno, con el carbón (Sevenster, 1961, en Guyaguler y otros, 2003). Lyman y Volkmer (2001) señalan que el autocalentamiento ocurre por las bajas temperaturas de oxidación en combinación con la absorción de humedad dado el estado de secado parcial a total del carbón. Kutcha y otros (1980, en Lyman y Volkmer, 2001) demostraron que para carbones de bajo rango dada su alta concentración de humedad, el autocalentamiento ocurre a temperaturas ambiente (aproximadamente 30°C), es decir, que el carbón tiende a incrementar dramáticamente su temperatura mientras absorbe

humedad, ya que ella le proporciona la cantidad de oxígeno necesario para que inicie la reacción de oxidación.

La oxidación del carbón es un proceso muy complejo debido a la diversa composición y a la naturaleza heterogénea del mismo. La reacción básica o simplificada en la oxidación del carbón puede ser escrita como:



Si el calor de la oxidación no es disipado o removido del sistema, el carbón seguirá calentándose. Siempre que la rata de oxidación se incremente exponencialmente con la temperatura, la rata de calentamiento se acelerara y el autocalentamiento inicial superara el punto de ignición, llegando a la combustión espontánea, ocasionando el fuego (Timko y Derick, 1995, en Guyaguler, 2003).

Según el **DOE/EH-0320** (1993) la temperatura del carbón empieza a aumentar por encima a la del ambiente. De los 65 a los 149°C se liberan los primeros gases precursores de la combustión (aerosoles, hidrogeno y CO₂). Cuando la temperatura alcanza entre los 315 y 371°C son emitidas partículas visibles y relativamente grandes. Ya entre los 398 y 426°C, inicia la combustión latente y posteriormente con el incremento de la temperatura se produce la llama.

Según Kim (1977, en Lyman y Volkmer, 2001) durante el secado del carbón, dada la disminución de su humedad, ocurre un proceso endotérmico que disminuye su temperatura. Mientras que al ganar humedad se inicia un proceso exotérmico que libera calor y por lo tanto acelera el calentamiento espontáneo del carbón. Pero no solo la humedad y la oxidación son

necesarias para que inicie la combustión, existen otros factores que inciden en este fenómeno, aunque son de menor importancia:

1. **Flujo de aire.** Además de proveer el oxígeno necesario durante la oxidación, es una forma de disipar el calor generado.
2. **Tamaño de la partícula.** A menor tamaño de la partícula de carbón, mayor será la probabilidad de que ocurra la oxidación.
3. **Rango.** Con la disminución del rango de carbón aumenta su tendencia al autocalentamiento. Los carbones subbituminosos poseen un alto porcentaje de macerales reactivos (vitrinita y exinita) que incrementan la tendencia al calentamiento.
4. **Temperatura.** Las elevadas temperaturas actúan como un catalizador en la reacción oxígeno – carbón.
5. **Contenido de sulfuros.** La presencia de minerales como la pirita y la marcasita durante su oxidación aceleran el calentamiento espontáneo del carbón, ya que causan la desintegración y reducción en tamaño de las partículas involucradas en las reacciones. Los sulfuros deben estar presentes en concentraciones que no superen el 1 o el 2% para que no tengan un efecto significativo.
6. **Factores geológicos.** Las fallas y fracturas pueden facilitar la entrada de agua y aire en el manto de carbón. Este influjo de oxígeno es la principal razón de que ocurra el autocalentamiento y posteriormente la combustión espontánea. Además las rocas son malas conductoras del calor, lo que dificulta que este se disipe.
7. **Prácticas mineras.** Ellas generan la acumulación de partículas de carbón de diferente tamaño en distintos lugares del frente minero o en áreas subterráneas, convirtiéndolos en sitios potenciales para la combustión espontánea.

3.1.1 Zonas de alteración por combustión espontánea

Durante la combustión, la roca a su alrededor alcanza temperaturas que van de aproximadamente 350°C a unos 20 o 30 m de la zona de quema a entre 900 y 1000°C en el corazón de la misma (Eichhubl y otros, 1999). Aunque según de Boer y otros (2001) en las áreas de recarga de oxígeno hacia el centro de la zona de combustión pueden alcanzarse temperaturas de entre 1500 y 2100°C.

De acuerdo a Eichhubl y otros (1999) dentro del radio de influencia de la zona de combustión (20 a 30 m) se desarrollan de acuerdo a criterios macroscópicos seis zonas de alteración térmica. De afuera a hacia el centro de la combustión, estas son: 1) lodolitas silíceas inalteradas ricas en orgánicos, 2) lodolitas coquizadas ricas en orgánicos, 3) lodolitas blanqueadas, 4) lodolitas oxidadas, 5) lodolitas oxidadas sinterizadas y 6) “*clinker*”. Las zonas de alteración macroscópica pueden ser correlacionadas con la inestabilidad del ópalo-A y la esméctica y con la aparición de cristobalita, hematita e illita. El núcleo de las zonas de alteración esta caracterizado por la pérdida de minerales arcillosos, el inicio de la inestabilidad del cuarzo y la aparición de cordierita, plagioclasa y tridimita.

3.2. “CLINKER”

El “*clinker*” es una roca metamórfica (Reiners y Heffern, 2002 y Gregerova, ?) denominada mas exactamente como pirometamórfica (de Boer y otros, 2001), resultado de la alteración térmica de lodolitas, shales o areniscas quemadas y fundidas durante la combustión espontánea del carbón (Heffern y otros, 1983), que alcanza normalmente temperaturas de 1000°C a una presión que no supera los 100MPa (aproximadamente 987 atm). A unos 20 o

30m de la zona de quema la roca adyacente alcanza temperaturas de 350°C, pero es solo cuando alcanza 600°C que empieza a sufrir alteraciones térmicas notables (Eichhubl y otros, 1999). En el corazón de la combustión o zona de quema, especialmente en las áreas de recarga de oxígeno, la temperatura se incrementa dramáticamente, manteniéndose en un rango de entre 1500 y 2100°C; temperatura a la cual la roca sufre fusión parcial (de Boer y otros, 2001).

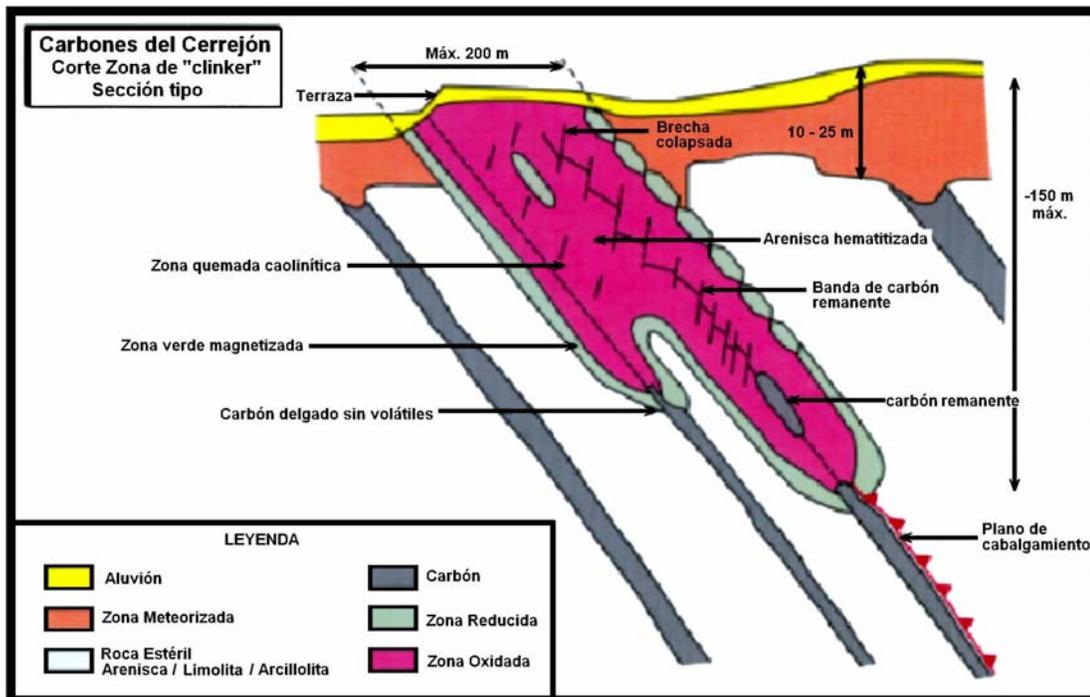
El “*clinker*” es un material caolinizado y silicificado altamente poroso y permeable, muy fracturado, duro y frágil, principalmente de color rojo, aunque también puede ser naranja, rosado y negro (Eichhubl y otros, 1999); que incluye porcelanita (arcillolita gris sinterizada) y brechas fundidas y soldadas (Heffern y otros, 1983). Según Trofimczyc (2001) las propiedades físicas del “*clinker*” son significativamente diferentes a aquellas de la roca original. Durante su alteración el protolito es reducido y luego oxidado, liberándolo de materia volátil y reacomodando y concentrando los minerales principalmente de hierro alrededor de las zonas de combustión, lo que permite localizar y definir los límites de los cuerpos de “*clinker*” a partir de su alta susceptibilidad magnética utilizando métodos geofísicos (Trofimczyc, 2001). La liberación de volátiles y la concentración de los minerales le proporcionan al “*clinker*” sus particulares características físicas que lo hacen más resistente que la roca no quemada por lo que comúnmente crea geoformas dominantes, dadas las características del material, como crestas, mesetas, acantilados y bancos topográficos.

3.3. FORMACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL “CLINKER”

De acuerdo a Geology and Reserves (2000), bajo condiciones normales, la combustión de carbón se inicia cuando éste entra en contacto con el oxígeno,

lo cual sucede si el manto esta cerca a superficie o si se expone a la intemperie, ya sea por causas geológicas (fallas y plegamientos) o por meteorización. Las discontinuidades tectónicas permiten la percolación del oxígeno a profundidad, alimentando el autocalentamiento (FIGURA 9).

FIGURA 9. Principales características de una zona típica de "clinker".



Modificado de Geology and Reserves (2000).

Existe una clara relación entre el contenido de humedad del carbón y la distribución de los cuerpos de "clinker". Estas áreas se desarrollan principalmente en superficie, hacia la parte superior del depósito, esto es donde existan las condiciones óptimas para la oxidación "in situ" de los carbones con alta concentración de humedad.

La combustión natural del carbón se inicia en mantos que afloran en superficie. Las áreas de "clinker" muestran que el fuego generado en ellos

puede propagarse por si mismo a grandes profundidades (hasta 150 m) en dirección del buzamiento.

Un manto de carbón de varios metros de espesor que se ha quemado forma una capa de ceniza de unos pocos centímetros de espesor, ocasionando que el techo del manto colapse y que se formen fracturas que se propagan hasta la superficie. Las áreas colapsadas y las fracturas junto a la alta porosidad hacen que la roca suprayacente se quemé, actuando como una chimenea que promueve el acceso de oxígeno en profundidad. De esta manera se permite que la combustión de carbón que comienza en superficie se extienda buzamiento abajo.

Según Geology and Reserves (2000) debido a la gran profundidad a la que se extienden los cuerpos de *“clinker”*, existen otros mecanismos que suplen el oxígeno para la combustión del carbón, tales como la deformación, las estructuras y las fracturas desarrolladas durante la Orogenia Andina que permitieron que el agua lluvia oxigenada penetrara a profundidad hasta alcanzar los mantos de carbón, causando la oxigenación *“in situ”* de los mismos. Los mantos de carbón debieron quemarse y el fuego se extendió hacia abajo en el sentido del buzamiento.

El factor limitante para la expansión de las áreas de *“clinker”* en profundidad como puede observarse, se encuentra relacionado tanto con la disponibilidad de oxígeno, como con la presencia de agua, existiendo una relación directa entre el contenido de humedad y la distribución de los cuerpos de *“clinker”*.

Por otro lado, Geology and Reserves (2000) indica que la expansión del *“clinker”* en la dirección del rumbo está más relacionada con el buzamiento de los mantos, así en las zonas donde los mantos tienen un mayor

buzamiento, el fuego se propagara mas fácilmente en la dirección del rumbo, moviéndose en direcciones opuestas desde el punto de inicio. Este avance se realiza sin dificultad hasta tanto el manto no encuentre una forma de obstáculo dado por fallas tanto normales como inversas y cabalgamientos fuera de secuencia.

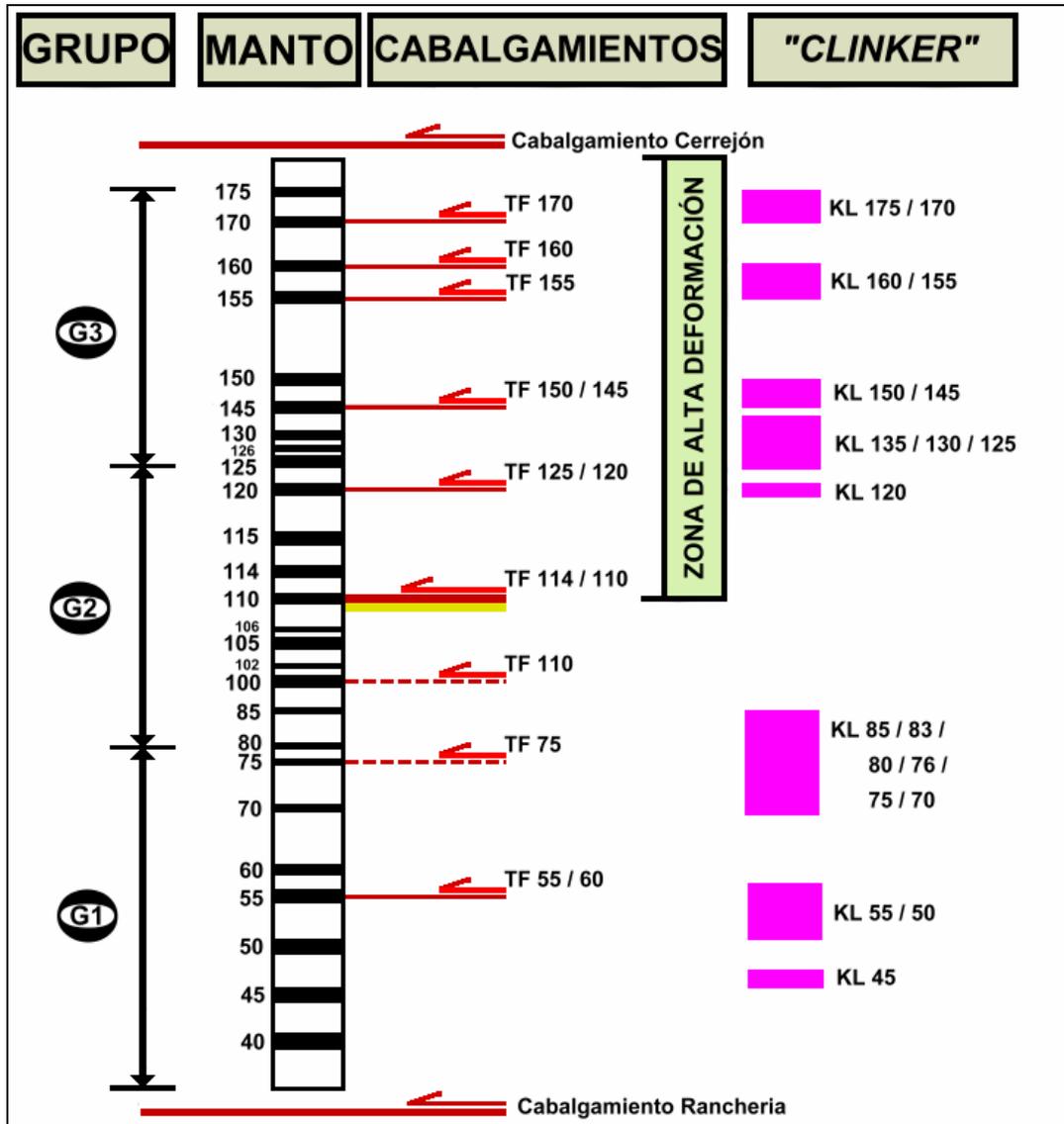
3.4. CONTROL ESTRUCTURAL DE LAS ÁREAS DE “CLINKER” EN EL CERREJÓN

Las áreas de “*clinker*” están preferiblemente asociadas a zonas con una elevada complejidad estructural y alcanzan su mejor desarrollo junto a zonas de cabalgamiento, sugiriendo que su distribución esta controlada estructuralmente (FIGURA 10).

Durante la deformación Andina de finales del Mioceno se desarrollaron los principales rasgos tectónicos que dominan la geología estructural de la región, plegando, fallando, levantando, erosionando y consecuentemente exponiendo en superficie toda la secuencia sedimentaria, incluidos los mantos de carbón, lo cual permitió que se dieran las condiciones físicas optimas para la oxidación “*in situ*” y la combustión espontánea del carbón.

Para Geology and Reserves (2000) los cabalgamientos de bajo ángulo levantaron la cuña triangular continental, de la cual hace parte el Macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta y la suprayacente Formación Cerrejón. Este levantamiento y la subsiguiente erosión permiten la exposición de los mantos, desarrollando de esta forma las áreas de “*clinker*” desde hace ya 8 millones de años durante la Orogenia Andina.

FIGURA 10. Relación estratigráfica – estructural de la parte superior de la Formación Cerrejón. Se observa toda la secuencia de los mantos agrupados en 3 grupos y como estos son afectados por el juego de cabalgamientos menores asociados al duplex Cerrejón-Ranchería. También localiza los cuerpos de “clinker” según el manto quemado. **KL85 / 83**: “clinker” y manto asociado; **TF75**: Cabalgamientos menores y manto afectado.



