

**“ESTUDIO DE CASO SOBRE LA EXTRACCIÓN DEL CARBÓN MINERAL CON  
USO DE EXPLOSIVOS EN LA MINA A CIELO ABIERTO CERREJÓN, COLOMBIA.”**



**TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TUTOR: ING. CESAR LOPEZ**

**OSCAR WILLIAMS CARRILLO DUARTE**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTA DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., MARZO 10 DE 2017**

**TABLA DE CONTENIDO**

1. INTRODUCCIÓN	5
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2.1 FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA	6
2.2 ANTECEDENTES	6
2.3 JUSTIFICACIÓN	8
2.4 OBJETIVOS	9
2.4.1. OBJETIVO GENERAL	9
2.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	9
3. MARCO TEÓRICO	10
4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	11
4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	11
4.2. UNIVERSO Y MUESTRA POBLACIONAL	11
4.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS UTILIZADAS	12
5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	12
5.1. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	12
5.1.1. PROCESO ACTUAL DE EXTRACCIÓN DEL CARBÓN MINERAL USANDO EXPLOSIVOS	15
5.1.2. ENCUESTA AL PERSONAL DE EXPLOSIVOS	33
5.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	513
BIBLIOGRAFIA	54
ANEXOS	57

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL MANTO (CERREJON 2009)	17
FIGURA 2. TIPOS DE PATRON USADOS EN DISEÑO DE VOLADURA.	18
FIGURA 3. DISEÑO DE VOLADURA ELABORADO CON MINEX	19
FIGURA 4. SISTEMA MODULAR PARA NAVEGACION CON GPS	20
FIGURA 5. REPORTE EN TIEMPO REAL DEL PROCESO MODULAR	21
FIGURA 6. DETECCION DE CARBON POR MEDIO DE RAYOS GAMMA	22
FIGURA 7. ESTRUCTURA DE ALAMBRES	23
FIGURA 8. CARGUE DE BARRENOS CON EMULSION	24
FIGURA 9. CAPTURA PANTALLA MODULAR	25
FIGURA 10. NIVELACION DE POZOS PARA VOLADURA	27
FIGURA 11. NIVELACION DE POZOS EN SEGUNDO CARGUE.	28
FIGURA 12. POSICIONAMIENTO DE PARAPLUG	29
FIGURA 13. REDUCCIÓN ACPM EN EL AGENTE DE VOLADURA – FUENTE CERREJÓN	40
FIGURA 14. REDUCCIÓN PORCENTAJE DE EMULSIÓN 2000 A 2017 - FUENTE CERREJÓN	41
FIGURA 15. POST VOLADURA - FUENTE CERREJÓN	42
FIGURA 16. CARGUE Y NIVELACIÓN – FUENTE CERREJÓN	43
FIGURA 17. CARGUE Y MEDICIÓN DE COLLARES – FUENTE CERREJÓN	44
FIGURA 18. DENSIDAD DE AGENTE EXPLOSIVO – FUENTE CERREJÓN	45
FIGURA 19. CIFRAS DE PRODUCCIÓN – FUENTE CERREJÓN	46

**LISTA DE TABLAS**

TABLA 1. SEXO DEL PERSONAL ENTREVISTADO	33
TABLA 2. NIVEL EDUCACIONAL	34
TABLA 3. UBICACIÓN PROPORCIONADA	35
TABLA 4. PERFORACIÓN DE BARRENOS	35
TABLA 5. MATERIAL ROCOSO SEGÚN DISEÑO	36
TABLA 6. ACCIDENTES FATALES DURANTE LA OPERACIÓN 2000 A 2017 FUENTE CERREJÓN	38
TABLA 7. ACCIDENTES FATALES OPERACIÓN – FUENTE CERREJÓN	39
TABLA 8. INCREMENTO ESTÉRIL 2011 A 2013 – FUENTE CERREJÓN	47
TABLA 9. INCREMENTO CARBÓN 2011 A 2013 – FUENTE CERREJÓN	48

## **1. Introducción**

Una de las fortalezas que ha tenido Colombia desde muchas épocas atrás ha sido la minería, desde trabajos en orfebrería hasta la explotación del carbón, los cuales eran característicos de trueques hechos por los habitantes locales en un comercio a nivel local, esto contribuyó a que la minería creciera en grandes proporciones generando un crecimiento económico al departamento de la Guajira, lo que origino que a mediados de los años setenta la minería del carbón iniciara con una invitación por parte del gobierno colombiano a licitar la explotación de 32.000 hectáreas localizadas en el departamento de la Guajira las cuales componen el Cerrejón Zona Norte, así se dio el inicio de la primera fase de explotación y exportación del carbón, incluyendo la construcción del puerto privado, Puerto Bolívar y Mushaisa la unidad residencial de la mina, todos estos proyectos debieron realizarse siempre teniendo en cuenta la protección del medio ambiente, los altos estándares de seguridad y de calidad, cumpliendo estos y muchos otros requisitos, el carbón colombiano obtiene su certificado de calidad llegando a ubicarse en los últimos años como una de las diez industrias más grandes del país exportando más de 444.9 millones de toneladas de carbón.

En esta investigación se espera dar a conocer el proceso actual con uso de explosivos que el Cerrejón ha venido usando.

## **2. Planteamiento del Problema**

La presente investigación espera responder y aportar a toda la comunidad partiendo de la siguiente pregunta ¿Para que el proceso de extracción de carbón mineral empleando explosivos sea exitoso, cual es el que la mina del Cerrejón actualmente usa? Se espera aportar con una visión más clara de cuáles son las etapas que hacen parte del proceso en la mina del Cerrejón, localizada en el departamento de la Guajira, ya que como se verá reflejado en la revisión de los antecedentes no se encuentra una idea clara de cuáles son los métodos usados hoy en día en la minería de Colombia, es por esto que resulta importante analizar esta temática para así abrir un camino de discusiones sobre el tema anteriormente mencionado y que nos sirvan para tomar futuras decisiones que impliquen la creación de nuevos proyectos, técnicas y prácticas.

### **2.1 Fundamentación del Problema**

### **2.2 Antecedentes**

Para el presente proyecto fue necesario consultar diferentes fuentes o trabajos relacionados al tema de estudio para generar un análisis más amplio y tener referentes previos.

Díaz, J. C., M, Guarín, M. A., A, & Jiménez-Builes, J. A. (2012). En el proyecto titulado: Análisis y Diseño de la Operación de Perforación y Voladuras en Minería de Superficie Empleando el Enfoque de la Programación Estructurada. Crearon una interfaz en la cual se ingresan la densidad del explosivo, diámetro e inclinación de la perforación, resistencia a la compresión de la roca y dimensiones del banco, para así diseñar la operación de perforación en el menor tiempo posible, disminuyendo el error humano por el uso inapropiado de fórmulas, concluyeron en que el algoritmo presentado es válido y a comparación del método tradicional es instantáneo y no se es necesario conocer las fórmulas para el cálculo de los diferentes

parámetros, este artículo nos sirve como referente previo para determinar que se está haciendo en el Cerrejón en estos momentos en cuanto a la implementación de programas tecnológicos que disminuyan costos y ahorren tiempo.

Castilla, J., G, & Herrera, J., H. (2011). En su trabajo titulado: Modelización de Parámetros de Voladura para la Optimización del Proceso Minero: La Voladura Computarizada. Exploraron la optimización de voladuras a cielo abierto empleando herramientas para obtener datos precisos y conocer cuantitativa y cualitativamente los parámetros reales de la voladura. Se logra concluir que daños medioambientales como vibraciones, proyecciones y ondas áreas de las voladuras fueron controladas por medio del concepto de voladura computarizada, este trabajo nos es relevante ya que da una perspectiva en el estudio de la granulometría y herramientas existentes para analizar, evaluar, detectar y modificar puntos críticos en el proceso de explotación.

Cueva, O., A. (2015). Técnicas Modernas en Voladuras Controladas en Minería a Cielo Abierto. En su investigación indaga las técnicas modernas de voladuras controladas en la cual se necesita de perforación de pre-cortes, carguío mecanizado, explosivos de baja densidad y personal altamente calificado, la aplicación de este método permite ser realizado con seguridad y este mismo influencia la continuidad de las operaciones y en la vida útil de la mina, concluyendo que las voladuras controladas son la opción más rentable y sostenible en el tiempo, esta investigación nos sirve como muestra de nuevos métodos de explotación teniendo en cuenta reducciones de ruido, altos niveles de seguridad y el personal que debe hacer parte del proceso.

Pineda, J. E., P. (2011). En su estudio titulado: La Ecología en Colombia: Relación, Impactos y Atenuación con los Sectores Minero, Energético y Portuario, realizaron un análisis a los impactos positivos y negativos de los sectores Mineros, Energéticos y Portuarios, sus medidas atenuantes y evaluadoras de dichos impactos para finalmente presentar un resultado de las

condiciones de los mismos, llegando a la conclusión que Colombia tiene políticas ambientales y como requisito se deben generar estudios previos de posibles impactos ambientales pero aun así se han aprobado proyectos sin ellos, igualmente muchas comunidades presentan resistencia en el momento de proyectos mineros debido al impacto que este puede causar.

Las investigaciones anteriormente mencionadas nos sirven como bases teóricas del presente trabajo, ya que con ellas logramos obtener un conocimiento más amplio de todos los aspectos que comprende la minería y explotación del carbón mineral.

### **2.3 Justificación**

La presente investigación se enfocará en estudiar las etapas que han sido usadas en el proceso de extracción del carbón mineral en la mina del Cerrejón usando explosivos, la cual actualmente utiliza el método de cielo abierto, este mismo consiste en la remoción de gran volumen de suelo y subsuelo que después es procesado para extraer el mineral, una de las principales técnicas usadas en estos procesos es la voladura, que consiste en perforar el material rocoso en diferentes puntos para posteriormente ser cargada con agentes explosivos. La dinamita fue inventada en 1867, por Alfred Nobel y fue uno de los agentes cruciales que se comenzó a usar para este trabajo, pero debido a la constante mejora, esta sustancia explosiva ha sido sustituida para mejorar las técnicas de demolición por diferentes agentes explosivos, que han resultado de gran ayuda por los rendimientos obtenidos que influyen la producción y la economía de todo el sistema de construcción y de fragmentación de material rocoso.