Adaptado y modificado de Summary Report (2000).

Las principales concentraciones de las áreas de “clinker” se localizan hacia la parte superior de la secuencia estratigráfica específicamente en las zonas de

mayor complejidad estructural. Se encuentran relacionadas a cabalgamientos fuera de secuencia y a fallas que en la mayoría de los casos actúan como obstáculos que impiden la continuidad de las áreas de “*clinker*”, pero que a su vez facilitan la entrada y alimentación de oxígeno dentro de la secuencia sedimentaria.

Los cabalgamientos fuera de secuencia se encuentran asociados con la Falla Ranchería, en donde el estilo de deformación es mucho más frágil, lo que origina un mayor fracturamiento que por lo tanto permite que el agua que contiene oxígeno penetre en profundidad, causando la oxigenación “*in situ*” de los mantos y su autocombustión (Van der Merwe, 2002).

Las estructuras de tipo dúctil como los plegamientos también facilitan la introducción al sistema del oxígeno, dentro de las áreas deformadas (Van der Merwe, 2002). En el Cerrejón es típico encontrar zonas de “*clinker*” en áreas asociadas a las deformaciones producidas por el Cabalgamiento Ranchería. Esta falla rotó y plegó los estratos, desarrollando estructuras extensionales y fracturas, permitiendo que el agua penetrara a profundidad y oxigenara la secuencia sedimentaria, incluidos los mantos de carbón.

En general el rumbo de la Formación Cerrejón es NE – SW, excepción hecha de la parte S del área de Patilla, donde rota en dirección E-W, por efecto de la Falla Ranchería dando origen a una estructura sinforme a gran escala y a una cantidad de pliegues isoclinales estrechos propios de un ambiente de esfuerzo mayor.

3.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS ÁREAS DE “CLINKER”

Las zonas de combustión “*in situ*” del carbón se inician en superficie y se propagan a profundidad, adelgazándose en este sentido dada la ausencia de oxígeno. De esta manera los cuerpos de “*clinker*” se desarrollan en forma de cono, incrementando su espesor hacia la parte superior del depósito, ya que en dirección de la superficie es común encontrar bajo una misma zona de combustión varios mantos de carbón quemándose debido a su oxidación. Y es por esta misma razón que pueden identificarse varios cuerpos de “*clinker*” asociados a la combustión de diferentes mantos, conformando una zona o área de “*clinker*”.

De acuerdo a su ubicación se identificaron 4 zonas principales de “*clinker*” en toda el área de minería, que a su vez consisten de varios cuerpos de “*clinker*” asociados a determinados mantos (TABLA 1). Estas áreas corresponden a las zonas de los tajos 100, Patilla, Palotal 10 -Tipiala y en las NAM.

3.5.1. Zona Centro

La concentración más importante se encontró en las áreas de los tajos Palotal 10 y Tipiala. Es la secuencia de “*clinker*” más espesa de toda la mina, ya que es el resultado de la unión de varios cuerpos de “*clinker*” que inician independientemente y terminan ligándose cerca del punto de inflexión donde el rumbo NE de la estratificación cambia a E y en donde la combustión fue más intensa. Según Van der Merwe (2002) esta área de “*clinker*” se formó en el bloque techo del Cabalgamiento Ranchería, lo que demuestra el fuerte control estructural al que están sometidos estos cuerpos y comprendió la combustión de los mantos 170, 160, 155, 150, 145 y 135, además de otros de menor importancia como el 130, 125 y 120.

Hacia el extremo SW de esta zona observamos los cuerpos de “*clinker*” de los mantos 175, 170, 160, 150 y 135-130-125-120, que terminan ligándose al acercarse a la inflexión para tomar dirección E. Antes de este punto y al inicio de esta área de “*clinker*” se cartografiaron 5 cuerpos que aparecen como prolongaciones¹. El “*clinker*” del manto 160, que en su extremo S se une con el manto 155², tiene un espesor que va de 18 m en su base a 20 m en superficie, con una profundidad de penetración o extensión del cuerpo en dirección de su buzamiento de 80 m. Hacia el Norte está asociado únicamente al manto 160³, con 15 m de espesor en su base hasta 18 m cerca de la superficie, y una propagación en profundidad de 90 m. Mas al Norte su límite inferior disminuye hasta los 10 m y hacia el tope su espesor es irregular, variando de 10 a 18 m. Alcanza una profundidad de penetración que se incrementa de 80 m en el Sur a 228 m al Norte.

El “*clinker*” de los mantos 135-130-125-120¹ posee un espesor homogéneo de 50 m y una extensión en profundidad de 246 m. El del manto 150¹ tiene un espesor de 6 m en profundidad a 20 m cerca de la superficie, donde se une al “*clinker*” del manto 145. Tiene una extensión en profundidad de 190 m.

El “*clinker*” del manto 170¹ va de 8 a 14 m de espesor y profundiza hasta 120 m. El del manto 175 tiene 8 m de espesor en su base, 9 m en superficie y una extensión de 150 m en profundidad.

Hacia el punto de inflexión los cuerpos se van uniendo parcialmente y van aumentando su espesor y extensión. Se reducen a 3 cuerpos con la unión de los mantos 160-170-175 y alcanzan su máxima expresión cuando se funden

¹ Ver anexo C, Tajo Palotal 10 – Tipiala, Sección C-C´

² Ver anexo C, Tajo Palotal 10 – Tipiala, Sección A-A´

³ Ver anexo C, Tajo Palotal 10 – Tipiala, Sección B-B´

en un único cuerpo de “*clinker*” que suma a los mantos 120-125-130-135-150-160-170 y 175. Para comenzar a desmembrarse, luego del cambio de dirección del tren regional, a partir del cual aparecen cuerpos de “*clinker*” asociados de distinta manera a los mismos mantos.

El cuerpo de “*clinker*” del manto 135⁴ posee un espesor de 5 m en su base a 18 m cerca de la superficie, y se extiende 240 m en profundidad.

Los mantos 145, 150, 155 y 160 forman un cuerpo de “*clinker*”⁵ con un espesor que disminuye hacia el E de 100 a 83 m en superficie y de 65 a 28 m en su límite inferior. La extensión en profundidad se incrementa en esta dirección de 420 a 448 m. Estos fuertes cambios en el espesor se deben a que entre los 260 y los 130 m de propagación el “*clinker*” se reduce a los mantos 155 y 160.

En dirección W-E y paralelo al cuerpo principal aparece una franja de aproximadamente 1200 m de extensión en superficie asociada a la combustión del manto 75⁶. Tiene una propagación en profundidad de 146 m y de 28 m de espesor en su límite inferior a 34 m en superficie.

La zona de “*clinker*” del tajo 100⁷ se formó gracias a un plano de falla asociado a un cabalgamiento que permitió la entrada de oxígeno al sistema, alimentando la combustión en profundidad de los mantos 145 y 150 (Van der Merwe, 2002). Aflora como un cuerpo rectangular que se desarrolló a lo largo del plano de falla y siguiendo el rumbo de los mantos. En profundidad es un cuerpo en forma lenticular, que se adelgaza hacia sus extremos, estando su

⁴ Ver anexo C, Tajo Palotal 10 – Tipiala, Sección D-D’

⁵ Ver anexo C, Tajo Palotal 10 – Tipiala, Sección E-E’

⁶ Ver anexo C, Tajo Palotal 10 – Tipiala, Sección F-F’

⁷ Ver anexo C, Tajo 100, Sección A-A’

porción mas gruesa en el centro. Hacia el sur su espesor se incrementa de profundidad a superficie de 25 a 30 m. En el centro el cuerpo alcanza su máximo espesor, variando en el mismo sentido de 33 a 38 m⁸. Hacia el Norte el cuerpo se pincha mostrando su mínimo espesor, que va de 10 a 25 m⁹. Su extensión en profundidad o nivel de penetración alcanzó 300 m al Sur, disminuyendo a 225 en el Norte (FIGURAS 11 y 12).

FIGURA 11. Vista transversal de la zona de “clinker” del tajo 100, asociada a la quema de los mantos 145 – 150. La introducción de oxígeno al sistema a través de un plano de falla permitió la combustión de los manto en profundidad.



Tomado de Geology and Reserves (2000).

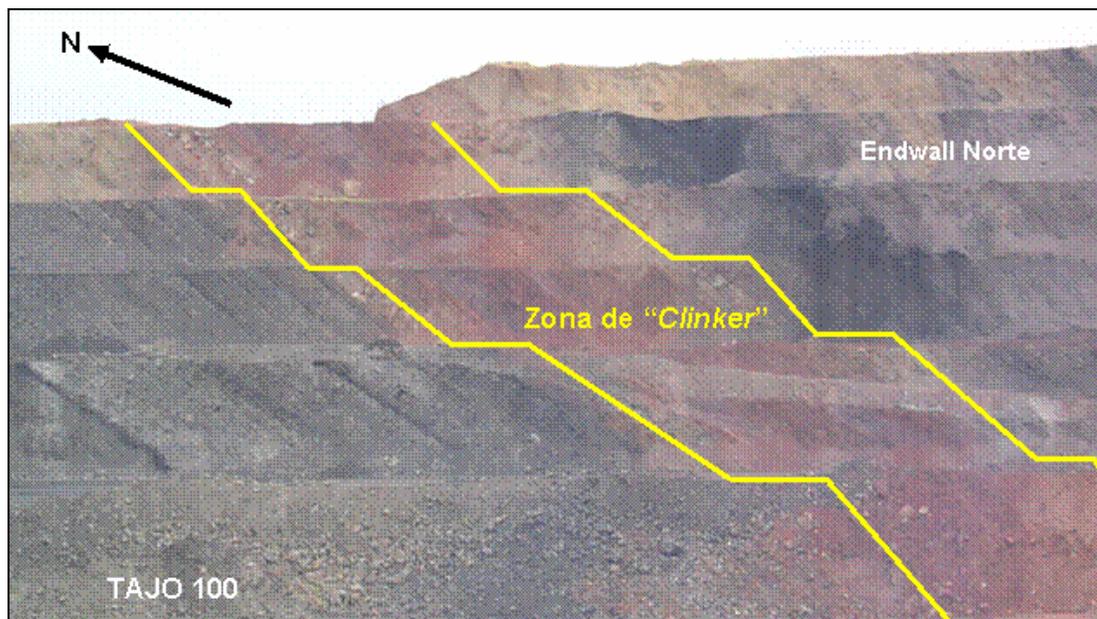
Al sur del tajo Patilla, sobre el bloque piso intensamente plegado del Cabalgamiento Ranchería, se cartografiaron 5 cuerpos de “clinker”. Los dos cuerpos mayores se formaron respectivamente por la combustión de los mantos 70, 71, 75, 80 y 81 e incluso del 83; y de los mantos 50, 55, 57, 59, 60 y en menor medida del 49, 47, 46 y 45. El mayor alcanza profundidades de penetración de 100 a 120 m, con espesores que oscilan entre los 20 y 40 m. Mas al norte, la zona de “clinker” alcanza una profundidad máxima de 50 m, lo que indica que en esta dirección el “clinker” se someriza y el espesor de

⁸ Ver anexo C, Tajo 100, Sección B-B´

⁹ Ver anexo C, Tajo 100, Sección C-C´

esta secuencia se amplía, variando de 25 a 45 m. El segundo cuerpo de “clinker” por su extensión areal esta asociado a los mantos 45-50-55-60¹⁰. Incrementa su espesor de sur a Norte de 24 a 28 m en su base y de 46 a 60 m en superficie. En esta misma dirección su propagación en profundidad disminuye de 370 a 250 m. Este cuerpo desarrolló forma lenticular, disminuyendo su espesor y extensión en profundidad hacia sus límites extremos. Los cuerpos menores alcanzan profundidades promedio de 15 m, excepcionalmente hasta 38 m y poseen un espesor de tan solo 10 m. Uno de estos cuerpos esta asociado al manto 75, tiene 12 m de espesor y una extensión en profundidad de 98 m.

FIGURA 12. Vista transversal de la misma zona de “clinker” del tajo 100, pero sobre la pared final norte.



Tomado de Geology and Reserves (2000).

¹⁰ Ver anexo C, Tajo Patilla, Secciones A-A', B-B'

3.5.2. Nuevas áreas de minería (NAM)

En la parte norte del depósito carbonífero, la cual corresponde a las nuevas áreas de minería (NAM) se identificaron 8 cuerpos de “*clinker*”, que se encuentran asociados a la quema de los mantos 170, 155, 145 y en algunos casos el 150. Al igual que en la Zona Sur, el “*clinker*” de las NAM, esta fuertemente controlado por los rasgos estructurales del sector dado el gran número de fallas y de plegamientos asociados que confluyen en los tajos Tabaco, “*Tabaco Extension*” y La Puente, que cambian la dirección de las capas de SE a NE, en un punto de inflexión al sur del Tajo Tabaco.

Estos cuerpos en general son de carácter alargado siguiendo la dirección del rumbo de los mantos, con espesores que van desde los 10m a los 50m y que varían con la profundidad.

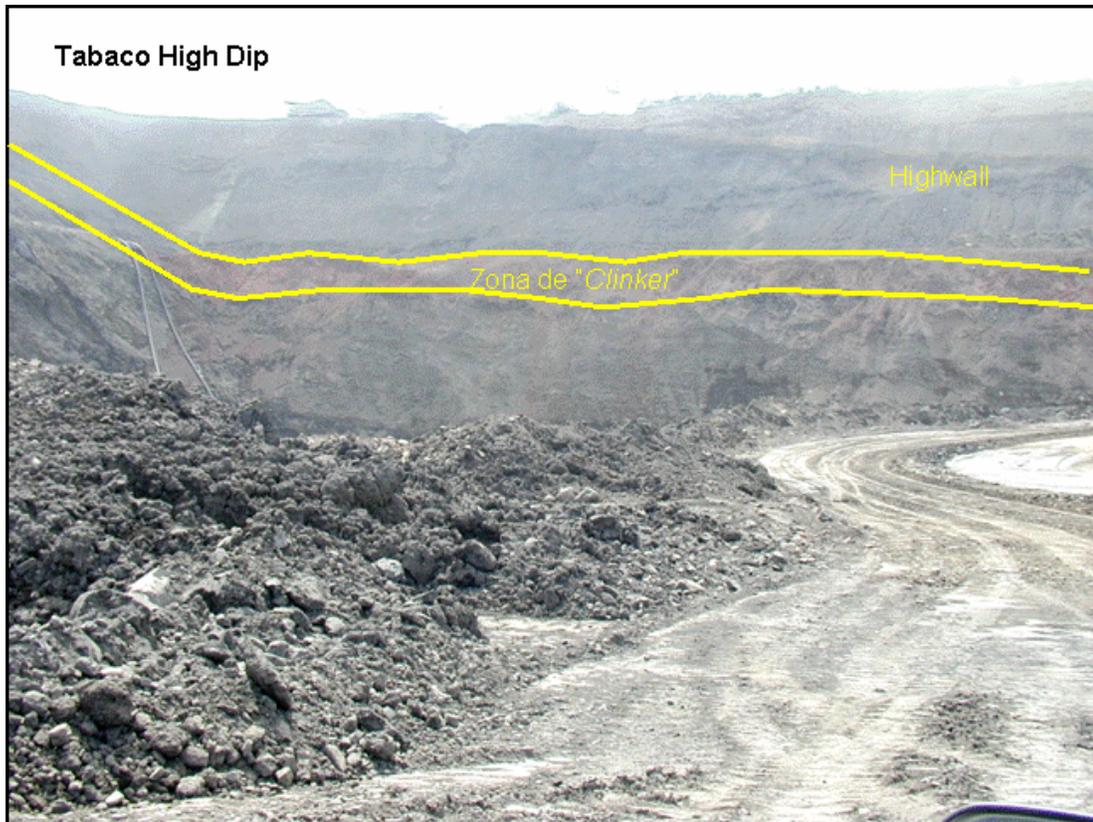
El “*clinker*” asociado al manto 170 (FIGURA 13) aparece en dos franjas, la primera se ubica en el área correspondiente al tajo “*Tabaco Extension*”, con profundidades someras, espesor de 5 a 10m y longitud en el rumbo de aproximadamente 900m. La segunda franja esta ubicada entre los tajos “*Tabaco High Dip*” y La Puente, aflora como un cuerpo rectangular de aproximadamente 1700 m de extensión en dirección del rumbo. Posee una geometría de lenticular, achatándose en sus límites. Hacia el Sur presenta su mínimo rango de espesor, incrementándose de 4 m en la base a 10 m cerca de la superficie¹¹. En la parte central tiene su máximo espesor, variando de 12 a 42 m, mientras que hacia el extremo Norte este disminuye a 17 m¹². Su nivel de penetración es muy variable, hacia el Sur alcanza hasta 275 m, en

¹¹ Ver anexo C, Tajos NAM, Sección C-C'

¹² Ver anexo C, Tajos NAM, Sección E-E'

su extremo Norte llega a 190 m mientras que hacia el centro del cuerpo se extiende a una profundidad de 440 m en el sentido del buzamiento¹³.

FIGURA 13. Vista en el rumbo de la zona de “clinker” asociada a la quema del manto 170, contigua a la FIGURA 14. Apréciase la tonalidad roja de la roca quemada, fácilmente reconocible dado el aspecto grisáceo de la estratigrafía de la región.

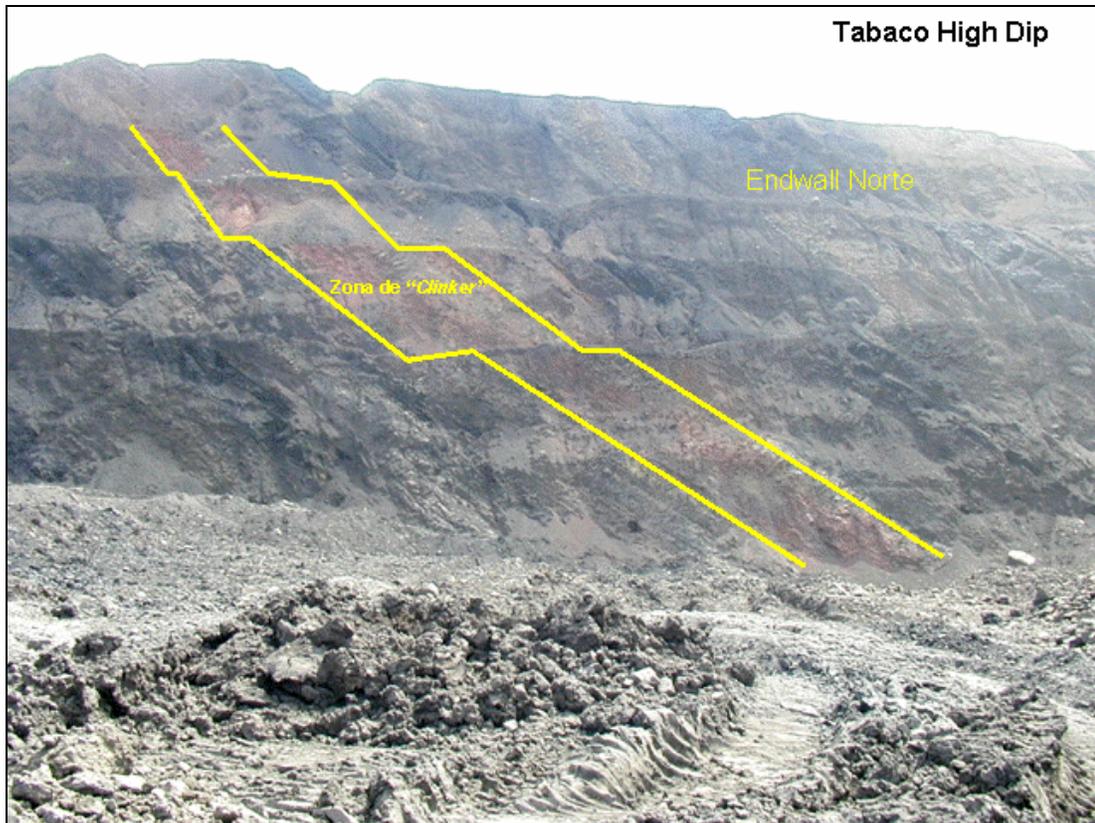


El “clinker” correspondiente al manto 155 (FIGURA 14) se observa en dos áreas, la primera corresponde a la parte Sur del tajo “*Tabaco Extension*”, aquí la longitud en profundidad llega a los 45m y los espesores varían entre 10 y 15m, en el rumbo la extensión es de 1500m aproximadamente. La segunda zona esta ubicada en el tajo “*Tabaco High Dip*” (FIGURA 15), área en la cual la longitud en profundidad alcanza los 100m y los espesores varían

¹³ Ver anexo C, Tajos NAM, Sección D-D´

desde los 12 hasta los 45m. La longitud en el rumbo es de 1200m aproximadamente.

FIGURA 14. Vista de la zona de “clinker” sobre la pared final norte del tajo “*Tabaco High Dip*”, en las NAM. Este “clinker” se encuentra asociado a la quema del manto 155.



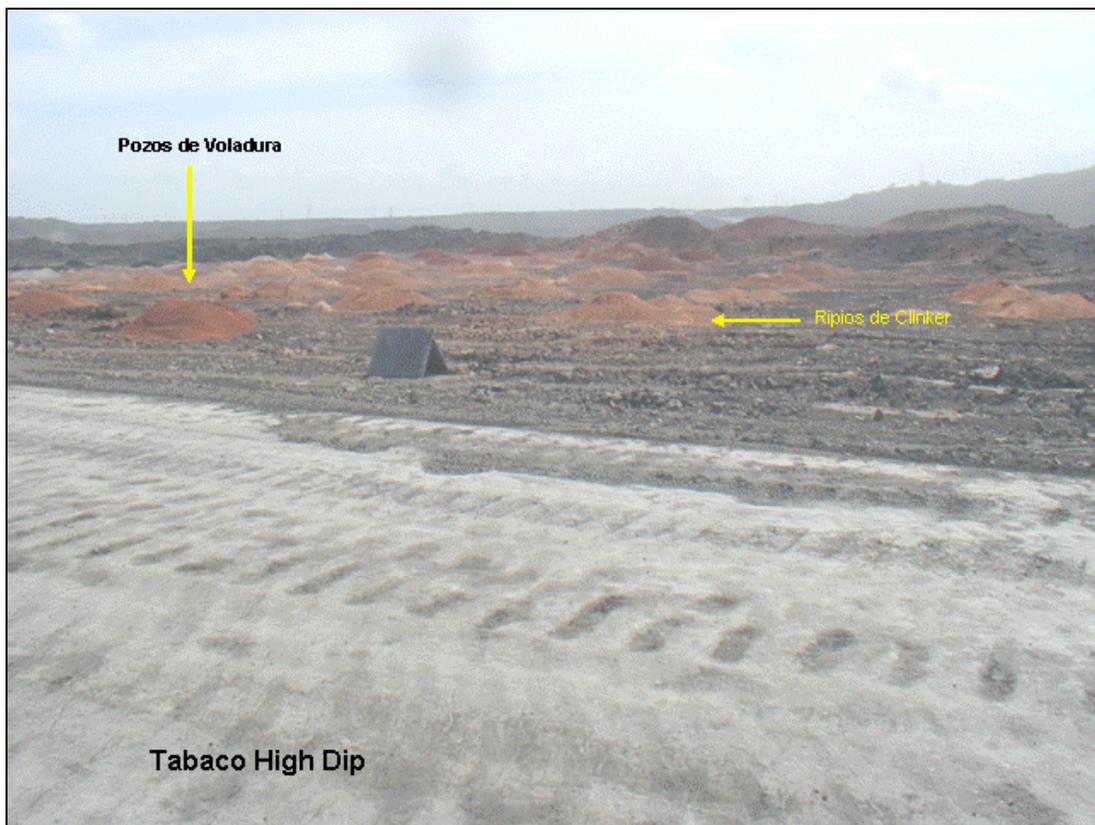
Por ultimo el “clinker” asociado a los mantos 145 y 150¹⁴ (en algunos casos) también aparece en dos sectores. El primer sector está ubicado en el tajo “*Tabaco Extension*” el cual tiene una longitud en el rumbo de 500m aproximadamente, con un espesor de 10 a 12m y una longitud en profundidad de 35m¹⁵. La segunda franja de “clinker” adelgaza hacia el Norte, disminuyendo su espesor de 20 a 13 m en su base y de 30 a 22 m

¹⁴ Ver anexo C, Tajos NAM, Secciones B-B' y C-C'

¹⁵ Ver anexo C, Tajos NAM, Secciones A-A'

cerca de la superficie. Su nivel de penetración permanece casi constante, incrementándose ligeramente de 230 a 240 m en esta misma dirección. Su extensión en el rumbo es de 1800 m aproximadamente.

FIGURA 15. Las perforaciones realizadas por los taladros sobre el talud sur del tajo “*Tabaco High Dip*”, revelan la presencia de las áreas de “*clinker*”.



En general la profundidad de penetración del “*clinker*” así como la longitud en el rumbo, depende de diferentes factores tales como el buzamiento y la composición del manto, la distribución de las fallas y la introducción de oxígeno al sistema. Estas características regulan la ubicación de las áreas de “*clinker*” y su mayor o menor incidencia dentro de un sector definido.

La TABLA 1 resume la localización de los cuerpos de “*clinker*”, los mantos de carbón asociados, los espesores en profundidad y en superficie, y la profundidad de penetración, esta última determinada en dirección del buzamiento; para todo el depósito carbonífero.

TABLA 1. Localización de los cuerpos de “clinker”, mantos de carbón asociados, espesores en profundidad y en superficie, y profundidad de penetración.

	Localización “clinker”	Manto	Espesor (en profundidad)	Espesor (en superficie)	Prof. de penetración
ZONA CENTRO	tajos Palotal 10 y Tipiala	160 al suroeste	18m	20m	80m
		160 al norte	15m	18m	90m
		160 más al norte	10m	10-18m	80m (al sur) - 228m(al norte)
	tajos Palotal 10 y Tipiala, hacia el extremo SW	135-130-125-120	50m	50m	246m
		150	6m	20m (cerca a sup.), donde se une al “clinker” del manto 145	190m
		170	8m	14m	120m
		175	8m	9m	150m
		135	5m	18m	240m
	tajos Palotal 10 y Tipiala, hacia el Este	145-150-155-160	28-65m, disminuye al este	83-100m, disminuye al este	420-448m, aumenta al este
		75	28m	34m	146m
	tajo 100	145-150 al sur	25m	30m	225-300m de sur a norte
		145-150 al centro	33m	38m	
		145-150 al norte	10m	25m	
	al sur del tajo Patilla	70-71-75-81-83	20m	40m	100-120m
		70-71-75-81-83, más al norte	25m	45m	50m
del 45 al 60		24m (al sur) - 28m (al norte)	46m (al sur) - 60m (al norte)	370m (al sur) - 250m (al norte)	
30-35		10m (prom.)	10m (prom.)	de 15m (prom.) hasta 38m (excepcionalmente)	
75		12m	12m	98m	
ZONA NORTE (NAM)	tajo “Tabaco Extension”	170	5m	10m	<45m
		170, parte sur	4m	10m (cerca a superficie)	275m
	entre los tajos “Tabaco High Dip” y La Puente	170, parte central	12m	42m	440m
		170, parte norte	17m	17m	190m
	parte sur del tajo “Tabaco Extension”	155	10m	15m	45m
	tajo “Tabaco High Dip”	155	12m	45m	100m
	tajo “Tabaco Extension”	145 y 150	10m	12m	35m
tajo “Tabaco High Dip”	145 y 150	13-20m, disminuyendo hacia el norte	22-30m, disminuyendo hacia el norte	230-240m, aumentando hacia el norte	

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. COMPARACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA OBTENIDA EN EL PRESENTE INFORME CON LOS TRABAJOS PREVIOS

Los primeros trabajos de cartografía geológica de las áreas de “*clinker*” fueron realizados en la Zona Centro del Cerrejón, utilizando métodos geofísicos que aprovechando la susceptibilidad magnética remanente generada alrededor de las áreas de combustión permitió el modelamiento en superficie y en profundidad de las zonas de “*clinker*”. Originalmente se modelaron trece zonas magnéticas (Davidson & Lowe, 2000), localizadas entre los tajos Oreganal, 100 y Palotal 10 – Tipiala (FIGURA 16). Smith (2000) identificó 28 cuerpos de “*clinker*” a partir de estas zonas magnéticas y de los pozos exploratorios, parece ser que estos cuerpos corresponden a cada uno de los mantos que debido a su combustión produjeron “*clinker*” (FIGURA 17). Van der Merwe (2002) define lineamientos a partir de los dominios magnéticos identificados previamente por el Servicio Geofísico Aéreo, aunque no limita cuerpos o áreas de este material (FIGURA 18).

En la cartografía realizada en el presente trabajo se observan algunos cambios con relación a aquella llevada a cabo en trabajos anteriores (P. Ej., Davidson & Lowe, 2000; Smith, 2000; Trofimczyc; 2001; Van der Merwe; 2002), en particular con Cerrejón Zona Centro, ya que difiere en aspectos fundamentales y de detalle como la verdadera extensión de los cuerpos de “*clinker*”, al definir sus parámetros físicos como espesor y extensión en profundidad y al señalar cuales son los mantos que incidieron en la formación de estas zonas. Según los autores arriba mencionados, la principal zona de

“*clinker*” para el Cerrejón Zona Centro es un único cuerpo continuo, el cual se extiende en dirección NE-E desde el Tajo 100 hasta los tajos Palotal 10 y Tipiala. Este cuerpo, según Davidson y Lowe (2000), correspondería a la zona magnética 2 de su modelo (FIGURA 16). Según el Summary Report (2000), esta zona se encuentra distribuida uniformemente y sin discontinuidades en superficie (FIGURA 19), aunque se coincide en señalar que sus límites deberían precisarse a través de un control estratigráfico-estructural durante una cartografía como la llevada a cabo en el presente trabajo, la cual incluye no solo Cerrejón Zona Centro sino también las Nuevas Áreas de Minería, en donde no se han reportado datos al respecto en estudios previos; lo que representa un nuevo aporte al conocimiento de la geología del área de estudio (FIGURA 21).

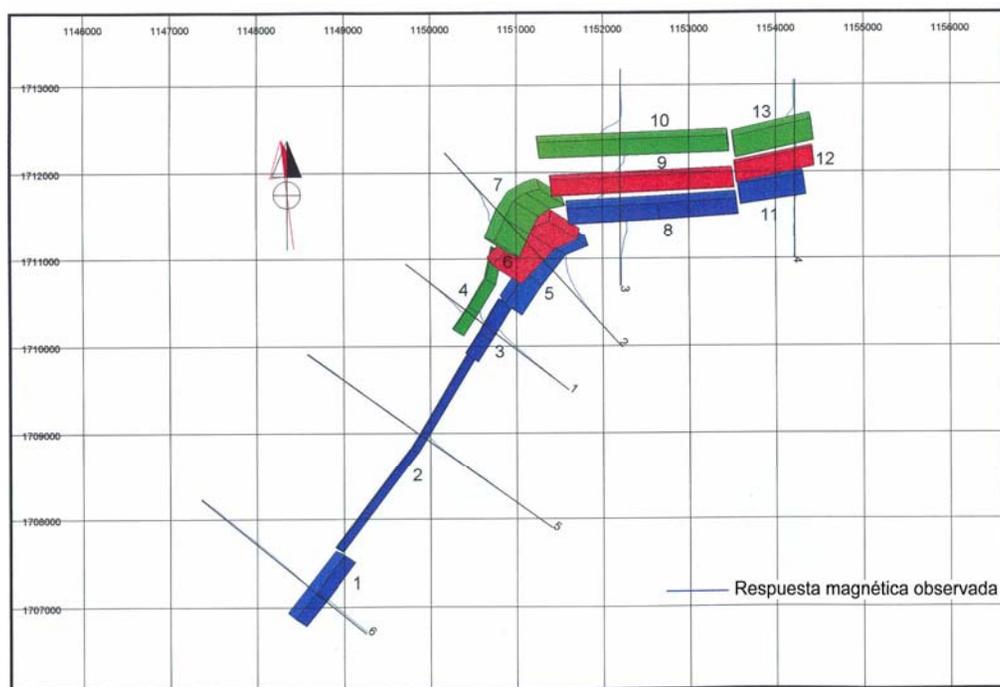
En el presente estudio se concluye que el “*clinker*” existente entre los tajos 100 y Palotal 10 – Tipiala no es una única zona continua, ya que de acuerdo a la evidencia de campo, el “*clinker*” correspondiente a la zona magnética 2 de Davidson y Lowe (2000) tiene una menor expresión areal a la propuesta por estos autores y no se extiende hasta el tajo 100. De la misma forma, la zona de “*clinker*” de los tajos Palotal 10 – Tipiala no corresponde a un cuerpo de la magnitud descrita anteriormente, sino que representa varios cuerpos menores a manera de prolongaciones que terminan ligándose hacia el centro del cuerpo principal (FIGURA 20).

Por otra parte, Summary Report (2000) y Smith (2000) modelan dos cuerpos de “*clinker*” al Sur del Tajo 100 y del Tajo Oreganal 1, respectivamente (FIGURAS 17 y 19). Smith (2000) modeló este último cuerpo a pesar de la ausencia de respuesta magnética y a que Davidson & Lowe (2000) no la registraron. El Summary Report (2000), cartografía estos mismos dos cuerpos de “*clinker*”. No obstante, pensamos que estos cuerpos de “*clinker*”

no existen. De igual forma, Van der Merwe (2002) interpretó muchos lineamientos magnéticos, aunque de acuerdo a los datos de campo y de registros de pozo no se podrían definir como “*clinker*” (FIGURA 18).