Uno de los propósitos en esta investigación es indagar el proceso que el Cerrejón ha venido implementando para que el proyecto sea sostenible, dando así un paso de una era en la que se consideraba la fragmentación de rocas como una experiencia adquirida a una técnica basada en



principios científicos, profundizando los conocimientos sobre los diferentes materiales que componen el proceso de la voladura que garanticen que el proceso sea seguro y rentable; pretendiendo utilizar y reconocer como el uso de sus empleados es la base de todo el proceso, algunos países producen más que otros, esto siendo un tema crucial en el avance de la minería ya que el rendimiento económico está determinado principalmente por capital físico y humano, siendo este uno de los principales retos del Cerrejón.

Finalmente, he decidido hacer la investigación en la mina del Cerrejón ubicada en el departamento de la guajira, ya que en ella se han determinado reservas carboníferas superiores a los 4.000 millones de toneladas (Mt)<sup>1</sup>, haciendo de la Guajira, de acuerdo al censo general 2005 emitido por el DANE, un departamento con inmensos recursos naturales, cuya explotación le asegura ingresos importantes que invertidos desde la perspectiva del desarrollo humano, prestación adecuada de servicios públicos esenciales y mayor generación de empleo, consolidarse como un centro empresarial y turístico de proyección internacional.

## **2.4 Objetivos**

### **2.4.1. Objetivo General**

Investigar el proceso actual de extracción de carbón mineral con explosivos que usa la mina del cerrejón, para que este sea un proyecto exitoso.

### **2.4.2. Objetivo Especifico**

- Determinar que fases incurren en el proceso actual de extracción de carbón mineral con explosivos que usa la mina del cerrejón.

---

<sup>1</sup> Instituto Colombiano de Geología y Minería. El Carbón Colombiano: Recursos, Reservas y Calidad. 2004.

- Analizar a través de un sondeo las percepciones que tienen los trabajadores calificados en cuanto al proceso de voladura.

### **3. Marco Teórico**

Una de las fortalezas que ha tenido Colombia desde muchas épocas atrás ha sido la minería, desde trabajos en orfebrería hasta la explotación del carbón, los cuales eran característicos de trueques hechos por los habitantes locales en un comercio a nivel regional, esto conllevó a que la minería creciera en grandes proporciones generando un crecimiento económico a la región; el presente marco teórico nos proveerá un conocimiento de cómo el proceso actual para la extracción del carbón mineral está empleando explosivos y que posibles factores afectan el proceso.

#### ***Procesos de explotación usados***

Es importante entender como el proceso de la extracción del carbón mineral funciona, la perforación y la voladura son la parte esencial de todo el proceso, antes de llegar a ellos, se debe rescatar y relocalizar la fauna, deforestar y remover el suelo, para poder instalar los taladros que perforan los puntos que serán cargados más adelante con agente de voladura siendo este paso uno de los más importantes, ya que la perforación, según el presupuesto con el que se cuente, dictamina el uso de explosivos, según Ramos, L. (2016) confirma, que los costos de la perforación dependen de los explosivos, accesorios, planilla del personal y triturado del material; Después de la perforación estos puntos son cargados con emulsiones, la cual es una mezcla de dos partes líquidas, que no pueden ser mezcladas entre sí o inmiscibles, estas emulsiones son altamente seguras al impacto o fricción y son resistentes al agua por lo cual las ha llevado a

dominar el mercado actual; después de esto, finalmente se llega al carbón mineral que se encuentra entre los diferentes estratos y todo este proceso es realizado a cielo abierto.

#### **4. Metodología de la Investigación**

La metodología propuesta para el presente caso de estudio es ideal gracias al sistema holístico de este mismo, en el cual se espera usar diferentes fuentes de información y se pretende aplicar un tipo de caso interpretativo para aportar una descripción densa, interpretando los datos recogidos, ya que de acuerdo a Yin (2003), usando múltiples tipos de datos se pueden obtener resultados más verídicos y confiables, para después proceder a examinar, categorizar, tabular y triangular la información, ya que la triangulación nos sirve como lo describe Stake (1995) y Yin (1984), como un protocolo para asegurar la precisión y una explicación alterna estableciendo un significado y validando el proceso.

##### **4.1. Tipo de Investigación**

La presente investigación usará el método de caso de estudio interpretativo el cual implica un análisis cualitativo, sin dejar de lado un análisis cuantitativo para analizar las muestras recogidas, Yin (1984) define el estudio de caso como una descripción y análisis detallados de unidades sociales o entidades únicas.

##### **4.2. Universo y muestra poblacional**

Este estudio fue implementado en la mina del Cerrejón, localizada en el departamento de la Guajira, para la recolección de datos como encuestas, se entrevistaron un total de 92 empleados

del Cerrejón los cuales hacen parte del proceso de la voladura. Este estudio se realizó en un lapso de 6 meses con una dedicación de 240 horas divididas en las diferentes actividades realizadas.

### **4.3. Métodos y técnicas utilizadas**

Durante el proyecto se recolecto información por medio de diferentes métodos, Dörnyei (2007) menciona: “en una investigación casi todo puede ser percibido como información potencial, y no hay una razón por la cual las notas, comentarios de tiempo real, memos y anotaciones del investigador podrían llegar a ser excepciones.” Durante la recolección de datos se realizaron encuestas, para recopilar la información y comentarios necesarios del personal que interviene en el proceso de voladura, observaciones, durante el proceso de la extracción del carbón, revisión de documentos archivados de la mina del Cerrejón como planes de campo, registros, entre otros, para verificar datos relevantes al proyecto, datos y apuntes tomados; Yin (2003), dice que usando múltiples tipos de datos se pueden obtener resultados más verídicos y confiables, y esto es lo que se esperó hacer para tener una base sólida para poder generar resultados confiables.

## **5. Presentación y discusión de los resultados**

### **5.1. Presentación de los resultados**

#### **5.1.1. Proceso actual de extracción del Carbón Mineral usando explosivos**

Para llegar a determinar las etapas que incurren en el proceso actual de extracción de carbón mineral con explosivos que usa la mina del cerrejón, para que este sea un proyecto sostenible, haremos un recuento a través de los años de los métodos que han sido usados

### *Método Artesanal*

En 1864, John May describió en su examinación del terreno a lo que sería la mina del Cerrejón en estas palabras: “Las minas están situadas a orillas del río Cerrejón, cerca de cinco leguas de Barranca, y están equidistantes de las ciudades de Riohacha y Maracaibo, cerca de catorce leguas; el suelo es perfectamente igual en todas direcciones, y por consiguiente muy a propósito para la construcción de un ferrocarril”; May lanzo el proyecto de explotación de las minas de carbón donde se incluía construir una línea férrea desde la mina hasta el mar y un muelle, pero no sería hasta el siglo 19 donde una minería a pequeña escala comenzó.

Ajustándose a las técnicas que se usaban alrededor del mundo se seguían unos pasos básicos de explotación, los cuales eran:

- Una maquina minera cortaba una abertura 2 metros debajo del manto para que la dinamita ubicada en ese lugar ejerciera su máxima fuerza.
- Cuando no se podía usar maquinas mineras se usaban métodos manuales, donde se taladraban huecos de 2 metros de hondo, en cada uno, con ayuda de un palo de madera, se procedía a insertar tubos de dinamita, el ultimo tubo contenía una tapa de voladura eléctrica al cual se le conectaban unos cables que se conectaban entre si y conectaban al embolo de una batería de magneto.
- Una vez se explotaba, se procedía a recoger el material y se cargaba en camiones que luego procederían a llevarlo a bodegas en donde seria limpiado y clasificado.
- Una vez clasificado, se procedía a triturar el material grande para una fácil transportación.

En 1984 se realizó el primer embarque de carbón de la mina del Cerrejón en el Puerto Zuñiga en camiones de 35 toneladas dando paso a que Colombia entrara y fuera reconocido como uno de los países exportadores de carbón.

La dinamita fue el primer explosivo que fue utilizado en las voladuras, la dinamita está compuesta por nitroglicerina, una sustancia muy inestable, esta misma fue inventada en 1867, por Alfred Nobel y fue uno de los agentes cruciales que se comenzó a usar para este trabajo, pero debido a su volatilidad y el alto riesgo de fatalidades que se presentaron se dio la necesidad de reemplazarla, teniendo en cuenta estadísticas del MSHA – Mine safety and Health Administration hubo más de 950 muertes producidas por la minería con explosivos solo en los estados unidos; se usa esta estadística ya que no se encontró evidencia de fatalidades registradas en esta época en Colombia.

### ***Método de la Mecanización***

Para poder competir con el mercado emergente, la compañía debió avanzar en sus sistemas de cargue, transporte, y en los explosivos que empleaba para la voladura, en este término, se pasó del uso de dinamita al uso de explosivos tipo suspensión, el cual es una mezcla de un combustible, hidrocarburos, un compuesto químico, nitrato de amonio, en grandes cantidades y otros nitratos, y aluminio. Dependiendo del caso, TNT, nitrocelulosa, y agua eran usados, estas tienen una velocidad alta y tienden a ser húmedas, lo que puede incurrir a que se adhiera a las paredes del barreno, causando inconvenientes para el cargado a granel; para evitar esto, se permeaban usando gomas a base de cera o agentes de acoplamiento, una ventaja que proporcionaron las suspensiones era el almacenamiento y transporte comparado a la dinamita, ya que estos se pueden transportar y almacenar por separado y se mezclan una vez vayan a ser

usados, por ende los ingredientes en si no son explosivos hasta que se mezclan y el riesgo de una posible explosión en el proceso de transporte disminuyo y por ende los costos también. Igualmente hay que tener en cuenta que se redujo el tiempo y los costos no solo en el transporte, almacenamiento y posible fatalidad, sino también en el cargue de los barrenos.

El proceso base seguía siendo el mismo:

- Exploración de la zona
- Preparación de la zona, perforando los barrenos.
- Llenado de barrenos con la suspensión a usar.
- Volado de los barrenos.
- Remoción, cargue y almacenamiento del material.

### ***Método Actual***

Hoy en día, en la mina del Cerrejón se emplea un explosivo más seguro y que ha reducido los costos de la explotación del carbón, estas sustancias son las emulsiones; Este producto puede tener problemas de detonación si es almacenado bajo temperaturas muy frías, teniendo en cuenta la zona territorial de la guajira, no es muy común que esto se presente, pero aun así, el producto permite calentarse antes de ser detonado; en comparación con otras sustancias como el ANFO un agente seco, se debe usar un cebo o reforzador en combinación con el fulminante para ser detonado, en cambio la emulsión solo con el fulminante estándar número 8, (uno de los componentes del sistema tradicional de voladura), hará detonar la emulsión ya que la sensibilidad de la emulsión no requiere de una gran cantidad de energía para detonar confiablemente.