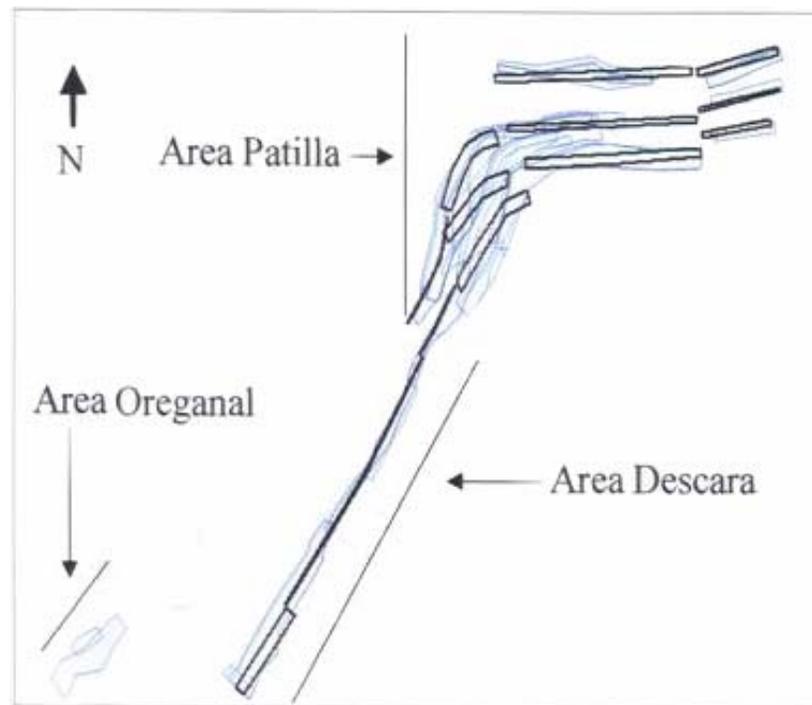
Según el Summary Report (2000) y el Geology and Reserves (2000), en Cerrejón Zona Centro los cuerpos de “*clinker*” presentan un espesor de 5 a 20m y una extensión en profundidad de 12 a 140m, pero de acuerdo a la evidencia de campo, estos cuerpos presentan espesores que oscilan entre 5 y 65 m hacia la base, de 9 a 100 m en superficie y con una extensión en profundidad que va de 80 a 448 m. El desarrollo de cuerpos más gruesos y con una mayor extensión en profundidad se debe a la combustión de varios mantos de carbón. Estas diferencias no eran de extrañar, considerando que Smith (2000) y Trofimczyc (2001) señalan que el método aeromagnético no es suficiente, ya que a pesar de brindar buena información no ofrece el grado de detalle y de confiabilidad, debido a que este método no es muy sensible para la determinación del límite inferior del cuerpo magnético, de su extensión en profundidad y del buzamiento del mismo, y no define con exactitud los parámetros geométricos del cuerpo así como su expresión superficial, por lo cual se debe complementar con estudios sísmicos, un trabajo de campo que incluya un control estratigráfico-estructural e información obtenida de los registros de pozo y de las muestras obtenidas de ripios y corazones.

FIGURA 16. Modelo Geofísico Simplificado de las 13 zonas magnéticas o "clinker" de Davidson & Lowe (2000).



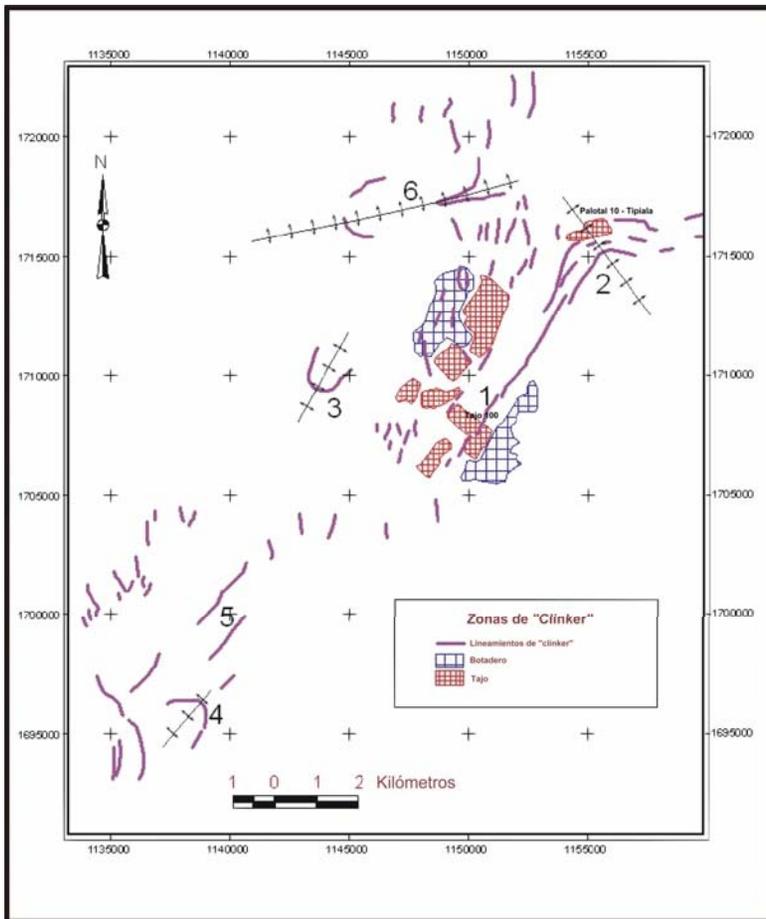
Tomado de Davidson & Lowe (2000).

FIGURA 17. Plano mostrando las 13 zonas magnéticas (en negro) y los 28 cuerpos de "clinker" (en azul), identificados entre los tajos Oreganal, 100 y Palotal – Tipiala, en el área Patilla.



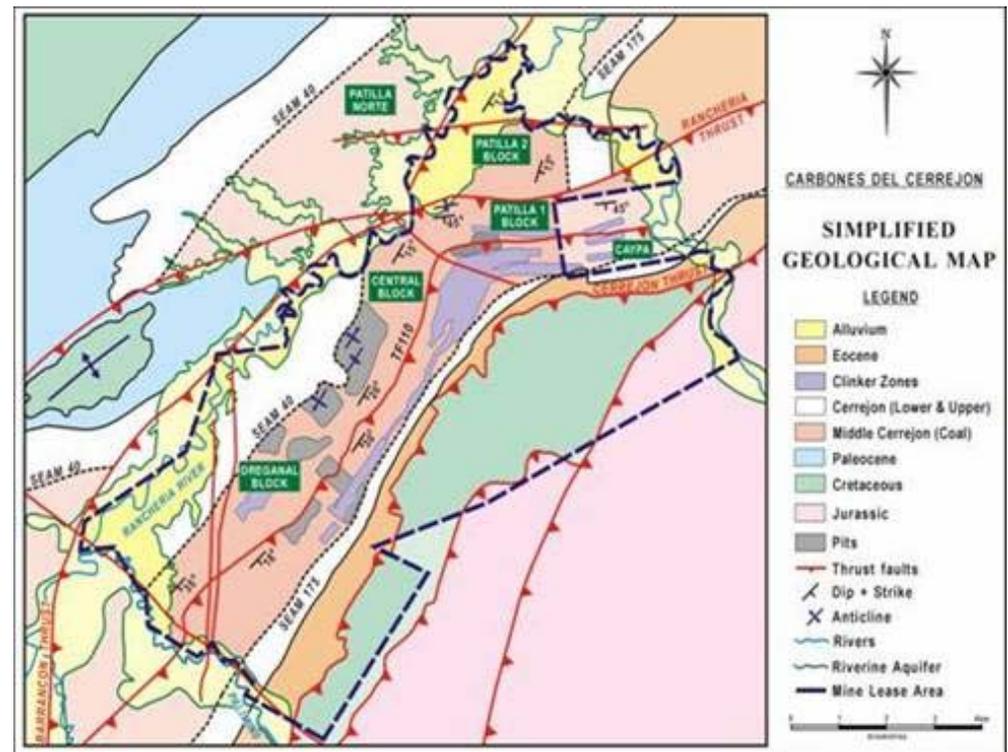
Tomado de Smith (2000).

FIGURA 18. Lineamientos y localidades de "clinker" en el Cerrejón Zona Centro, según Van der Merwe (2002). Con excepción de las localidades 1 y 2, las demás localidades no pudieron ser confirmadas en campo.



Modificado de Van der Merwe (2002).

FIGURA 19. Mapa geológico simplificado del Cerrejón Zona Centro. Las zonas de "clinker" aparecen en color lila.



Tomado de Summary Report (2000).

FIGURA 20. Distribución de las áreas de “clinker” (color magenta) en la Zona Centro. A diferencia de los trabajos anteriores el “clinker” del tajo Palotal 10 – Tipiala no se extiende hasta el tajo 100 y aparecen nuevos cuerpos al sur del tajo Patilla.

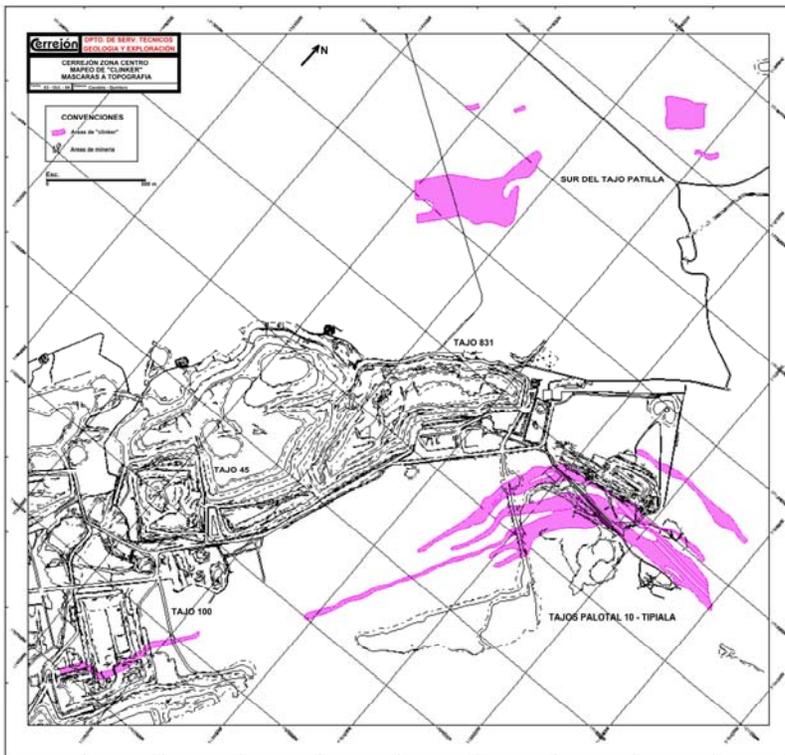
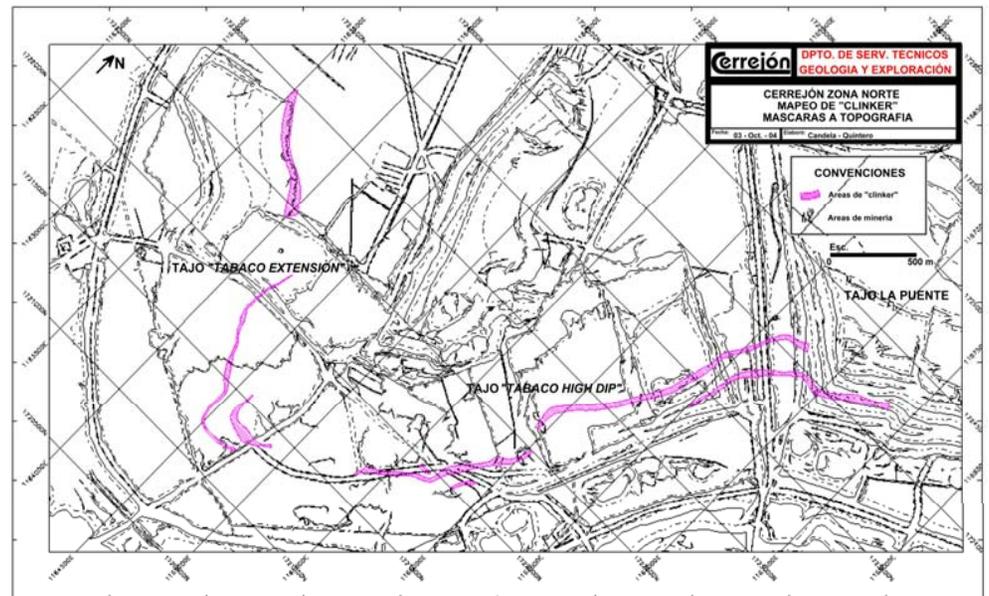


FIGURA 21. Distribución de las áreas de “clinker” (color magenta) en las NAM o Zona Norte.



4.2. POSIBLES CAUSAS DE LA COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA DE LOS CARBONES DE LA FORMACIÓN CERREJÓN

Según Kim (1977, en Lyman y Volkmer, 2001) y Lyman y Volkmer (2001) la combustión espontánea “*in situ*” ocurre en carbones bituminosos a subbituminosos por el incremento de humedad durante su oxidación. También está favorecida por el incremento del flujo de aire, de la temperatura y de la concentración de sulfuros, por la disminución del tamaño de las partículas, por factores geológicos y por las prácticas mineras. El contenido de sulfuros en forma de pirita o de marcasita y la concentración de humedad deben estar presentes en cantidades mayores al 2 y 3% respectivamente para tener un efecto significativo durante el autocalentamiento del carbón.

Los carbones del Cerrejón son carbones principalmente bituminosos ricos en materia volátil (32-34%) y con bajas concentraciones de ceniza (11-12%) y sulfuros (0.4-0.7%) y un porcentaje de humedad de 5.6 a 8.5%; localizados dentro de un depósito estructuralmente complejo limitado en un sistema duplex formado en el cinturón de Cabalgamiento Cerrejón – Ranchería y constituido por una serie de imbricaciones y de fallas transversales que mantienen un intercambio de fluidos ricos en oxígeno que alimentan a la secuencia en profundidad. De la misma manera estos carbones han sido levantados naturalmente durante las sucesivas etapas de la orogenia Andina y expuestos artificialmente en superficie para su extracción por la operación minera desarrollada a cielo abierto, facilitando su oxidación dada su exposición a condiciones subaéreas.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, podemos señalar que la concentración de sulfuros en los carbones del Cerrejón no juegan un papel importante en la combustión natural. Son definitivas su concentración de

humedad y las condiciones geológicas que dominan estructuralmente al depósito y que mantienen un intercambio de fluidos en toda la secuencia sedimentaria a través de las discontinuidades tectónicas, permitiendo la oxidación del carbón a profundidad. A todo esto debe añadirse que las prácticas mineras de extracción del mineral facilitan su autocalentamiento y posterior combustión natural.

5. CONCLUSIONES

- Los cuerpos de “*clinker*” en el Cerrejón están asociados a zonas de elevada complejidad estructural, principalmente junto a fallas de cabalgamiento, ya que las discontinuidades tectónicas permiten la alimentación de oxígeno a profundidad. Facilitando la oxidación y posterior autocalentamiento del carbón.
- Se identificaron 16 zonas de “*clinker*” concentradas en 4 áreas así: 8 zonas en las NAM, 5 al sur del tajo Patilla, una en el tajo 100, y 2 entre los tajos Palotal 10 – Tipiala, en donde destaca el área de “*clinker*” mas grande del deposito carbonífero.
- En el área de los tajos Palotal 10 – Tipiala, la zona de “*clinker*” está constituida por cuatro cuerpos asociados respectivamente a la quema de los mantos 170, 161-160-155, 150-145 y 135-130-125. Para el tajo 100 con la combustión de los mantos 145 – 150. Al sur del tajo Patilla existen cinco cuerpos originados durante la quema de los mantos 80-75-71-70, 60-59-57-55-50 y 49-47-46-45. En las NAM se identificaron ocho cuerpos de “*clinker*” producto de la quema de los mantos 170, 155, 150 y 145.
- En los tajos Palotal 10 – Tipiala el “*clinker*” tiene un espesor en profundidad que oscila de 5 a 65 m, en superficie de 9 a 100 m y una extensión en el sentido del buzamiento de 80 a 448 m. Esta es la principal concentración de “*clinker*” en toda el área de minería del Cerrejón.
- El “*clinker*” de tajo 100, posee un espesor en superficie de 25 a 38 m y en su base de 10 a 33 m. Su extensión en profundidad varía de 225 a 300 m en dirección S-N.

- Al sur del tajo Patilla, los cuerpos presentan espesores que van de 10 a 28 m en su base, de 10 a 60 m en superficie y alcanzan de 15 a 370 m de propagación en el sentido del buzamiento.
- En la NAM, el “*clinker*” tiene un espesor en la base que se incrementa de 4 a 20 m, en superficie de 10 a 45 m y una propagación en profundidad de 35 a 440 m.
- El “*clinker*” de los tajos Palotal 10 – Tipiala presenta una expresión areal o en superficie diferente a la propuesta en los trabajos previos y no se extiende hasta el tajo 100. de la misma manera se cartografiaron nuevos cuerpos de “*clinker*” localizados al sur del tajo Patilla y se desarrollo la primera cartografía geológica de esta roca en las NAM o Cerrejón Zona Norte.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar una investigación que permita determinar cuales son las causas para que solo determinados mantos de carbón de la Formación Cerrejón estén asociados a los fenómenos de autocombustión y a las áreas de “*clinker*” y así poder tomar las medidas que permitan mitigar esta situación.
- Desarrollar un análisis petrográfico sobre muestras representativas de “*clinker*” con el propósito de caracterizarlas estructural, textural y mineralógicamente y así conocer los cambios de la roca quemada de acuerdo a su posición en el cuerpo de “*clinker*” y a su cercanía al área de quema, para poder llegar a definir las zonas de alteración por combustión.
- Llevar a cabo una datación sobre zircones detríticos de muestras de “*clinker*” o implementando modernas técnicas por trazas de fisión, con el propósito de determinar la edad de la combustión, tal como lo hicieron Heffern y otros (1983) en Powder River Basin.
- Utilizar las propiedades magnéticas del “*clinker*” para determinar las variaciones en el registro del campo geomagnético de la zona, aprovechando que estas rocas son de alta fidelidad paleomagnética.

BIBLIOGRAFÍA

Arboleda O., C. (1987). Carbón. Recursos minerales de Colombia, Tomo II. 2da. Edición. Púb. Geol. Esp. INGEOMINAS, No. 1. Bogota, Colombia, 565 Págs.