El proceso actual tiene pensado como fundamento la rehabilitación de las tierras, es por eso que el proceso comienza así:

- Rescate y relocalización de Fauna
- Deforestación y remoción del Suelo
- Perforación y voladura
- Cargue, transporte y disposición del Material.
- Trituración, apilamiento y cargue del carbón.
- Embarque y rehabilitación de tierras.

A simple vista se puede determinar cuáles son las etapas del proceso actual usado por la mina del Cerrejón; para soportar la indagación, se realizaron tres visitas técnicas para conocer la situación actual en lo que se refiere a los procesos de explotación usados en la mina del Cerrejón, en estas tres visitas se recopiló información que nos ayudó a generar un panorama del proceso como tal, hemos determinado las etapas que incurren en el proceso de extracción de carbón mineral usando explosivos, que intervienen de principio a fin:

### ***Prospección***

En este proceso lo que se busca es identificar las zonas donde se encuentra el carbón para una posible explotación.

### ***Rescate, localización de Fauna, deforestación y remoción del suelo***

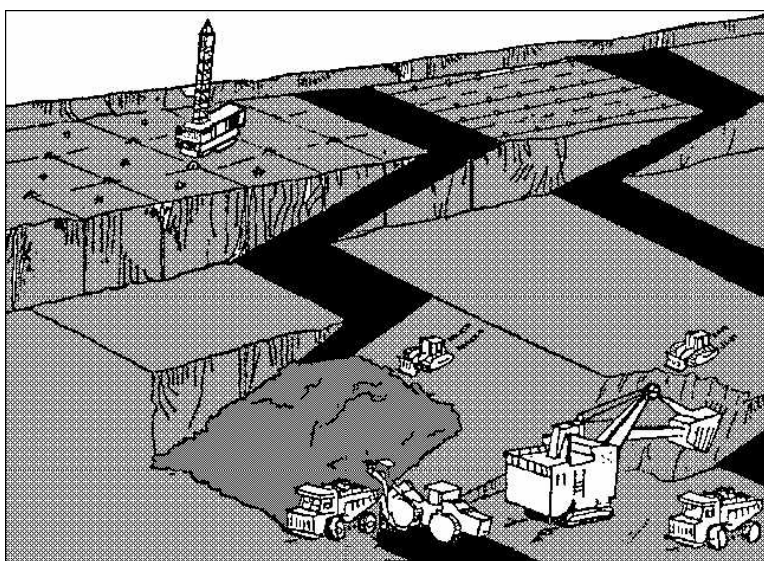
Primero, se hace una vista con el fin de identificar la flora y la fauna presente en la zona a explotar, para posteriormente ubicarlos en un hábitat similar de la cual fueron extraídos;



además de eso, se aprovechan la madera de los árboles y se extrae la capa vegetal (suelo) la cual se ubica en bancos de suelos para posteriormente ser utilizados en las áreas de reforestación.

### ***Perforación y voladura***

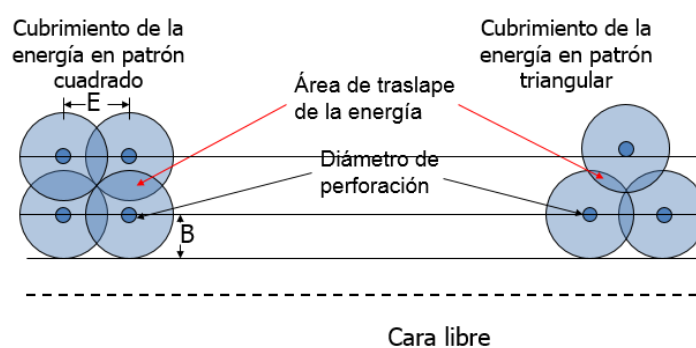
Después de la prospección, rescate de flora y fauna y remoción del suelo, el siguiente paso es extraer el material estéril que cubre el manto de carbón, la siguiente imagen nos da una idea de cómo están ubicados los mantos de bajo de los diferentes estratos del terreno.



***Figura 1. Ubicación del manto (n.d. Recuperado online Agosto 31, 2017, de <https://goo.gl/815Wo4> Cerrejón, 2009).***

Para lograr llegar al manto de carbón mineral se debe remover el estrato de terreno que cubre el carbón mineral, esta remoción se hace con la ayuda de diferentes equipos, entre ellos están la flota de taladros de perforación de pozos de voladura, una referencia de ellos son los Atlas DML-SP, los cuales como se aprecia en la figura 1, nos sirven para perforar pozos (barreno) de diferentes profundidades, en la mina la profundidad del barreno es de 11 metros

para obtener una altura de banco del terreno de 10 metros que es la ideal para que el material pueda ser removido con seguridad. Para que el taladro pueda perforar estos pozos se debe realizar un diseño de voladura, para que este diseño le llegue al taladro se cuenta con una plataforma llamada D-BIIS (Drilling and Blasting Integrated Information System), la cual optimiza los procesos administrativos y tecnológicos para la planeación, el diseño, la ejecución de la perforación y voladura, genera reportes, análisis, colas y un completo control del consumo de explosivos. Para lograr definir este diseño intervienen diferentes parámetros como el espesor de roca entre los diferentes mantos de carbón, el tipo de explosivo a utilizar, la presencia de agua en los pozos, el mismo diámetro de perforación y la experiencia previa en voladuras ya realizadas.



**Figura 2. Tipos de patrón usados en diseño de voladura (Autor: Cerrejón, 2009).**

El Cerrejón usa el patrón triangular, ya que como se aprecia en la figura 2, si se usara el patrón cuadrado, habría mayor desperdicio de energía que acarrearía mayor consumo de explosivos, esta es la razón por la cual el patrón triangular es usado.

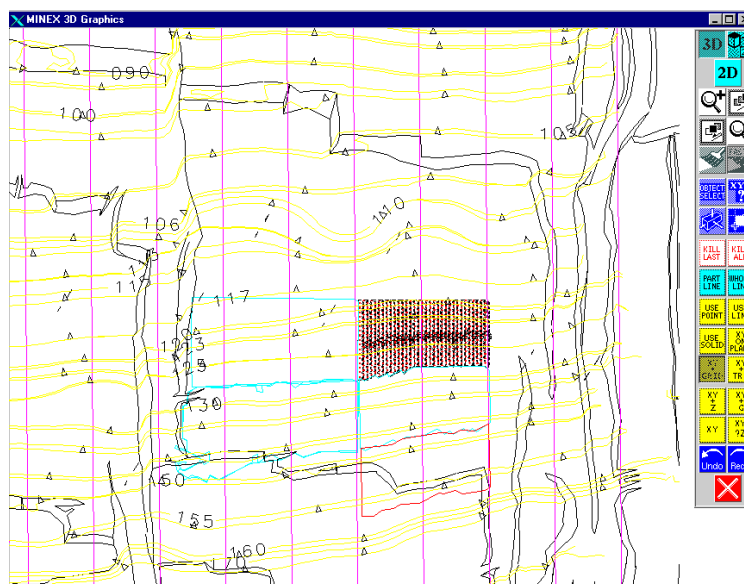
Otro aspecto importante a tener en cuenta, son los términos *burden* (B), *espaciamento* (E) y *sobre-perforación*, el Burden representa la distancia desde el eje del barreno a la cara libre perpendicular más cercana y también la distancia entre filas de barrenos en una voladura; el Espaciamento es la distancia entre ejes de los barrenos de una misma fila y la Sobre-

perforación es la distancia por debajo del nivel del piso de la pala a la que se perfora el barreno, esta se requiere para asegurar que la roca pueda ser excavada completamente al nivel de piso de pala deseado. Este se calcula en relación con la longitud del burden:

$$E = 1.15B$$

$B$  = Burden

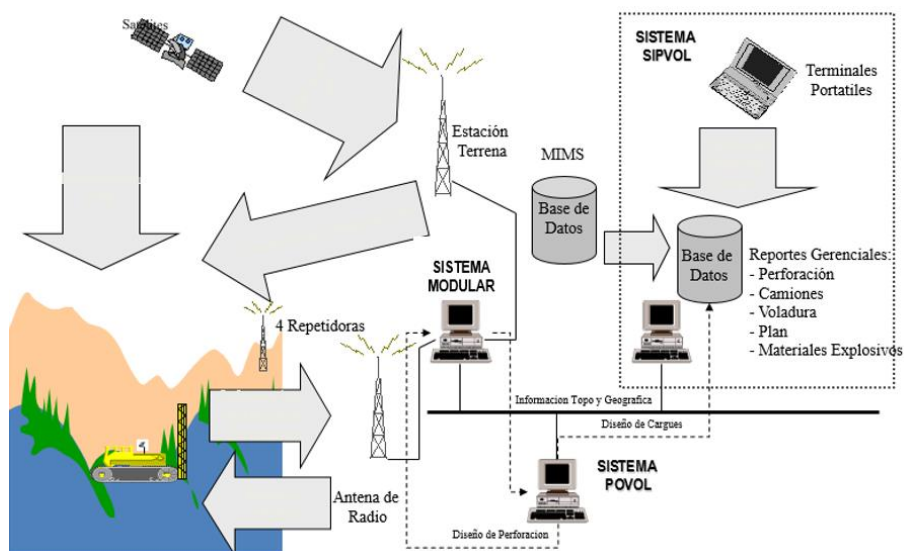
Para el diseño de la perforación y la voladura el Cerrejón utiliza un software llamado MINEX, el cual permite optimizar los recursos, además de esto, se apoya en la plataforma D-BISS y un sistema de GPS llamado MODULAR que permite ubicar a los taladros y perforar los barrenos de acuerdo a las coordenadas del diseño de voladura.