Balachandran, K. (1987). The seismic problem in clinker areas. Kalamazoo Valley Community College. En: <http://puma.kvcc.edu/kbalachandran/SEISMIC%20PAPERS/Seismic%20Noise%20in%20Clinkers/CLINKER.html>.

Compton, R.R. (1962). Manual of Field Geology. Ed. Jhon Wiley and Sons Inc. USA, 378 Págs.

Cygankiewics, J. (1998). Effect of temperature and sort of coal on the quantity and composition of gases released during process of spontaneous heating (abstract). En http://www.geofuel.lviv.net/Journal/v4_1998e.htm

Davidson, G., y Lowe, S. (2000). Magnetic Modeling of Clinker Zones at Carbones del Cerrejón, Colombia. Geology and Reserves, Volume 10: Geophysics. Separata Feasibility Study, Expansion to 9 MTPA.

de Boer, C.B., Dekkers, M.J. y van Hoof, T.A.M. (2001). Rock-magnetic properties of TRM carrying baked and molten rocks straddling burnt coal seams. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 126, pp. 93–108. En www.elsevier.com/locate/pepi.

de Porta, J. (1974). Léxico estratigráfico internacional, Colombia. Union

internationale des sciences géologiques, Vol. V, Fascículo 4b. Paris. 621 Págs.

DOE/EH-0320 (1993). The fire below: spontaneous combustion in coal. Environment Safety and Health Bulletin, No. 93-4. U.S. Department of Energy, Washington, DC.

Duran R., R. y Arboleda O., C.A. (1990). Coal zones of Colombia. En: Ericksen, G.E. Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources. Houston, U.S.A. 452 Págs.

Duran R., R. y Otros (1981). Evaluación de reservas de carbón en siete zonas de Colombia. Públ. Geol. Esp. INGEOMINAS, No. 6. Bogota, Colombia, 134 Págs.

Eichhubl, P., Lore, J. y Aydin, A. (1999). Natural Combustion Alteration of Siliceous Shale, Central California-Analog to Fire Flooding?. Geological and Environmental Sciences, Stanford University, Stanford (USA) En: <http://pangea.stanford.edu/~eichhubl/Pages/AAPG99.html>

Geology and Reserves: Technical Support Document. (2000). Carbones del Cerrejón Feasibility Study, Expansion to 9 MTPA. Colombia, 217 Págs.

Gregerová, M. (?). Technolithology. Department of Mineralogy, Masaryk University. Republica Checa. En <http://petrol.sci.muni.cz/english/Technolithology/Technolithology-intro.htm>

Guyaguler, T., Karpuz, C. y Bagci, S. (2003). The spontaneous combustion characteristics of Turkish lignite and correlation of the self-heating process with the actual fire. CIM Bulletin, Vol.96, Iss. 1070; Canadá, 75 Págs.

Heffern, E.L., Coates, D.A., y Naeser, C.W. (1983). Distribution and age of clinker in northern Powder River basin, Montana. AAPG Bulletin No. 67, Vol. 8. Tulsa, USA. 1342 Págs.

IAGA (2004). Contributions in Geomagnetism and Aeronomy. Report of the Romanian IAGA section (1999 – 2003). National Report on Geodetic and Geophysical Activities in Romania. Bucarest (Rumania), 14 Págs.

Julivert, M. (1968). Léxico estratigráfico internacional, Colombia. Union internationale des sciences géologiques, Vol. V, Fascículo 4a. Paris. 574 Págs.

Lyman, R. y Volkmer, J. (2001). Pyrophoricity (spontaneous combustion) of Powder River Basin coals—considerations for coalbed methane development. En <http://www.wsgs.uwyo.edu/Coal/CR01-1.pdf>, 12 Págs.

Reiners, P.W. y Heffern, E.L. (2002). Pleistocene exhumation rates of Wyoming intermontane basins from (U-Th)/He dating of clinker. Denver Annual Meeting GSA, Paper No. 144-4. Denver (USA). En: http://gsa.confex.com/gsa/2002AM/finalprogram/abstract_43083.htm.

Roberts, J.L. (1989). Geological Structures. The Macmillan Press. Spain, 250 Págs.

Smith, M. (2000). Geological Report – Clinker Zones. Carbones del Cerrejón, Feasibility Study, Volume 3: Geology and Reserves. Colombia, 24 Págs.

Summary Report. (2000). Carbones del Cerrejón Feasibility Study, Expansion to 9 MTPA, Section 5. Colombia, 70 Págs.

Trofimczyc, K.K. (2001). Borehole geophysical review – Carbones del Cerrejón, Feasibility Study, Volume 1. Colombia, 223 Págs.

Van der Merwe, S. (1999). Geotectonic Development of a Sedimentation in the Northwestern part of South American During the Mesozoic and Cenozoic. Carbones del Cerrejón, Feasibility Study, Volume 3: Geology and Reserves - Geology. Colombia, 18 Págs.

----- (2002). Structural Development of the Cerrejón Coal Deposit: a Discussion of the Style of Deformation and a Catalogue of Observations. Informe Interno: Carbones del Cerrejón LLC. Colombia, 43 Págs.

Walker, S. (1999). Uncontrolled fires in coal and coal wastes (Abstract). En: www.caer.uky.edu/iea/ieaccc16.shtml.

ENLACES

www.mining-technology.com/projects/greenhills/greenhills5.html.

http://www.geology.yale.edu/~reiners/GSA2002clinker101402_files/frame.htm

Cerrejón



ANEXOS

Cerrejón

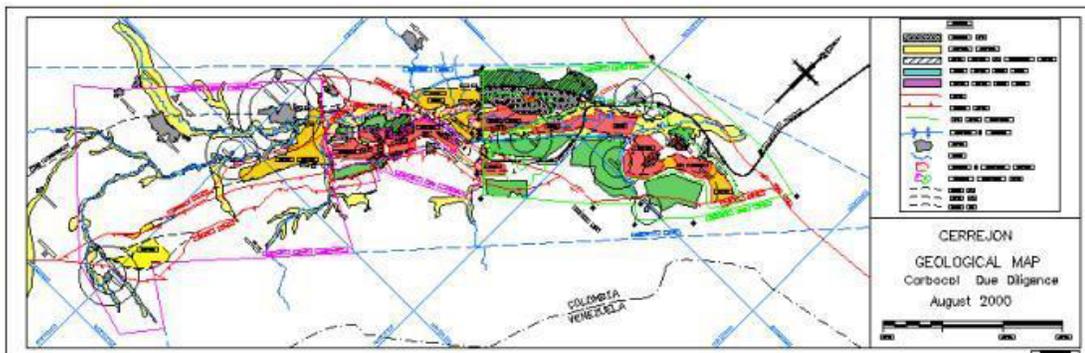


ANEXO A

MAPA GENERAL

OPERACIÓN MINERA DEL

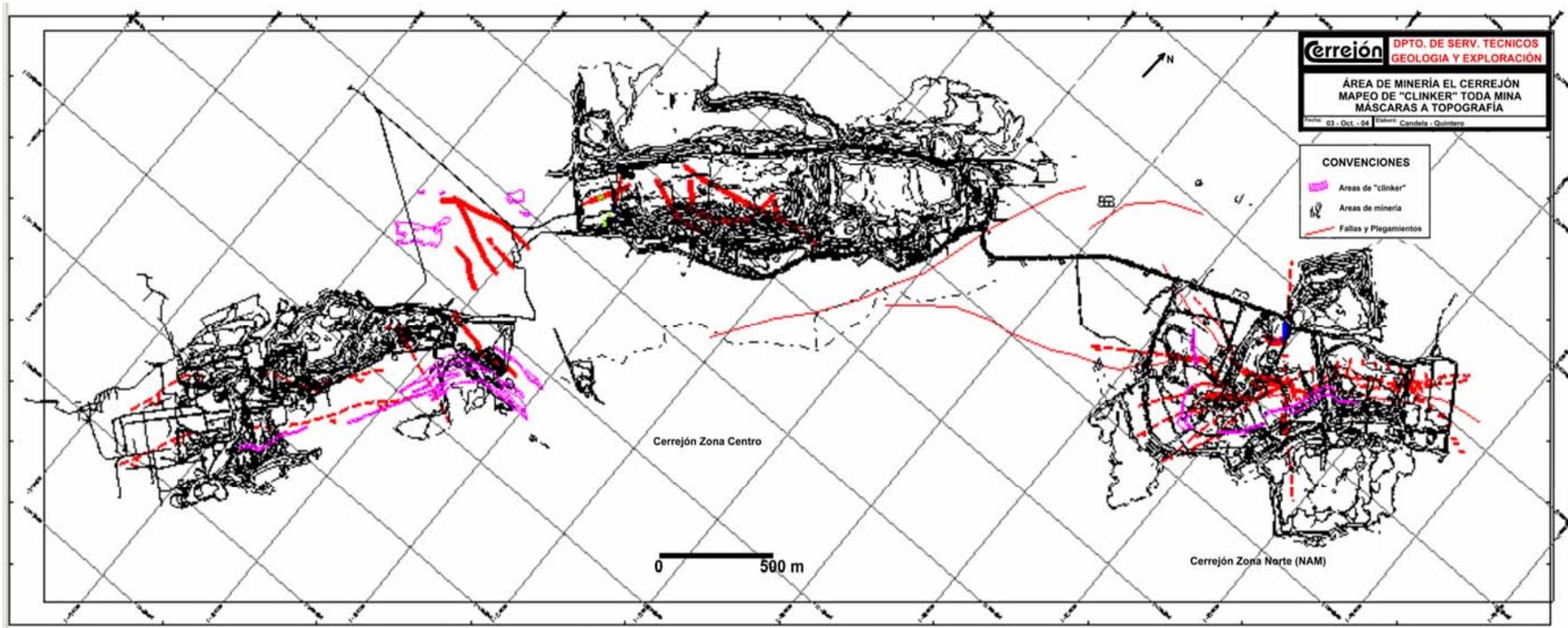
CERREJÓN



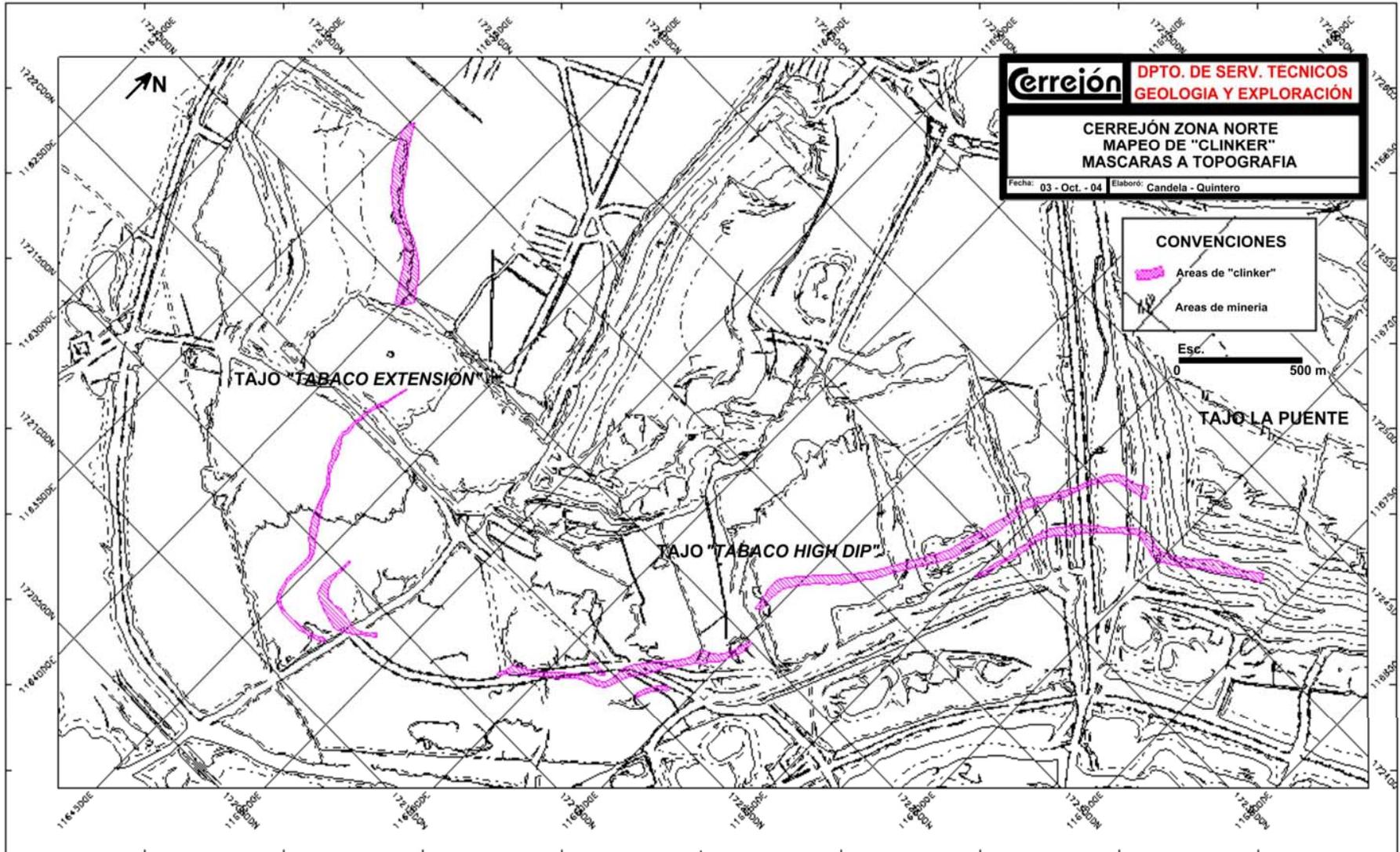
Cerrejón



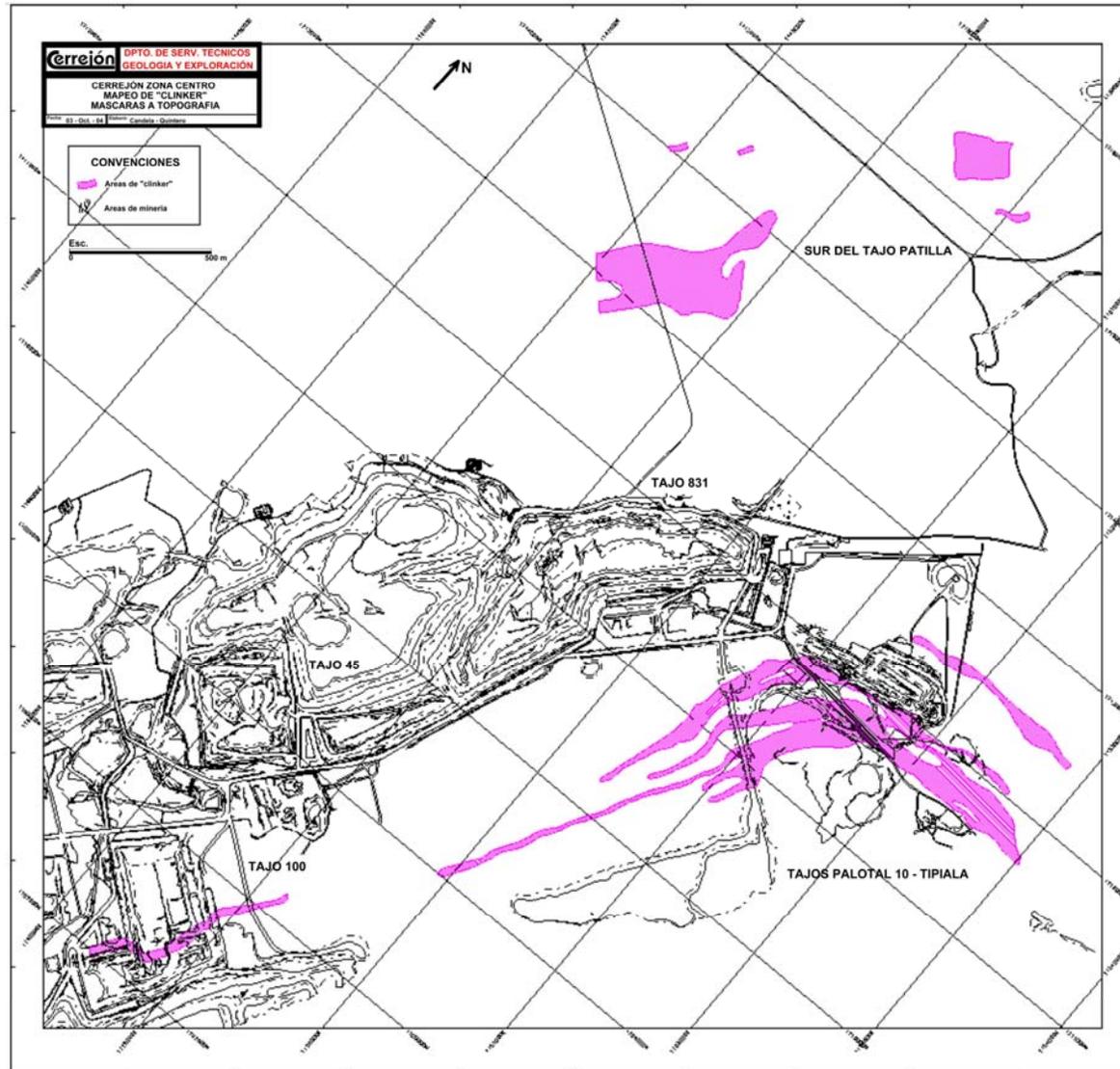
ANEXO B
CARTOGRAFÍA DE LAS
ÁREAS DE “*CLINKER*”