**Figura 3. Diseño de Voladura elaborado con MINEX. (Autor: Cerrejón, 2009).**

MINEX, ayuda con la identificación del área donde se va a llevar a cabo el diseño de la voladura, define los patrones y demás variables de perforación según los inter-burden (capa de terreno que hay entre dos mantos), además de esto establece la forma geométrica y numeración

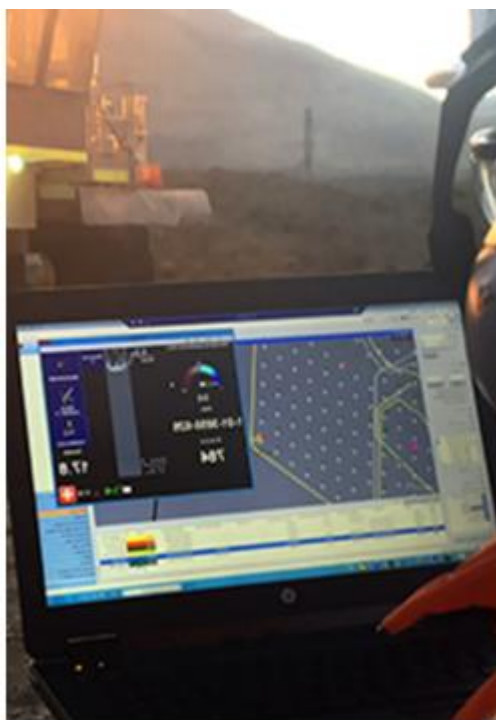
definitiva de los pozos de toda el área, genera un reporte definitivo para campo el cual llega por medio del sistema MODULAR.



**Figura 4. Sistema MODULAR para Navegación con GPS. (Autor: Cerrejón, 2009).**

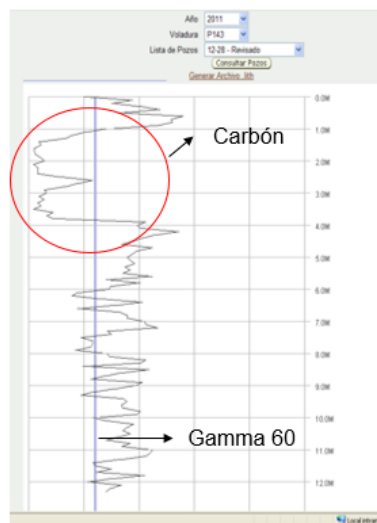
MODULAR, utiliza un sistema de monitoreo de perforación, un GPS de alta precisión y un GC (guidance computer) a bordo del taladro como guía para el operador del taladro, cada GC muestra los patrones virtuales de perforación, y utilizan las coordenadas predefinidas de los pozos provenientes del diseño MINEX y con esta información el operador visualiza en detalle la localización del pozo y realiza la perforación sin necesidad de estacado. Este sistema, genera reportes en tiempo real los cuales incluyen información de la profundidad real perforada y localización centimétrica de coordenadas y cotas de los pozos de voladura, registros en términos de metros perforados por turno incluyendo pozos pre-perforados, reporte detallado de los tiempos de perforación, en espera, en traslado, en cambio de tubería, revoluciones de la broca, nivel de vibración en la broca, presión de desalojo de aire del barreno, rata de penetración y fuerza de empuje de la rotaria para cada pozo perforado, reportes de consumibles, vida de la broca y del resto de accesorios de la sarta de perforación, como vemos

en la figura 4, MODULAR, muestra el reporte de índice de fragmentabilidad de cada pozo perforado, basado en la resistencia a dejarse perforar la roca según los indicadores de perforación como son las RPM de la broca, vibración de la misma, fuerza de empuje de la rotaria y rata de penetración. Varía entre 0 y 100 siendo 0 una roca muy débil y 100 una de dureza extrema, este proceso se puede ser supervisado en tiempo real, para analizar el rendimiento que tiene la operación, MODULAR con su sistema de GPS ubica el taladro, los barrenos por perforar y los ya perforados de acuerdo al diseño elaborado en MINEX.



**Figura 5. Reporte en tiempo real del proceso de perforación MODULAR. ((n.d.). Recuperado online: Agosto 31, 2017, de <https://goo.gl/8Dnrc5>)**

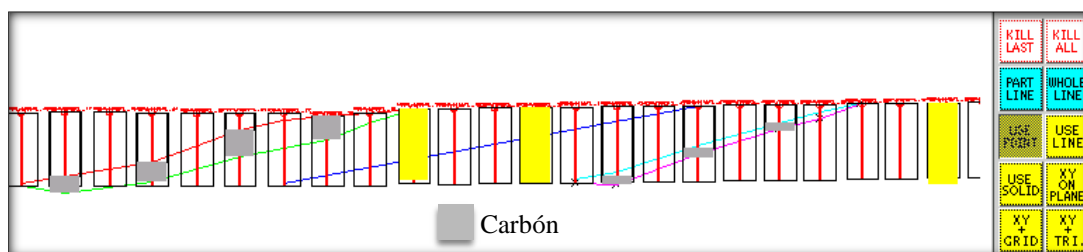
De la mano se encuentran los registros geofísicos, que son fundamentales para la precisa localización del carbón mineral y el estéril a lo largo de la profundidad de los pozos, los registros muestran la variación de la emisión natural de rayos gamma de la roca a lo largo del pozo como una línea ondulante, teniendo en cuenta que el carbón en estado fresco emite gamma por debajo de 60 Grados API, esto se puede ver en la figura 6.



**Figura 6. Detección de carbón por medio de rayos Gamma (Autor: Cerrejón, 2009).**

Esta información permite determinar la litología del área para su posterior interpretación por filas de pozos, la densidad de registro de un área perforada en particular depende en gran medida de la cantidad de mantos presentes la misma, su complejidad geológica y la experiencia del registrador y del geólogo a cargo, básicamente se pretende determinar el rumbo de los mantos presentes, así como su buzamiento real con una precisión al centímetro.

Con la información de los pozos registrados en campo y posteriormente cargada en la base de datos se crea una estructura de alambres (Wire Frames) para cada sección de pozos registrados, se crea una superficie en 3D del carbón y del estéril interpolando secciones transversales y se generan secciones definitivas y los reportes para el diseño de cargue con explosivos



**Figura 7. Estructura de Alambres (Autor: Cerrejón, 2009).**

El cual le permite al taladro ubicarse por coordenadas en cada uno de estos pozos hasta cubrir todo el diseño del terreno que se quiere perforar para posteriormente ser cargado, volado, removido y transportado a los botaderos.

### ***Voladura***

Para el proceso de voladura se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Armado de multiplicadores (booster) y cebado de pozos**

Garantizar que el armado de los booster (se entiende como booster al iniciador de fondo de barreno de los agentes de voladura, conformado por mezcla de potentes explosivos con alta presión y velocidad de detonación) y cebado de pozos (cebado se entiende como la introducción del detonador dentro del booster ya sea pirotécnico o electrónico), se realice de forma segura. Para llevar a cabo este proceso los operadores encargados de armar los multiplicadores, colocan los materiales en un lugar seguro, seco y estable, fuera del área de cargue, y dentro del área señalizada teniendo en cuenta no colocarlos en zonas de altas temperaturas o llamas. El líder de tabla debe medir una temperatura del 10% de los pozos que conforman el área a cargar haciendo énfasis hacia la cara libre y aquellos que tengan carbón asociado. En caso de detectar zonas calientes, se debe medir el 100% de los pozos y aplicar el procedimiento de cargue pozos calientes. En caso de que el cargue no se termine en el turno de trabajo y se continúe al día siguiente; nuevamente hay que medir la temperatura del 10% de los pozos que falten por cargar y se debe aplicar el mismo procedimiento desde el inicio. El operador debe cebar los booster a boca de pozo. Es decir, introducir el detonador dentro de uno de los huecos del booster.

- **Control de cargue de pozos con agente de voladura**

Se debe garantizar que la cantidad de agente de voladura depositada en los pozos según los diseños de cargue, para así obtener la correcta fragmentación de la roca. Antes de esto se debe elaborar un análisis de trabajo seguro (AST) teniendo en cuenta las condiciones y riesgos específicos del área identificando posibles pozos calientes y se deben tener los avisos de peligro respectivos indicando que se está trabajando; Se debe tener un Perfil de Cargue previamente para poder cargar, si no se cuenta con la autorización no se procederá; con base en el diámetro de los pozos, la longitud de columna a cargar y la tabla de cargue, se determina la cantidad de agente a cargar en cada pozo, y se registra en los perfiles o secciones de cargue correspondiente, lo mismo que el booster colocado.

- **Cargue de Barrenos con Emulsión**

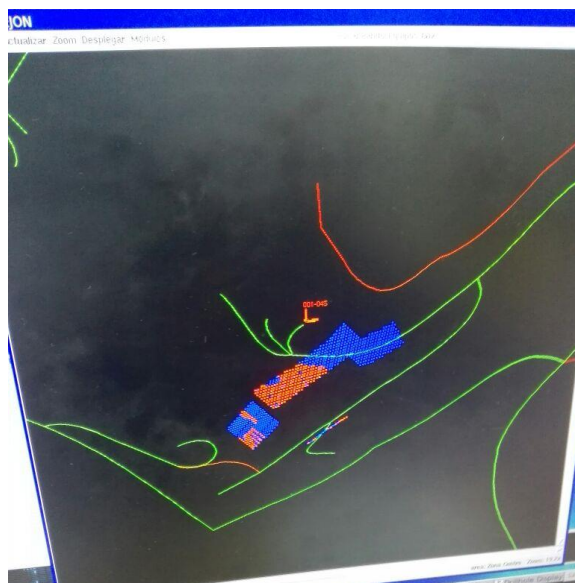


**Figura 8. Cargue de Barrenos con Emulsión (Autor: Oscar Carrillo 2016)**

En este proceso se debe tener en cuenta, el cargue de los pozos con el agente de voladura (Emulsión) de acuerdo a los diseños, de manera efectiva y segura, para garantizar voladuras de calidad, evitar lesiones al personal y/o daños al equipo. Este



proceso está a cargo de los operadores de camiones de emulsión, los cuales solicitan al Líder de Voladura la información sobre la cantidad de emulsión a cargar en cada pozo.



**Figura 9. Captura pantalla MODULAR (Autor Oscar Carrillo 2016)**

MODULAR apoya identificando los barrenos, y demás aspectos de la operación, un aspecto a tener en cuenta es la toma de la densidad, la cual, al llegar al área, antes de iniciar el cargue, se llena la bomba y manguera de descarga con emulsión, se carga mínimo 300 Kg de emulsión en los pozos asignados garantizando con esta cantidad que la mezcla de emulsión y L-2 es homogénea, después de esto se procede a la toma de la muestra de la emulsión previamente calibrada en el laboratorio, se verifica las características de la emulsión, verificando que no se separen sus componentes, gasificación para ser pesada, es aconsejable pesar la muestra tres veces ya que las balanzas tienen un rango de error de 10 gramos y cada taza tiene un rango de valores de peso, esto es equivalente al rango de densidad permitido que oscila entre 1.04 hasta 1.06 g/cm<sup>3</sup>. Por tanto, hay una equivalencia entre la lectura de la balanza y la densidad requerida, unos de los factores que afectan la calidad de la emulsión y su bombeo son la

temperatura, más de 5 bombeos a la misma emulsión y almacenamiento por más de 72 horas en las tolvas de los camiones.