DISTRIBUCION DEL "CLINKER" EN EL CERREJON ZONA NORTE (NAM)



DISTRIBUCION DEL "CLINKER" EN EL CERREJON ZONA CENTRO



Cerrejón



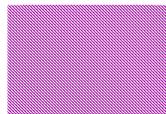
ANEXO C

SECCIONES GEOLÓGICAS TRANSVERSALES POR TAJO

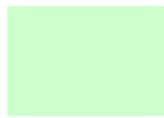
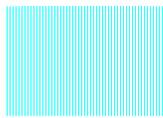
NAM	TAJO	SECCIÓN
		A - A´ B - B´ C - C´ D - D´ E - E´
	PALOTAL 10 – TIPIALA	A - A´ B - B´ C - C´ D - D´ E - E´ F - F´
100		A - A´ B - B´ C - C´
PATILLA		A - A´ B - B´

CARTA DE CONVENCIONES

SECCIONES GEOLÓGICAS



Zona de “*Clinker*”



Mantos de Carbón (El color varia de acuerdo a cada manto)

190 A.D

Elevación en metros

-10 B.D

Profundidad en metros

PROD151A

Nombre del Pozo

A

A'

Nombre de la Sección



Intervalo de Arenisca en pozo

75



Numero de Manto e Intervalo de Carbón en pozo

Cerrejón

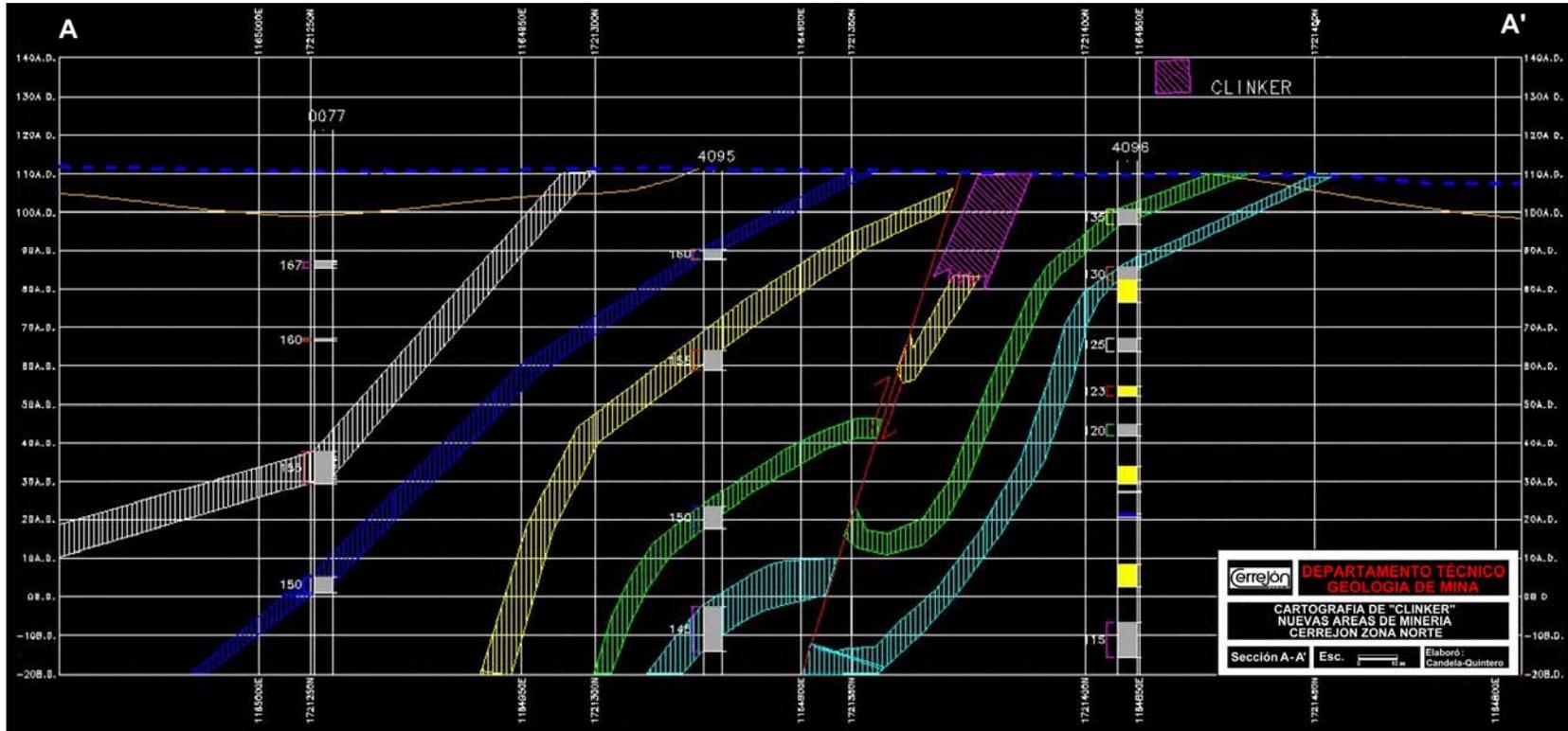


ANEXO C - NAM

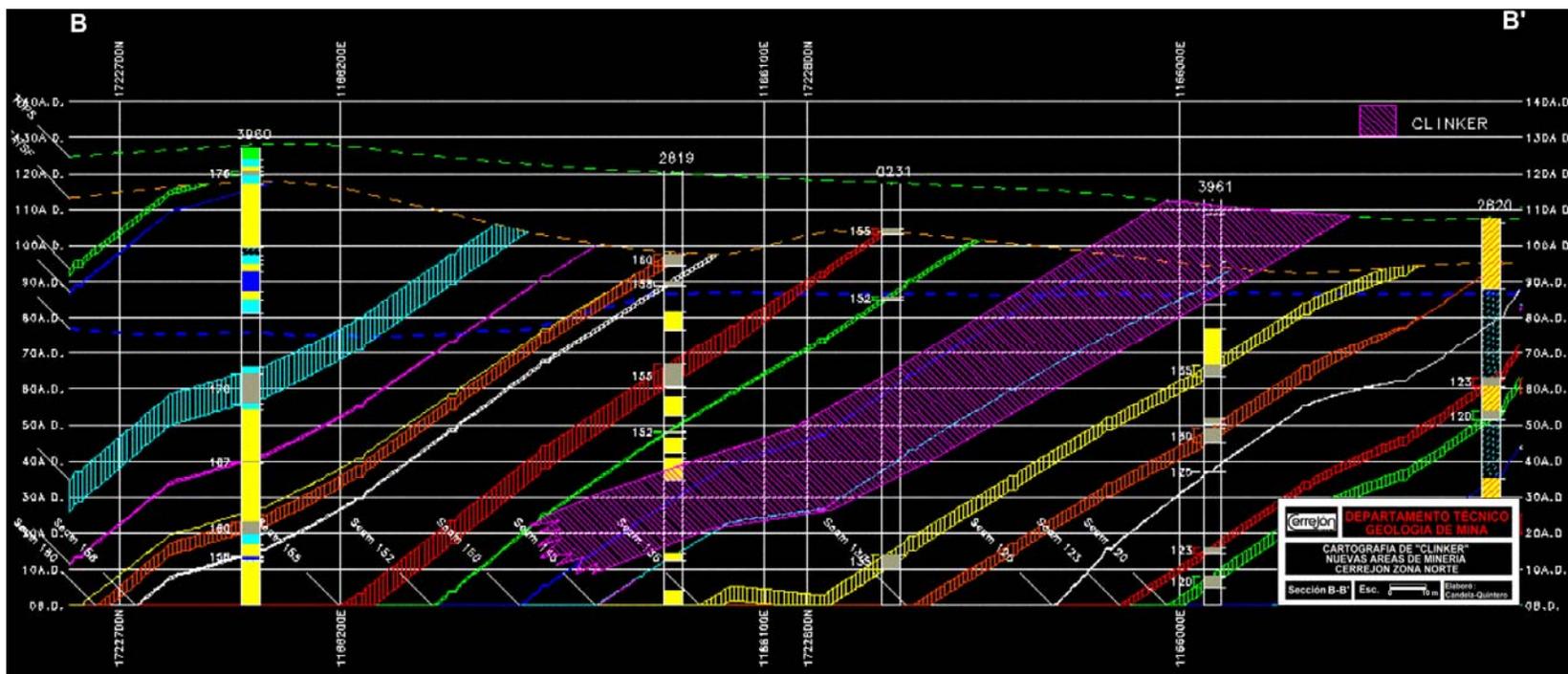
	TAJO	SECCIÓN
NAM		A - A´ B - B´ C - C´ D - D´ E - E´

SECCIONES GEOLÓGICAS TAJOS NAM

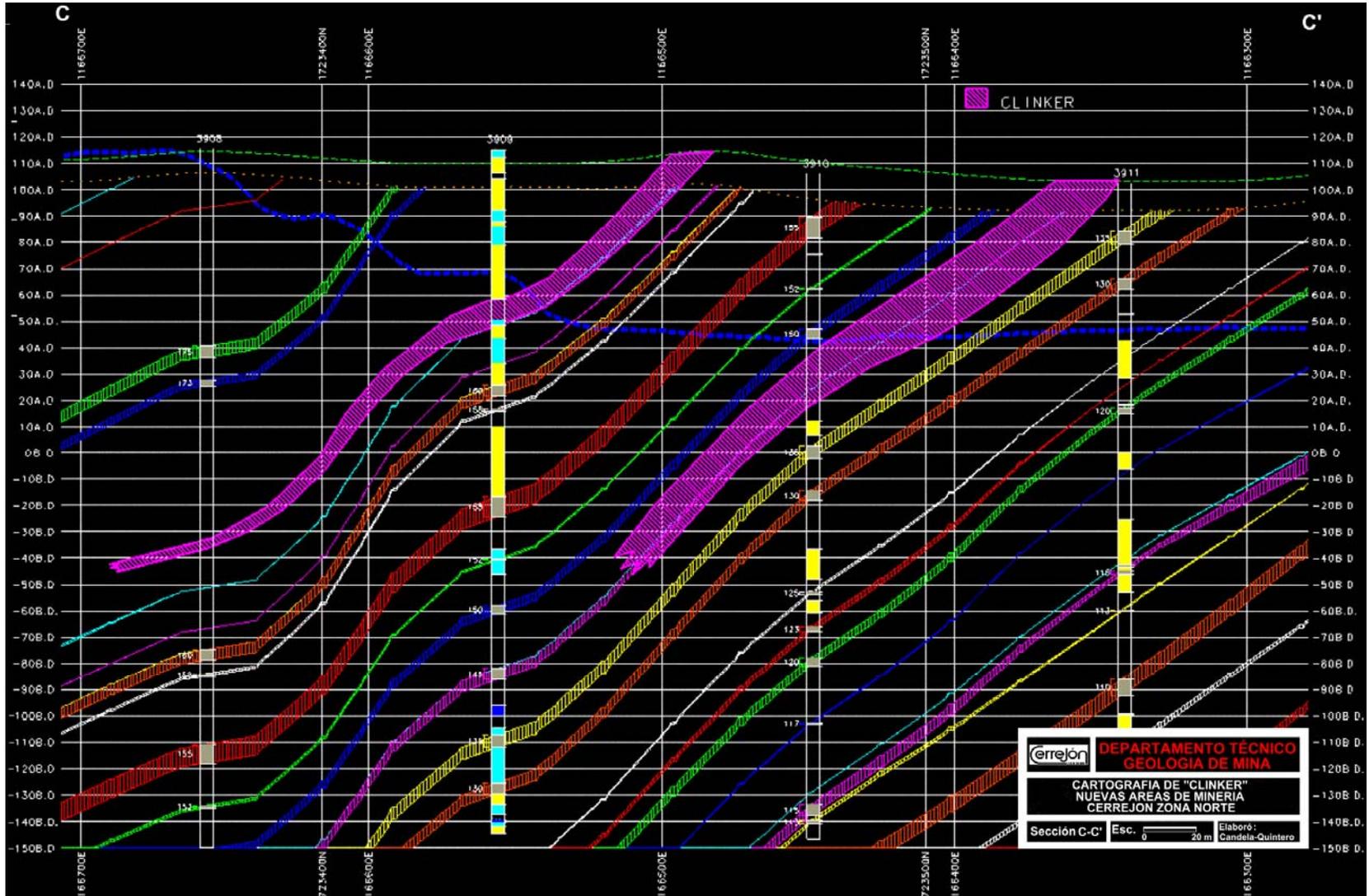
Sección A-A'



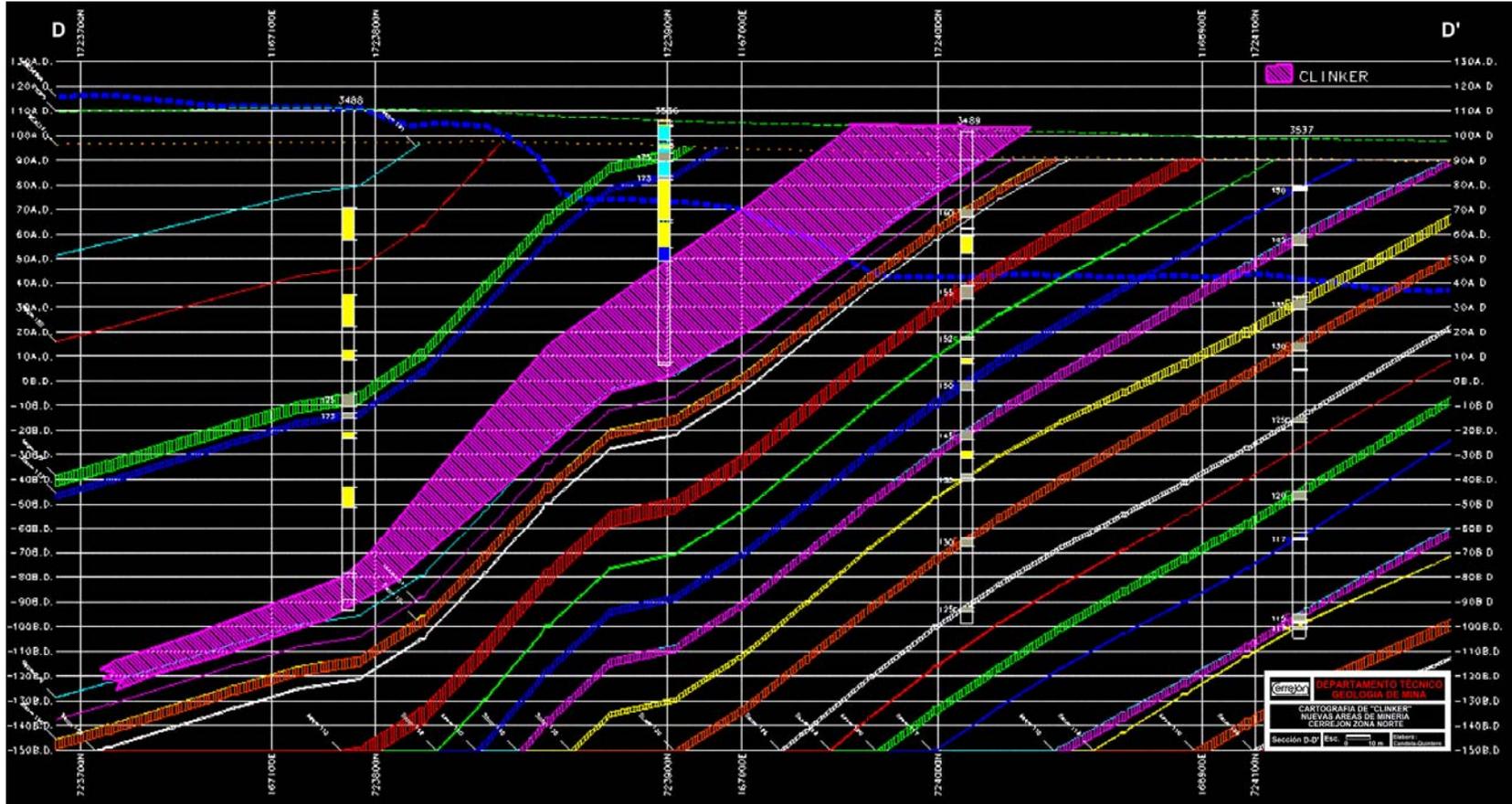
Sección B-B'



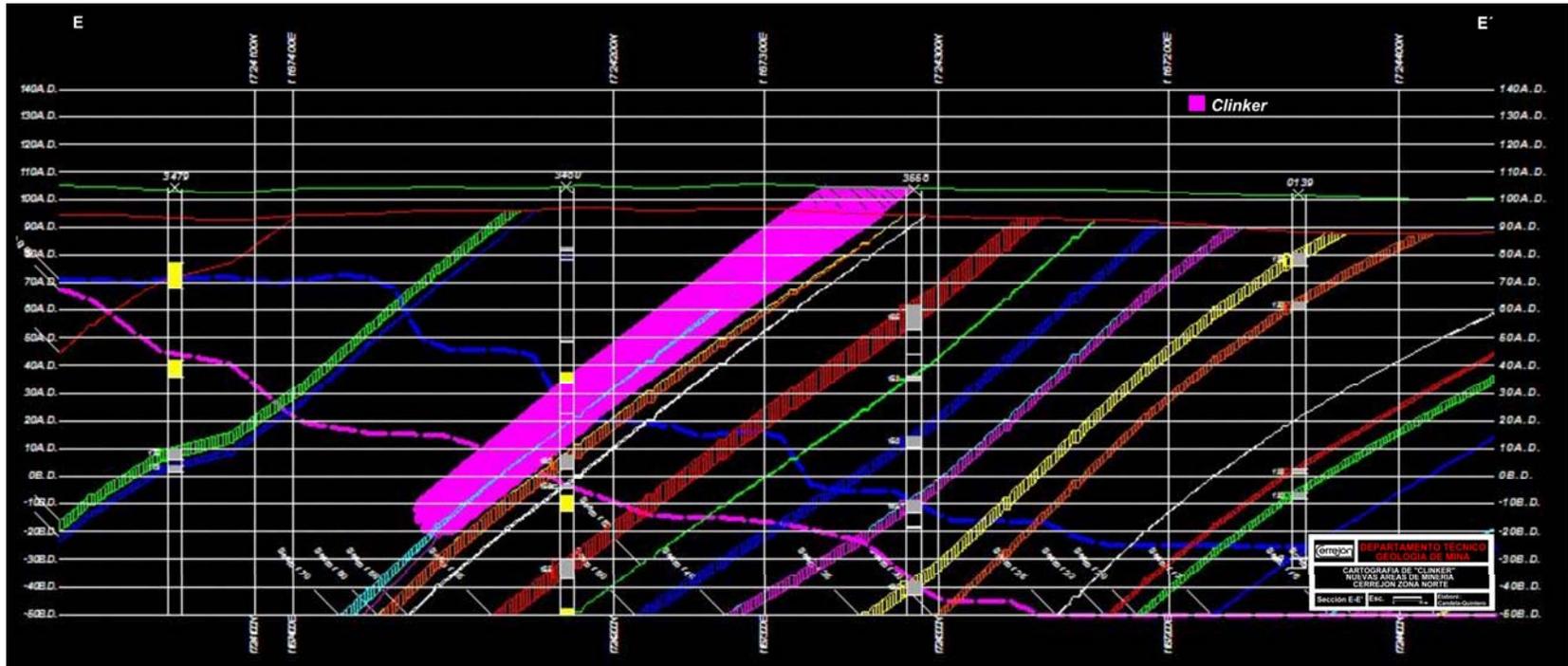
Sección C-C'



Sección D-D'



Sección E-E'



Cerrejón



ANEXO C - PALOTAL 10 - TIPIALA

TAJO

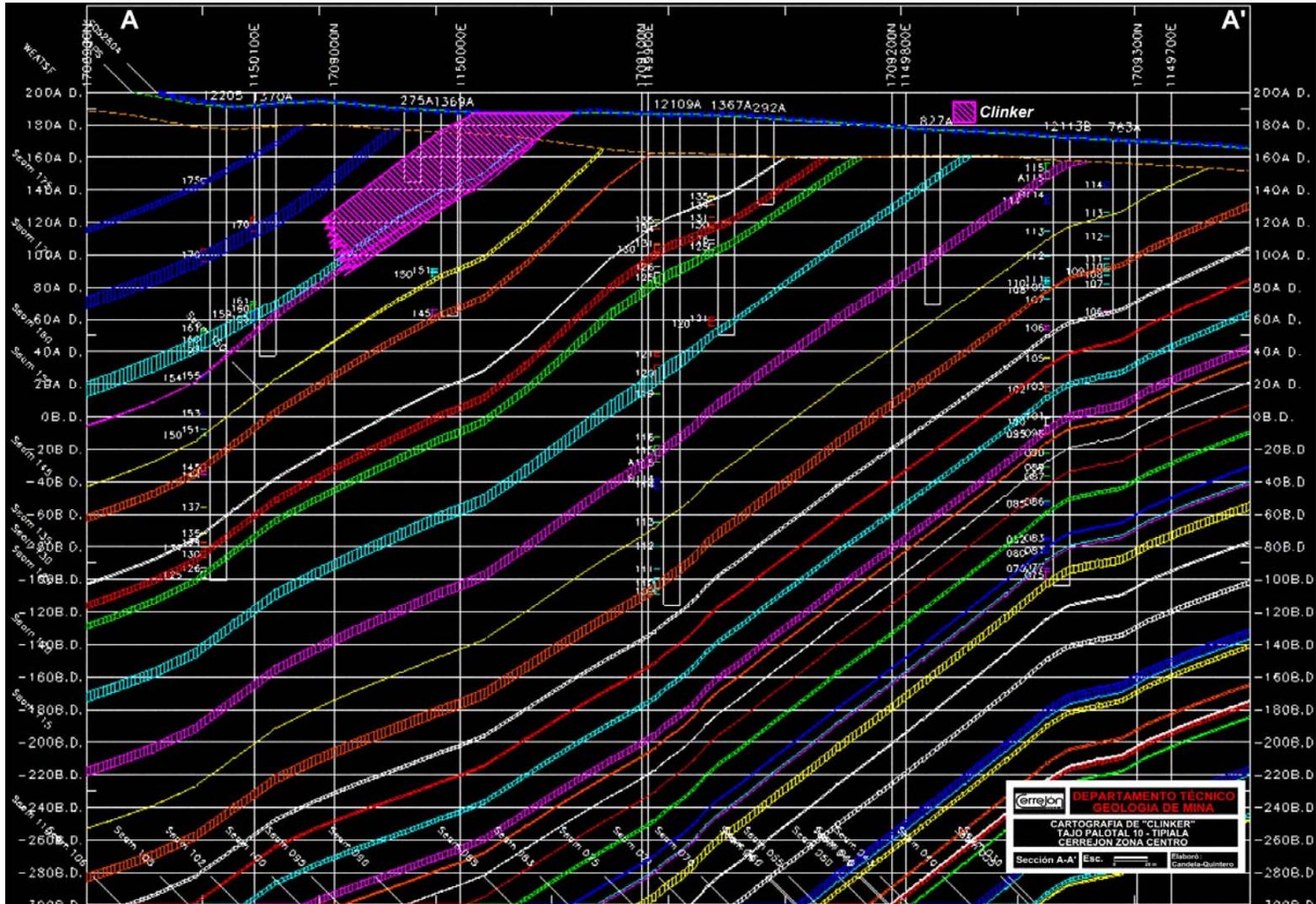
PALOTAL 10 - TIPIALA

SECCIÓN

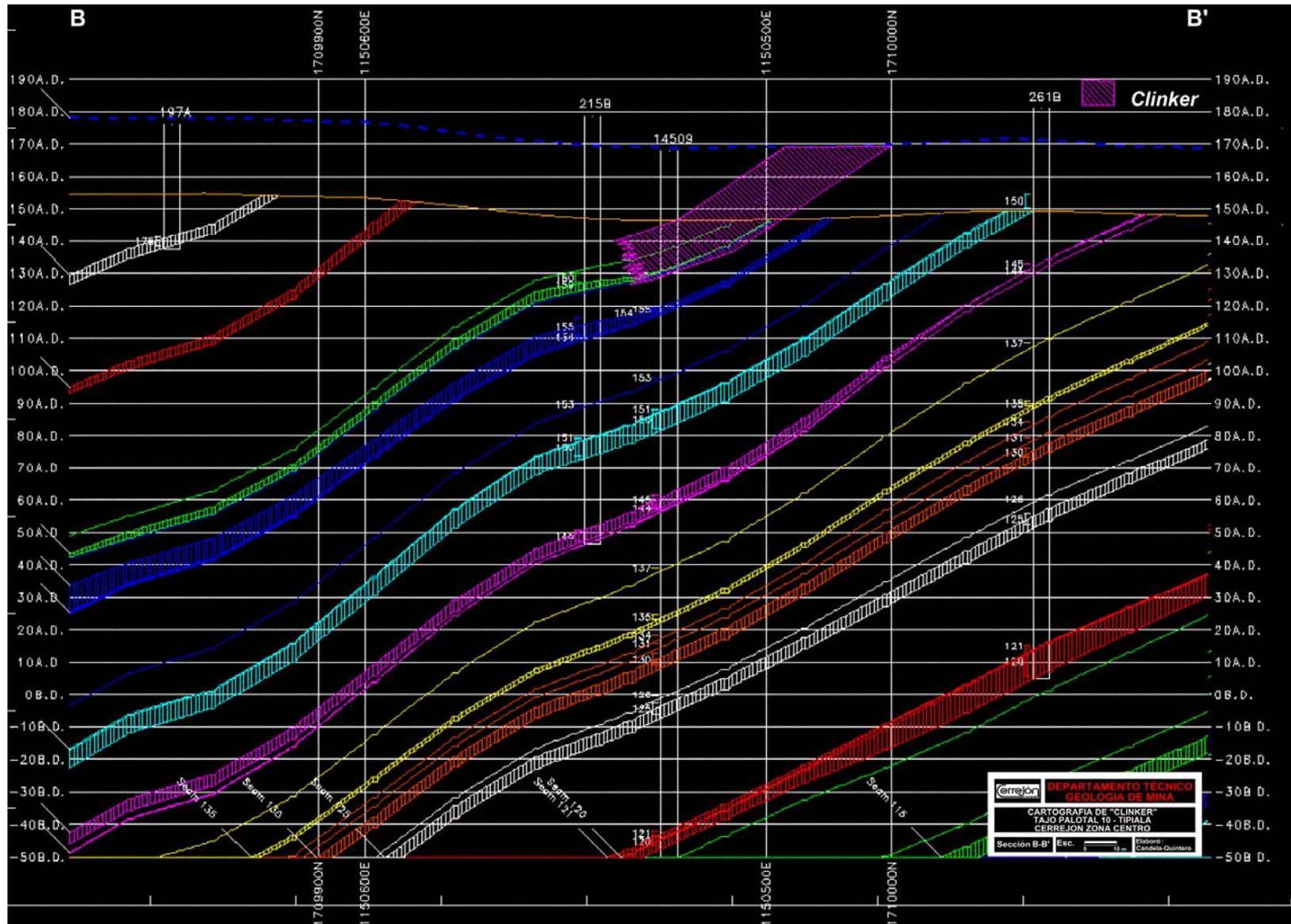
**A - A'
B - B'
C - C'
D - D'
E - E'
F - F'**

SECCIONES GEOLÓGICAS TAJOS PALOTAL 10 – TIPIALA

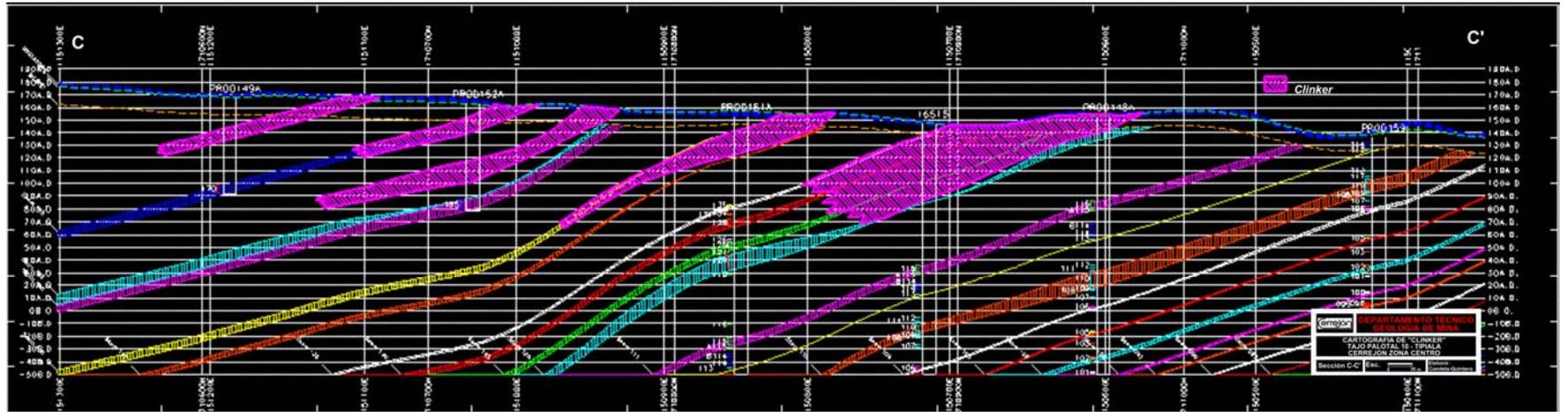
Sección A-A'



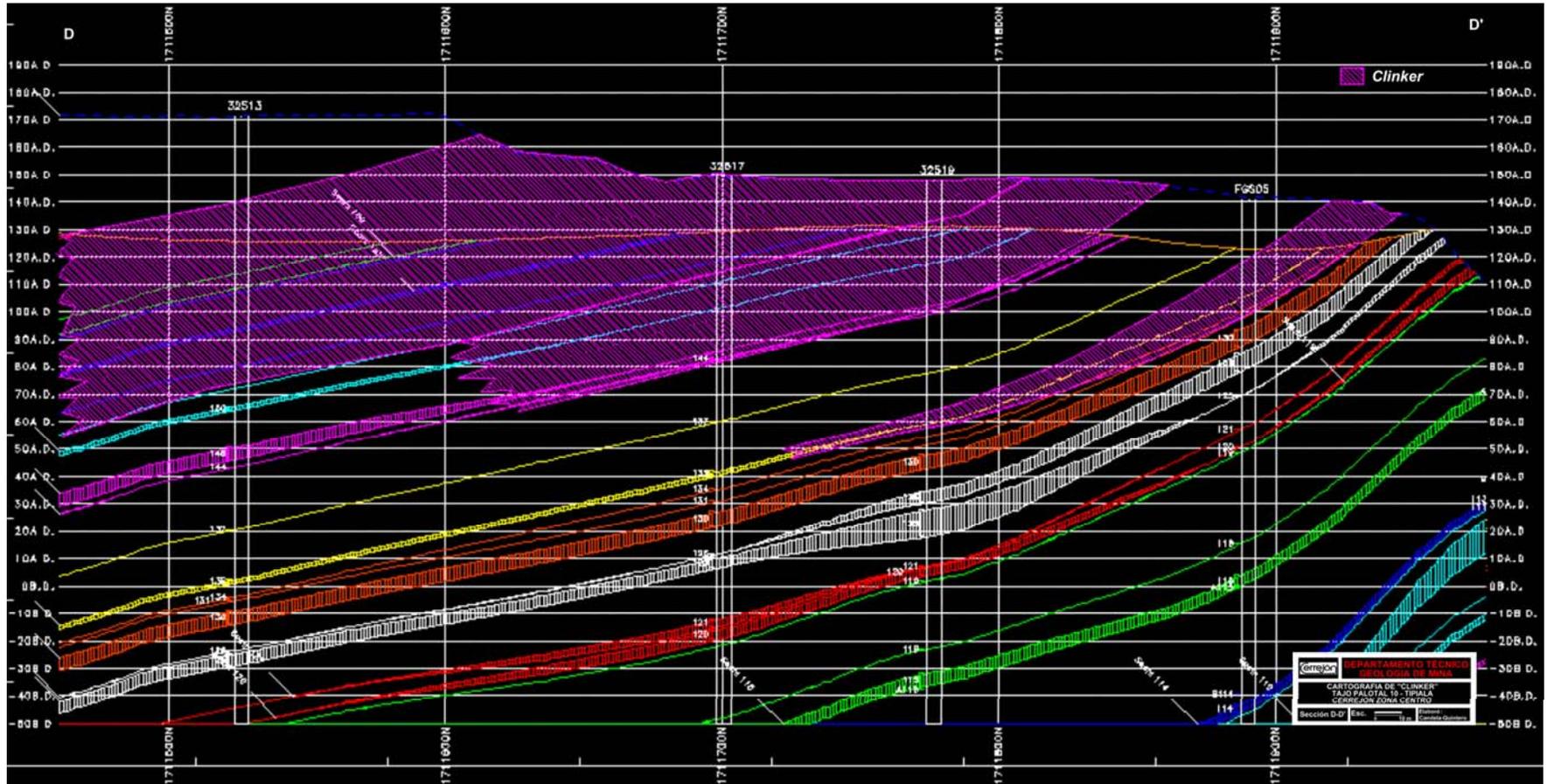
Sección B-B'



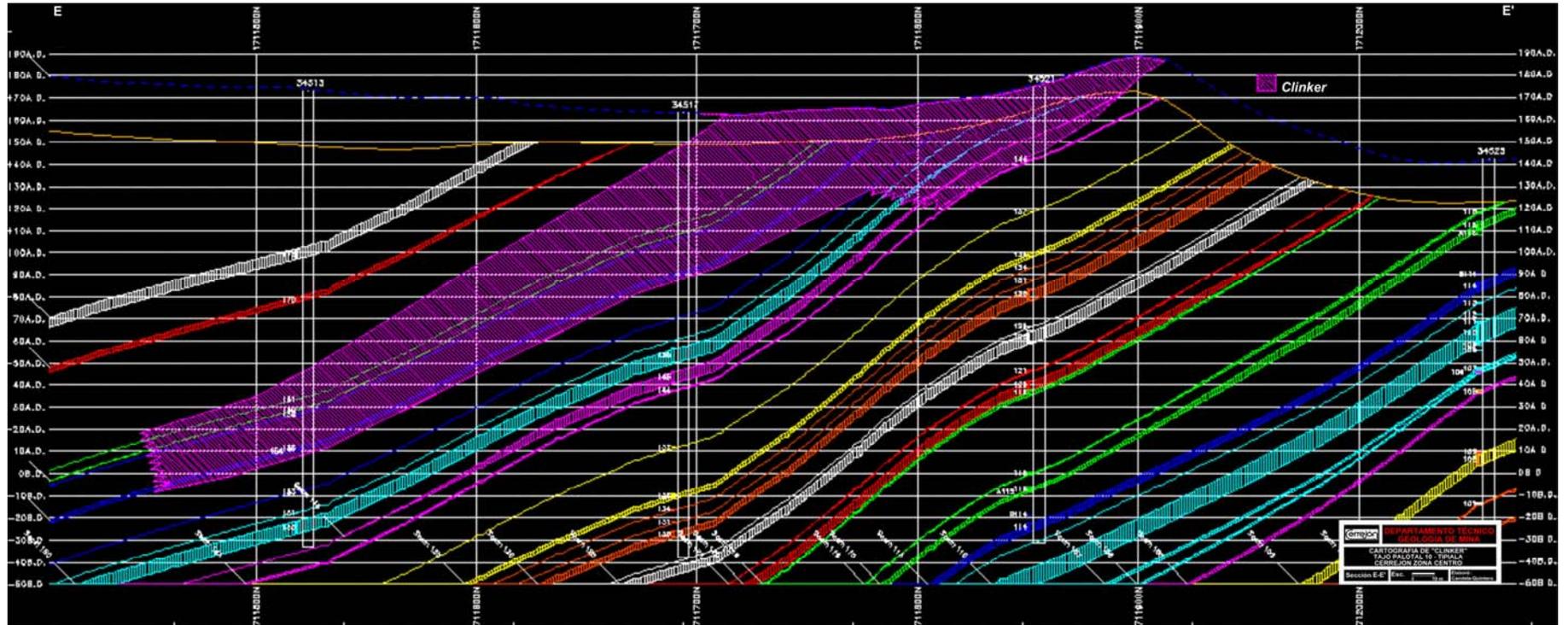
Sección C-C'