- **Cargue de Pozos Calientes**

A la hora de cargue con emulsión nos podemos encontrar con un pozo caliente, el cual en su interior puede alcanzar temperaturas mayores a 45°C, estos pozos no se deben cargar cuando la temperatura sea superior a los 60°C, e igualmente se debe considerar una temperatura de 5°C mayor a la de los pozos colindantes para el cargue, si se encuentra un pozo caliente se debe informar a los Supervisores de Minería, al Superintendente de turno de minería, al personal de seguridad X15 y central de emergencia sobre el plan diseñado, se deben definir sitios de bloqueo con el personal de acarreo y soporte en caso de emergencia, se asignan responsabilidades específicas para evacuación de áreas y se asigna el tipo de cebo y el procedimiento de cargue a utilizar.

Para determinar si un pozo es caliente, se mide la temperatura de cada pozo registrándolas en los perfiles de cargue, usando una *Termocupla* la cual mide la temperatura y consta de una sonda y una lectora, para posteriormente cargar de los pozos más frescos hacia los más calientes, este cargue debe ser rápido y disparado el mismo día. Sí, un pozo tiene una temperatura menor o igual a 60°C pero mayor de 45°C serán cebados con cordón detonante y Pentofex de Pentolita, este es un multiplicador de alta densidad, velocidad y presión de detonación, a base de *Tetranitrato de Pentaeritritol o Pentrita*. Para este caso el agente de voladura (emulsión y blend) debe ser cargado antes del cebado y el cebo debe quedar en la parte superior de la columna

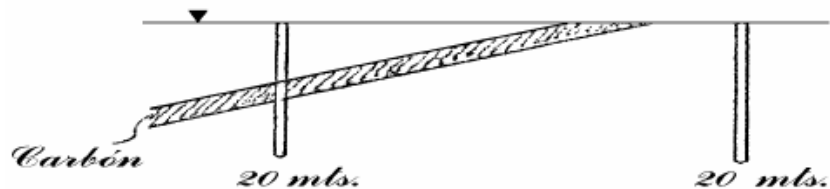
del agente de voladura usado, pozos con temperatura superior a los 60°C no serán cargados y se procederá a sellarlos inmediatamente.

- **Tapado de Pozos**

Para el tapado de los pozos se cuenta con dos tipos de materiales, Detritus, que son los residuos que dejó el taladro después de perforar los pozos y el Material Triturado, que es todo el material inerte clasificado, este tapado se hace en aras de lograr la máxima eficiencia del agente explosivo en la voladura.

- **Nivelación de pozos para voladura**

A la par del tapado de pozos ocurre la nivelación del fondo del pozo al nivel especificado por las secciones del diseño;



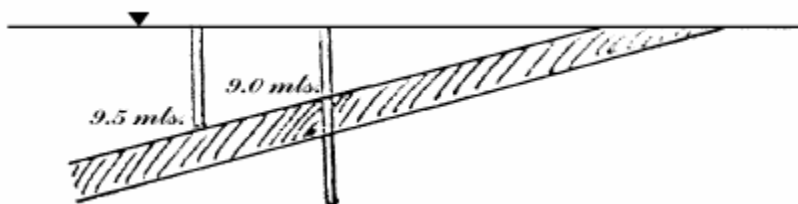
**Figura 10. Nivelación de pozos para voladura (Autor: Cerrejón, 2009).**

Como lo podemos ver en la figura anterior, pozos que no perforen al carbón, la profundidad puede tener una variación de 20 cms frente a la profundidad de diseño,

En pozos que no estén perforados al carbón, la profundidad real puede tener hasta una variación de más o menos 20 cms frente a la profundidad de diseño. Por ejemplo, si la profundidad de diseño es de 20 metros, la profundidad real de cargue del pozo puede estar entre 19,8 metros y 20.2 metros.

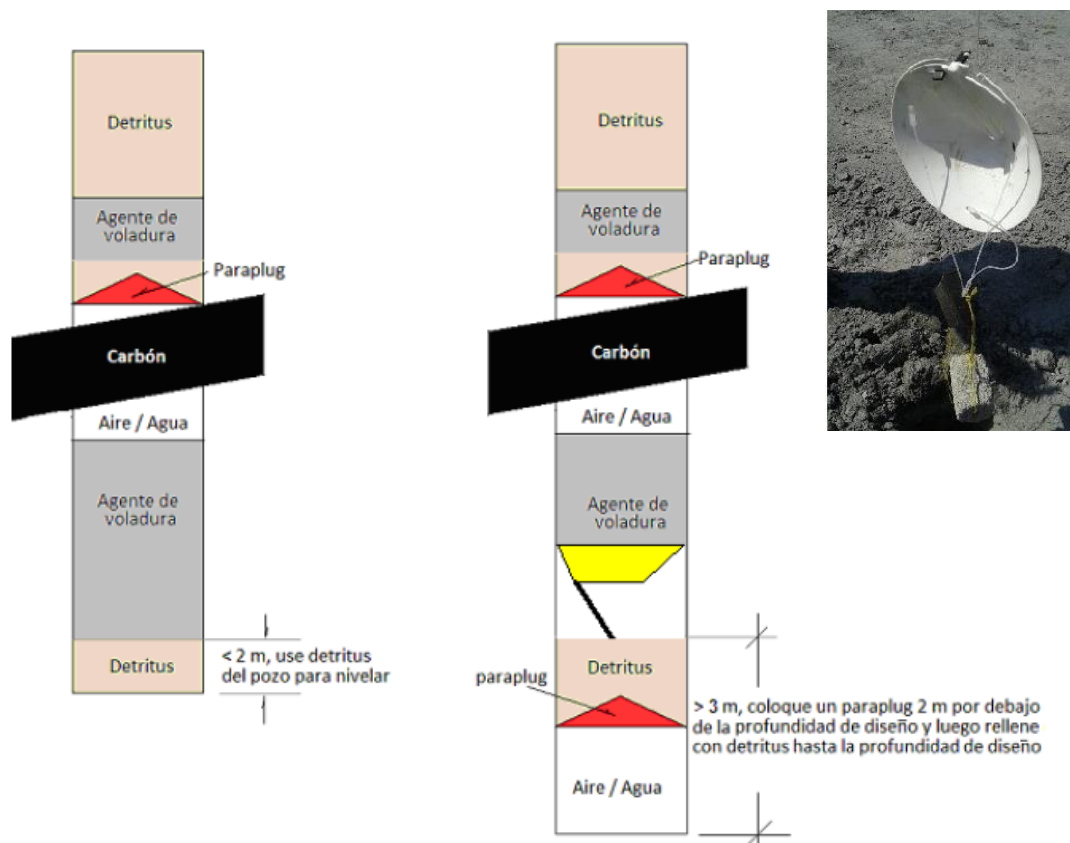
La medida del pozo será la comprendida entre el fondo y la boca del barreno y nunca se debe tomar como referencia la altura del detritus como inicio del barreno.

En la siguiente figura muestra los pozos con segundo cargue o al carbón, en estos la profundidad real puede ser hasta un máximo de 50 cms más corto que la profundidad de diseño. Nunca debe quedar más largo. Por ejemplo, si la profundidad de diseño es de 9.5 metros, la profundidad real del pozo puede estar entre 9,0 metros y 9,5 metros.



**Figura 11. Nivelación de pozos en segundo cargue (Autor: Cerrejón, 2009).**

A la hora de la nivelación hay dos métodos que se pueden usar, el Detritus que son los residuos que deja el taladro y el accesorio Paraplug, que reemplaza al detritus, como lo vemos en la siguiente figura crea una cámara de aire o agua que reduce el consumo de explosivos, también favorece en la fragmentación de la roca y disminuye los costos del proceso.



**Figura 12. Posicionamiento de Paraplug (Autor: Cerrejón, 2009).**

- **Material explosivo**

El material explosivo que se usa actualmente en la mina del cerrejón son las emulsiones, que según Konya (1998) están compuestas por una mezcla de nitrato de amonio u otros nitratos, un sensibilizador, un combustible que puede ser un hidrocarburo o hidrocarburos y aluminio. Una mezcla bien balanceada de una emulsión tiene la velocidad de detonación más alta y económica del mercado, aunque tienden a ser húmedas y se adhieren en las paredes del barreno, estas se hacen resistentes al agua con el uso de goma o ceras, agentes de acoplamiento o emulsificantes.

Otro aspecto que el Cerrejón considera valioso es que estas sustancias se pueden transportar por separado y mezclarse en el lugar de uso, por lo cual mientras son transportados los

ingredientes no son explosivos sino antes de cargarlos al barreno. Por lo que reduce en gran medida el costo y el tiempo del cargado de grandes cantidades.

En el Cerrejón se utilizan tres tipos de agentes de voladuras para los cuales la velocidad de detonación (VOD) del agente de voladura es medido en metros por segundo, varía de acuerdo con el tipo de agente de voladura y el diámetro de perforación de los barrenos. Para el tipo de emulsión que se fabrica en la Planta Norte y con un diámetro de 9", su VOD debe estar en un rango de  $5300 \pm 300$  m/seg.

El cordón detonante también afecta la liberación de energía ya que si el cordón detonante contienen mucha energía, el explosivo no puede llegar a detonar sino que produce una combustión, pero si el cordón no contiene mucha energía, el explosivo no detonaría y se podría dañar, igualmente la posición del cordón, dependiendo si se ubica en el centro o a un lado del barreno también determinara la severidad de los efectos.

Otros accesorios explosivos que hacen parte del proceso de la detonación del explosivo son los siguientes:

- Booster o Pentofex o Multiplicador: multiplicador de alta densidad, velocidad y presión de detonación.
- Retardo de superficie: Detonador que tiene un tiempo de retardo predeterminado necesaria para iniciar la detonación.
- Cordón Detonante: Es necesario para iniciar la detonación de la columna del agente explosivo introducida en el barreno constituida por un núcleo de *Pentrita*.
- Línea troncal de disparo (Nonel): detonador no-eléctrico que provee un tiempo de retardo a cada barreno, en milisegundo.