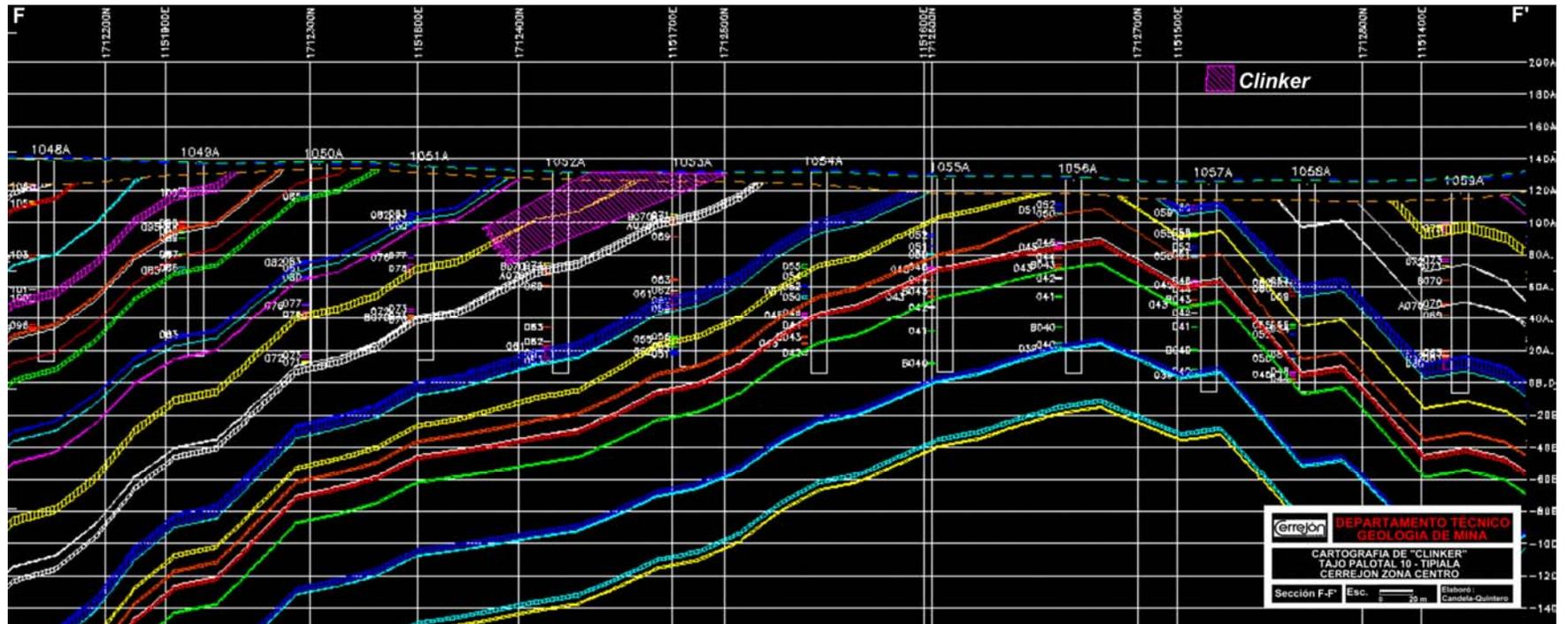
Sección D-D'



Sección E-E'



Sección F-F'



Cerrejón



ANEXO C - 100

TAJO

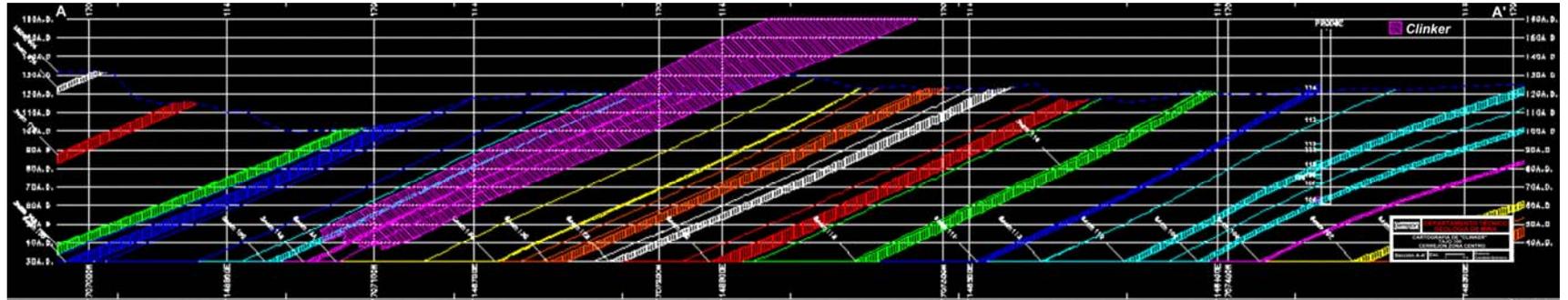
SECCIÓN

100

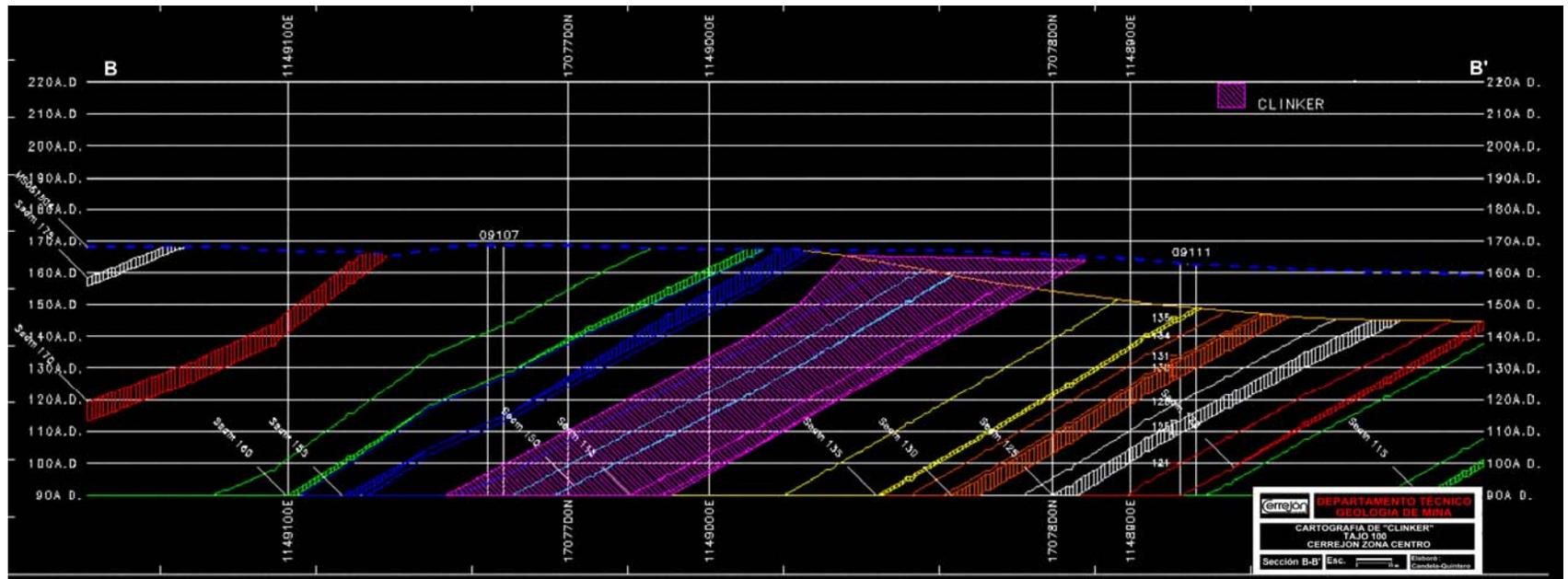
**A - A´
B - B´
C - C´**

SECCIONES GEOLÓGICAS TAJO 100

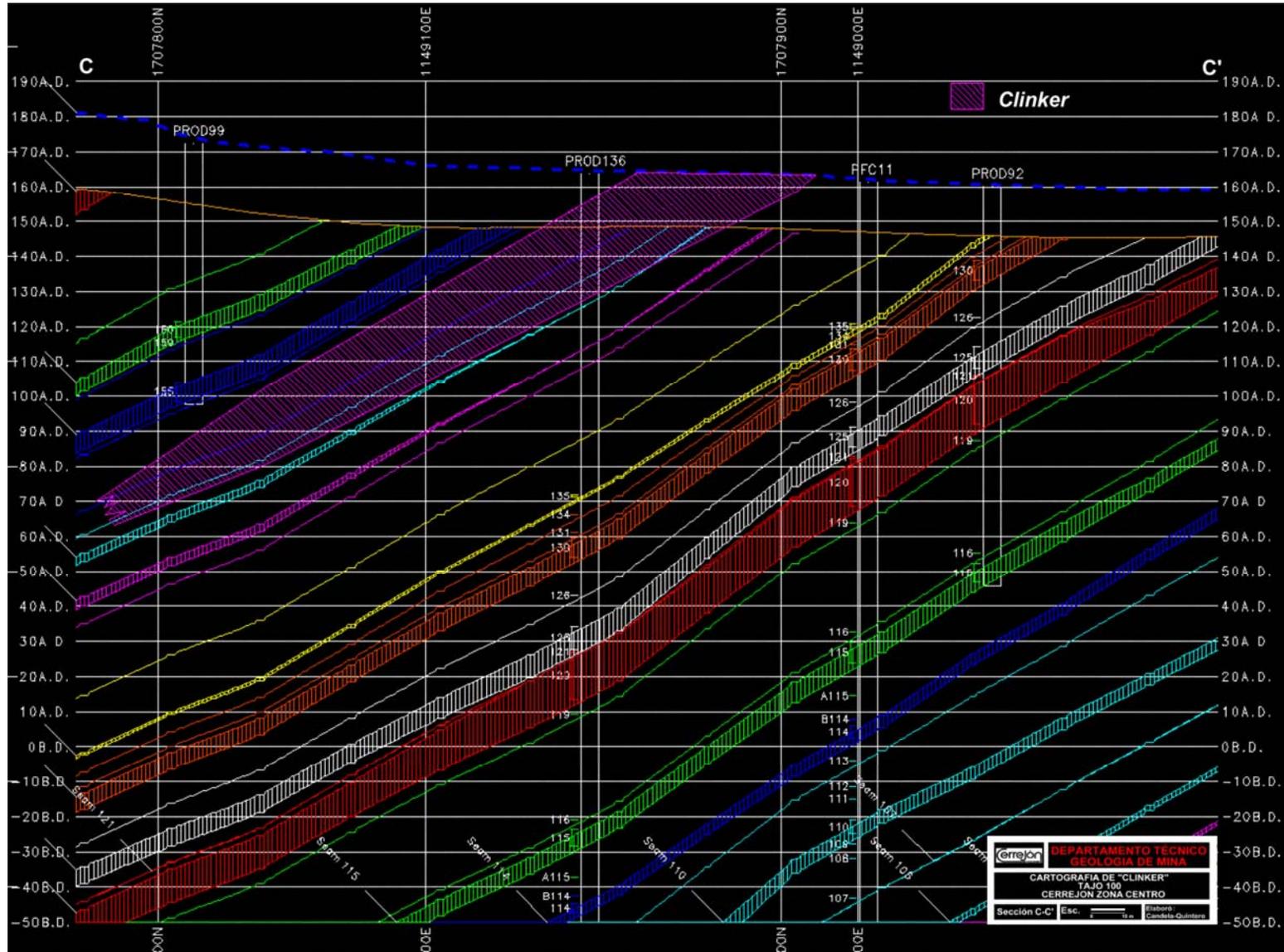
Sección A-A'



Sección B-B'



Sección C-C'



Cerrejón



ANEXO C - PATILLA

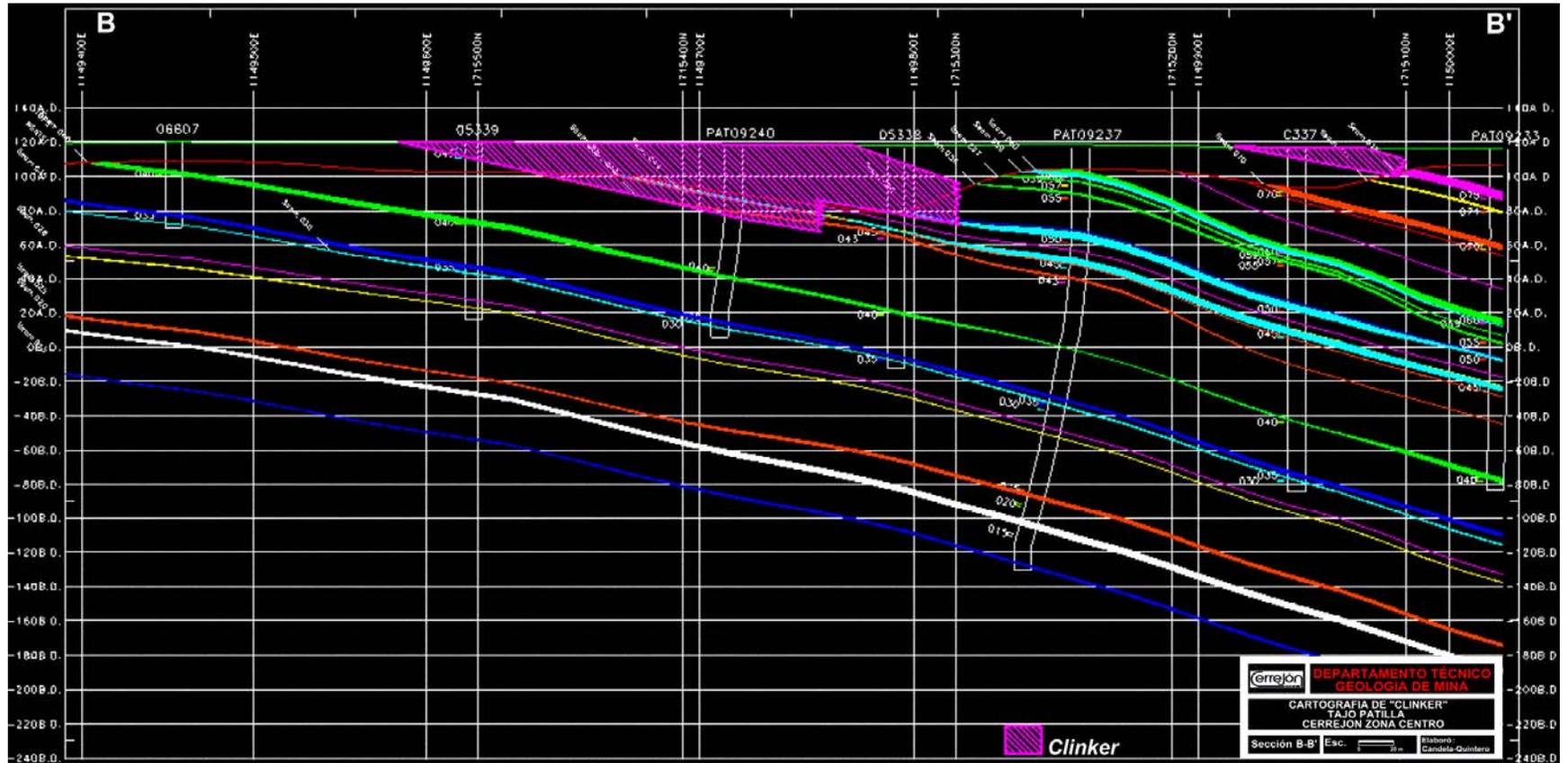
TAJO

PATILLA

SECCIÓN

A - A'
B - B'

Sección B-B'



Cerrejón



ANEXO D

**ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS
CUERPOS DE “CLINKER” PARA EL
DEPÓSITO CARBONÍFERO DEL
CERREJÓN**

ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS CUERPOS DE "CLINKER" PARA EL DEPÓSITO CARBONÍFERO DEL CERREJÓN
 Comparación entre los trabajos previos y el actual