- **Manejo de productos químicos (planta emulsión)**

El agente explosivo producido en la planta es un Hidrogel o emulsión, que consiste en una mezcla de una solución saturada de Nitrato de Amonio a 80%C la cual aporta más volumen de gas que cualquier otro explosivo en la detonación, con (ACPM) y aceite usado entrelazados por un emulsificante (SMO), el cual es resistente a la humedad, apropiado para ser utilizado en pozos húmedos y aporta gran estabilidad a la emulsión o hidrogel

### ***Granulometría***

En el ámbito de la granulometría va de la mano con el proceso de la voladura, ya que según el material explosivo, detonantes usados, tipos de excavación y perforación, patrones usados y demás características que hemos visto anteriormente influyen en la fragmentación y de la roca y por ende en la granulometría; este proceso es uno de los factores que se ha querido estandarizar y de cierta manera se ha logrado, pero los terrenos y diferentes tipos de roca con los que se encuentran a diario la mina desafían el proceso de voladura, es de manera vital obtener una granulometría que sea manejable para poder recogerla y descargarla en los lugares indicados Herrera (2011) ha propuesto generar una curva granulométrica de la voladura por medio de la adquisición de imágenes digitales y así ajustar los otros aspectos que hablamos anteriormente, el Cerrejón se ha comprometido en la investigación y mejoramiento de la granulometría, en el 2016 se destinaron recursos para el estudio por medio del programa POWERSIEVE para determinar una gran cantidad de muestras representativas de voladura, lo que ha venido siendo una gran optimización de los procesos para obtener el resultado esperado.

***Remoción, cargue y transporte de carbón mineral.***

Después de la voladura exitosa, el material rocoso, es fracturado y removido por equipos de gran tamaño como palas eléctricas, bulldóceres y de más; este proceso se inicia con los bancos de material ya fracturados, donde llegan los camiones de gran tamaño (240 o 320 toneladas) a hacer cargados por las palas, donde se remueve el material estéril que cubre el manto, luego entran los bulldóceres a remover la delgada capa de estéril que queda cubriendo el manto; enseguida raspan el manto y lo apilan en el suelo para que posteriormente sea cargado y transportado en camiones carboneros de 190 Tn, los cuales depositan su carga en patios destinados al almacenamiento del carbón dependiendo de la calidad del mismo.

***Trituración y o apilamiento del carbón mineral.***

Una vez en el patio de carbón asignado según la calidad, este es descargado a una trituradora, donde se muele y pasa a ser almacenado en un Silo, para que posteriormente, sea cargado en el tren.

***Cargue del tren, compactación y humectación***

El tren está constituido por una locomotora que transporta aproximadamente de 100 a 130 vagones, este se encuentra en sincronización con el Silo, el cual mientras el vagón transita debajo de la válvula descarga la cantidad exacta para llenar el vagón y se procede a la nivelación y compactación, por medio de un rodillo y se humecta para evitar la emisión de polvillo de carbón.

***Descargue y embarque de Carbón en puerto bolívar***

Una vez el tren es cargado en la mina del Cerrejón este se desplaza por la línea férrea desde la mina hasta Puerto Bolívar ubicado en la bahía de Portete, en donde es descargado en una



banda transportadora la cual lleva el carbón al buque o lo lleva a un patio de carbón donde es almacenado, para que posteriormente el Staker transporte el carbón por medio de la banda y lo descargue en el buque.

### ***Rehabilitación de tierras***

En el proceso de extracción del carbón mineral se remueve gran cantidad de estéril el cual es ubicado en sitios especiales llamados botaderos los cuales después de llenar las áreas asignadas para tal son cubiertos por una capa de suelo, para que posteriormente sean aradas por los locales, adecuando el terreno para posteriormente plantar semillas y arborizar con especies propias de la región, así revegetando y llevando la tierra nuevamente a condiciones similares a las que se encontraban antes de la explotación.

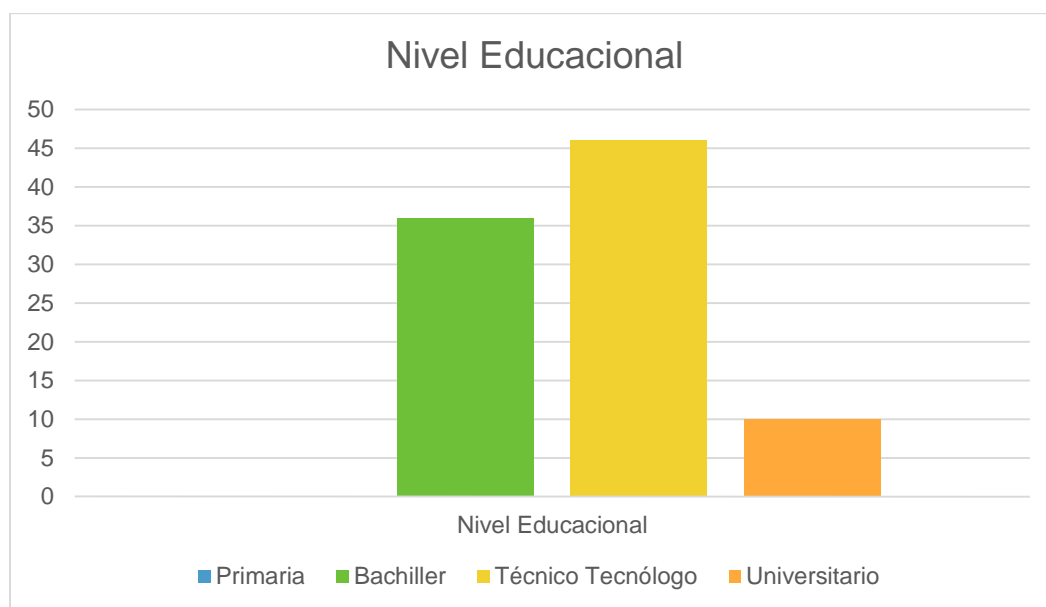
#### **5.1.2. Encuesta al personal de explosivos**

Se realizó una encuesta al personal que hace parte del departamento de voladura para determinar las percepciones que tienen los trabajadores en cuanto a los sistemas, elementos usados en la mina y resultados esperados.



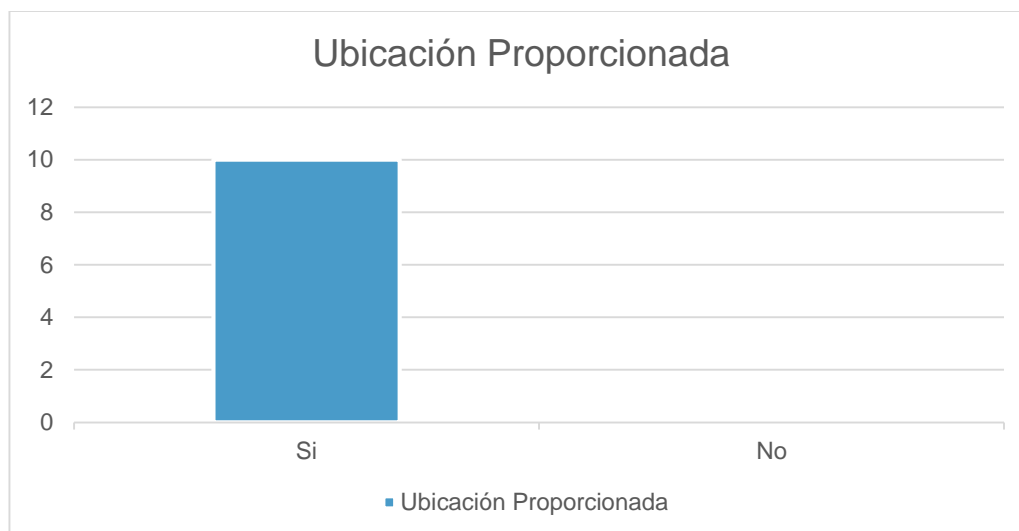
**Tabla 1. Sexo del personal entrevistado.**

De la muestra total (Se realizaron un total de 92 encuestas), el 91% son hombres, y solo el 9% son mujeres, lo que demuestra una gran diferencia que el personal capacitado para este tipo de operación es predominado por hombres. Esta muestra está dividida en dos grupos etarios, de 29 a 39 años ,28% y de 40 a 59 años, 72%.



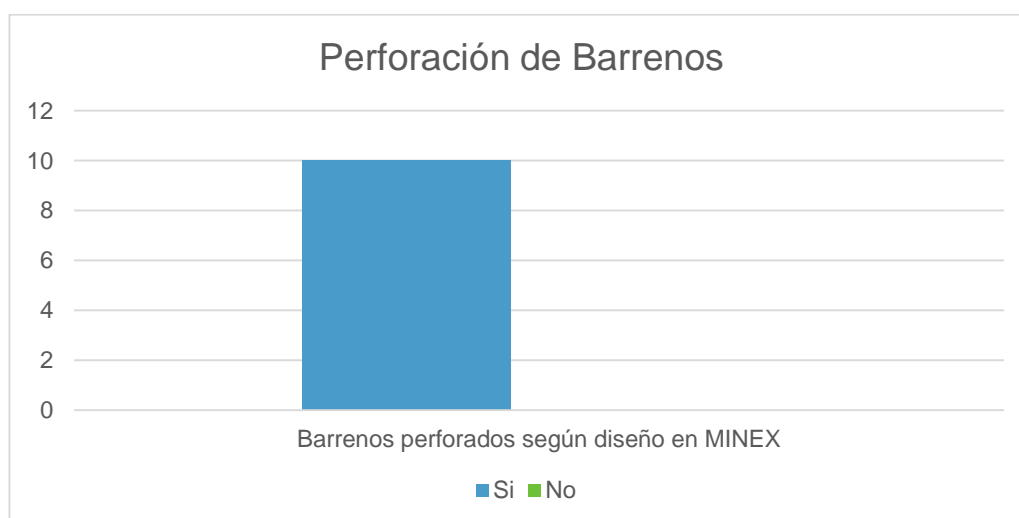
**Tabla 2. Nivel Educativo.**

El nivel educativo que prima en esta muestra es el Universitario con un 11% seguido de Bachilleres con un 39%, técnicos o tecnólogos en 50%, lo que demuestra que el personal que tiene contacto directo con el proceso de voladura, en su mayoría cuenta con el conocimiento y la capacitación necesaria. El 56% de la muestra ha laborado en la mina por más de 10 años, el 24% por 5 a 10 años y el 20% de 1 a 5 años. Para propósito del análisis se tomó como referencia únicamente al personal universitario con el que cuenta el departamento de voladura.



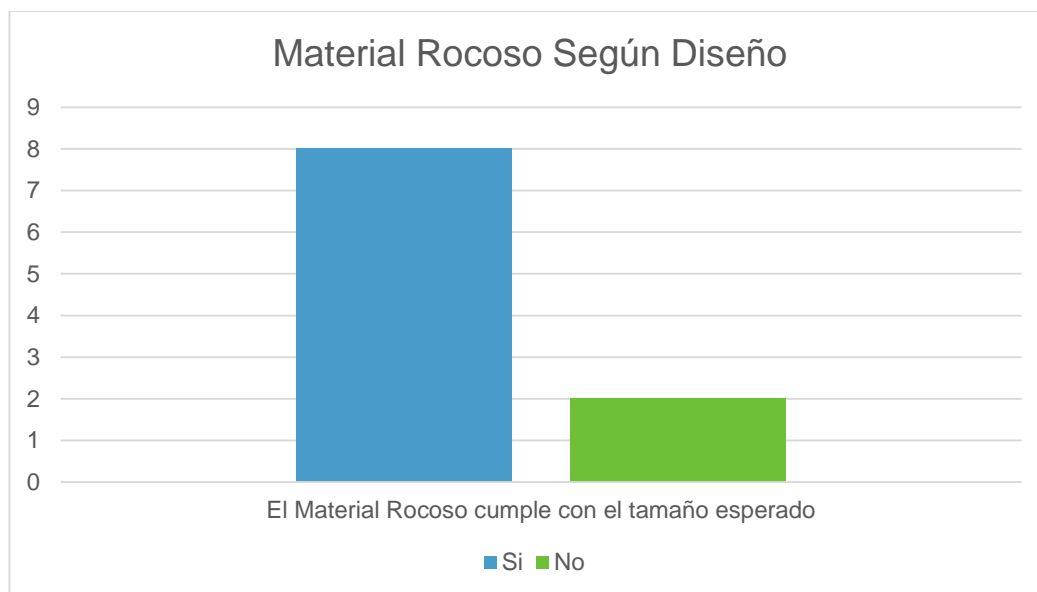
**Tabla 3. Ubicación Proporcionada.**

Durante el proceso de voladura se cuenta con el sistema MODULAR el cual brinda una solución integra en la gestión de mina, manejo de datos, ubicación y demás que compete a la mina de cielo abierto, un 100% de la muestra afirma que una de las características del sistema, que es la de ubicación para los taladros, es de fácil interpretación para los operadores, siendo esto crucial para la correcta perforación en sitio de los barrenos.



**Tabla 4. Perforación de Barrenos.**

Antes de que los taladros procedan a perforar, profesionales en el área basados en estudios previos, elaboran un diseño de perforación elaborado en MINEX, una vez elaborado es transmitido con la tecnología de MODULAR a cada computador en cada taladro, un 100% de la muestra afirma que todos los barrenos son perforados de acuerdo al diseño elaborado en MINEX.



**Tabla 5. Material Rocoso Según Diseño**

Una vez perforados los barrenos según diseño se procede a volar, una vez volado se procede a la remoción del material, un aspecto que es de alta importancia tanto en la reducción del tiempo como en el costo, es el tamaño del material rocoso, un 80% de la muestra afirma que el tamaño de la roca obtenido inmediatamente volado es el esperado para la correcta remoción y un 20% afirma que el tamaño no es el deseado para la correcta remoción, una cifra que no es muy alta y se demuestra que si se emplea un correcto uso de la emulsión se obtiene el material rocoso esperado según diseño.

Otro aspecto que es de suma importancia es la emulsión usada, debido a los diferentes cambios climáticos, se preguntó si el desempeño de la emulsión es la misma tanto en terreno seco como húmedo un 100% de la muestra confirma que la emulsión se comporta lo mismo en los dos ambientes, lo que la hace una sustancia confiable en la zona de la Guajira.

Igualmente, a través de los años la minería junto a la tecnología ha desarrollado accesorios, como el tapones y el globo, para reducir el uso de la emulsión y por consiguiente disminuir los costos en general, un 100% de la muestra se mostró en total acuerdo a que estos accesorios usados de los que hablamos en el presente trabajo, reducen el consumo y cumplen con su objetivo.

### **5.1.3. Revisión de documentación**

Durante la ejecución del proyecto se tuvo la oportunidad de revisar ciertos documentos con permiso del supervisor del departamento de voladura, como lo fueron, reportes, diarios, etc. Esto con el fin de darle un grado más alto de profundidad al análisis que se realizó en cuanto al uso del explosivo en la mina. Debido a que la información es privada de la empresa, no toda la información puede ser reportada en el presente proyecto, por lo que las cifras que se darán no son públicas, ni oficiales, sino un análisis propio de los mismos reportes, ya que, en ciertos casos, dichos valores podrían afectar la competitividad del mercado, seguridad y orden público.

### **Fatalidad en la Operación Minera**

En la revisión de los documentos y reportes que se nos permitió revisar, se encontró reportes desde el año 2000 al 2017, una vez analizados estos reportes se tabulo la información

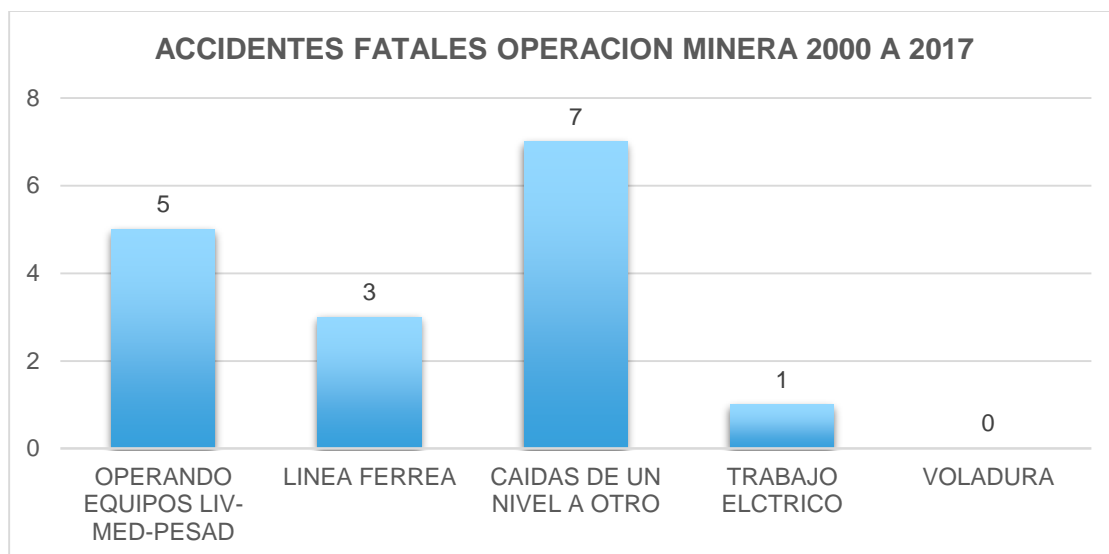
recolectada y se establecieron cuatro tipos de accidentalidades que han ocurrido dentro de la mina como se puede ver en la siguiente tabla:

### OPERACIÓN MINERA ACCIDENTES FATALES 2000 A 2017

LINEA FERREA			- VOLCAMIENTO PBV A URIBIA-TANQUERO CAE SUMIDERO - VOLM CAM BOMBRS - CAMION CAE NIVEL A OTRO			PILOTO CAE AL MAR - CAEN DE ESTRCT A 30MT DE ALTURA - TANQ PLANTA LAVADO - BANDA STAKER 1			CIRCUITO ELECTRICO KM02		
2000	1	VIGIL ANTE	2000	1	CONDUCTOR	2003	1	TRABAJD CAE BANDA	2013	1	TRABAJD ELECTRIC
2002	1	VIGIL ANTE	2000	1	OPERADOR TANQUERO	2007	1	TRABAJDOR CAE TANQUE			
2007	1	VIGIL ANTE	2000	1	OPERADOR CAMION	2010	4	TRABAJ REP SILOS			
			2008	1	TEC EMERGC	2004	1	PILOTO REMOLCAD PBV			
			2015	1	OPERADOR SALTA						
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>		<b>TOTAL</b>	<b>5</b>		<b>TOTAL</b>	<b>7</b>		<b>TOTAL</b>	<b>1</b>	

**Tabla 6. Accidentes Fatales durante la Operación 2000 a 2017 – Oscar C**

Como se pudo analizar la información recolectada han ocurrido un total de 16 accidentes fatales comprendidos en el periodo del 2000 y el 2017 como parte de la operación, pero ninguno ha sido causado por el manejo de explosivos o por la actividad de voladura.



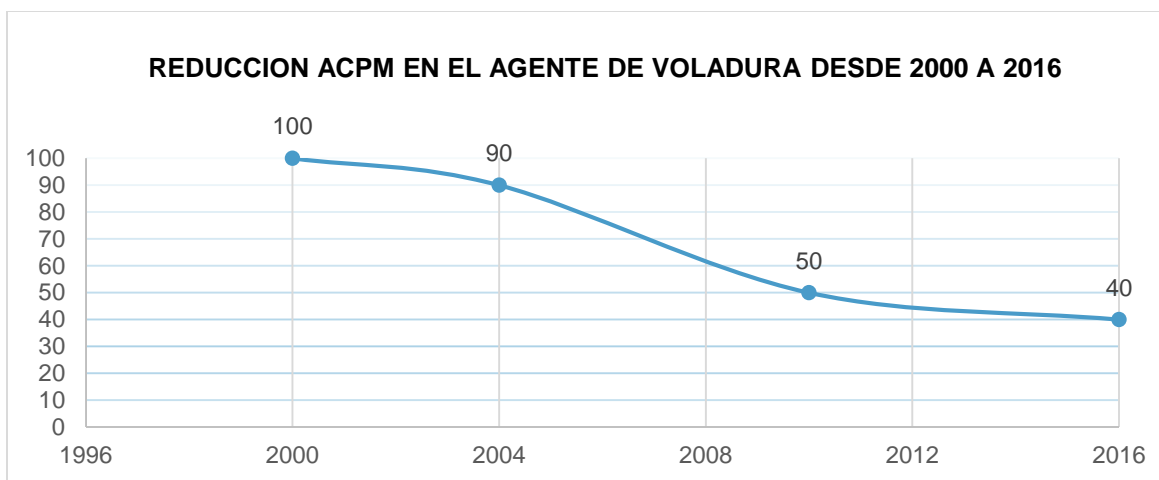
**Tabla 7. Accidentes Fatales Operación Minera – Oscar C**

Esto demuestra que la actividad de voladura en la mina del cerrejón ha sido completamente segura durante los últimos diecisiete años, no se puede corroborar la información anterior a esta fecha ya que no se cuenta con la autorización para acceder a ella.

### **Reducción de los Componentes de Agente de Voladura**

En la revisión de las actas de reuniones de los encargados del manejo del explosivo en la mina, logramos obtener datos que evidencian la reducción en los costos de uno de los componentes y del uso del agente en sí.

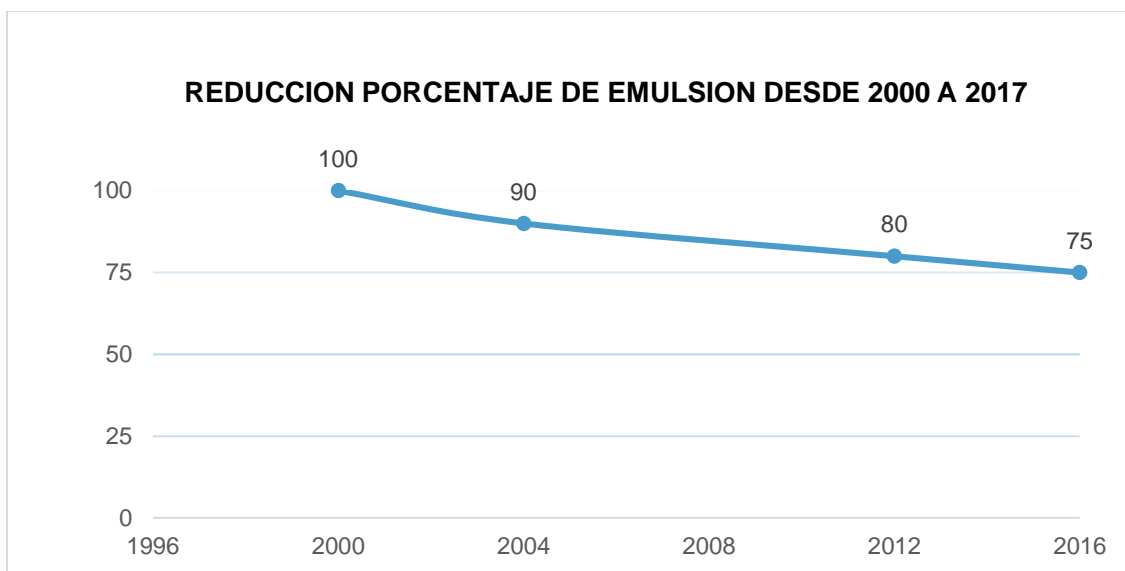
Como esta información es confidencial, los datos que se presentan en la siguiente grafica son comparativos a las cifras reales.



**Figura 13. Reducción ACPM En el agente de voladura – Oscar C**

El ACPM como uno de los componentes de la emulsión se tomó como punto para determinar que tanto ha reducido este a través de los años, Se tomó de referencia la unidad (100) haciendo relación a los gastos que a partir del año 2000 representaban el costo total del componente del agente, mostrando una disminución del 50%, como se puede ver en la gráfica en el año 2010, lo que demuestra un gran avance en reducción de costos, actualmente se ha venido trabajando continuamente para seguir reduciendo los costos, reduciendo así hasta el 60% el uso del ACPM y compitiendo así con los mercados e industrias internacionales en el uso óptimo de uno los componentes de la emulsión.





**Figura 14. Reducción Porcentaje de Emulsión 2000 a 2017 – Oscar C**

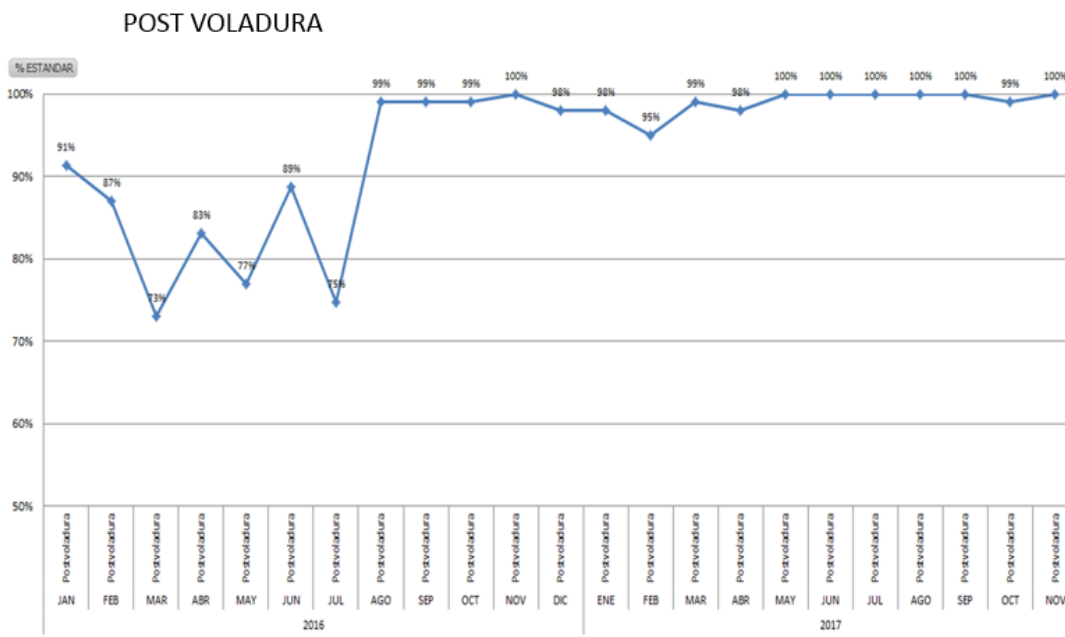
En el mismo periodo que se nos permitió revisar los documentos en el archivo de la mina, se pudo establecer una reducción significativa en el uso de la emulsión, se tomó como unidad de referencia el (100) como el porcentaje de emulsión que se usaba en el año 2000, a partir de este año en adelante, se empezó a reducir notoriamente su uso gracias a las series de investigaciones y experiencia adquirida, donde en el año 2004 la mina introdujo el uso de Accesorios como los Tapones y Globos el cual redujo al 90% el uso de emulsión, en el año 2012 aparte de los accesorios se amplió el patrón en el diseño de las voladuras, para con esto lograr reducir su uso hasta el 80%, y en el año 2016 se implementó el disparo electrónico que permite que la voladura genere una *diagonal más larga* la cual permite aprovechar la liberación de energía del explosivo gracias a que todos los estos son volados en milésimas de segundos y así reducir el uso de la emulsión a un 75%.

Como referencia en el uso de la emulsión, por cada metro de columna de cargue se gastan 47Kg de Emulsión.

## Granulometría

El personal profesional encargado de controlar la calidad del tamaño del material rocoso después de volado nos suministró los siguientes parámetros que contribuyen a garantizar el tamaño del material esperado según diseño, estos análisis y parámetros han sido implementados desde el año 2016, en aras de contribuir la remoción y cargue del material y así mismo cumplir con los sistemas de acarreo, pero lo más importante es contribuir a la reducción y optimización de la emulsión para así reducir costos en la operación.

Las siguientes graficas son un resultado del análisis posterior a la toma de evidencia fotográfica y un software especializado que analiza el tamaño de la roca para posteriormente graficar si es el deseado según diseño, debido a que el programa es de uso exclusivo del Cerrejón no se nos permitió divulgar el nombre del mismo.

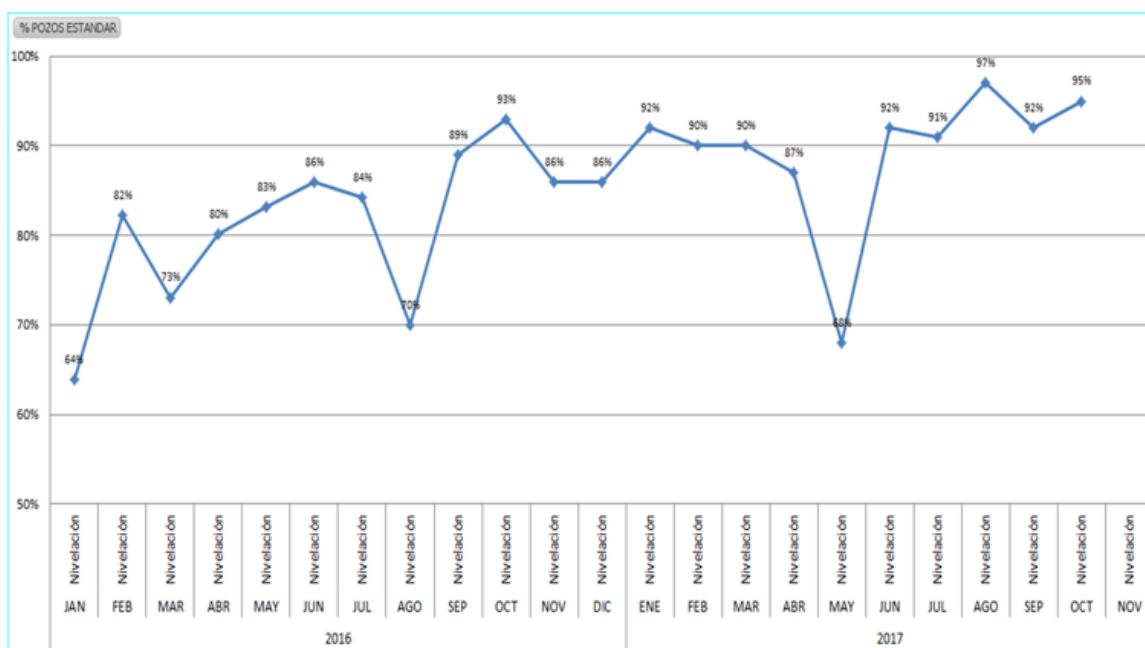


**Figura 15. Post Voladura – Oscar C**

La anterior grafica de acuerdo al resultado del software nos representa que los valores que están por encima del 80% son los aceptados según diseño y por debajo de este valor esta fuera

del parámetro de diseño, podemos evidenciar que en los últimos 15 meses a fecha de Noviembre de 2017, se está cumpliendo con el esponjamiento y el tamaño de material el cual se puede evidenciar de las tomas fotográficas realizadas por el personal especializado y análisis posterior de las mismas.

### CARGUE - NIVELACION



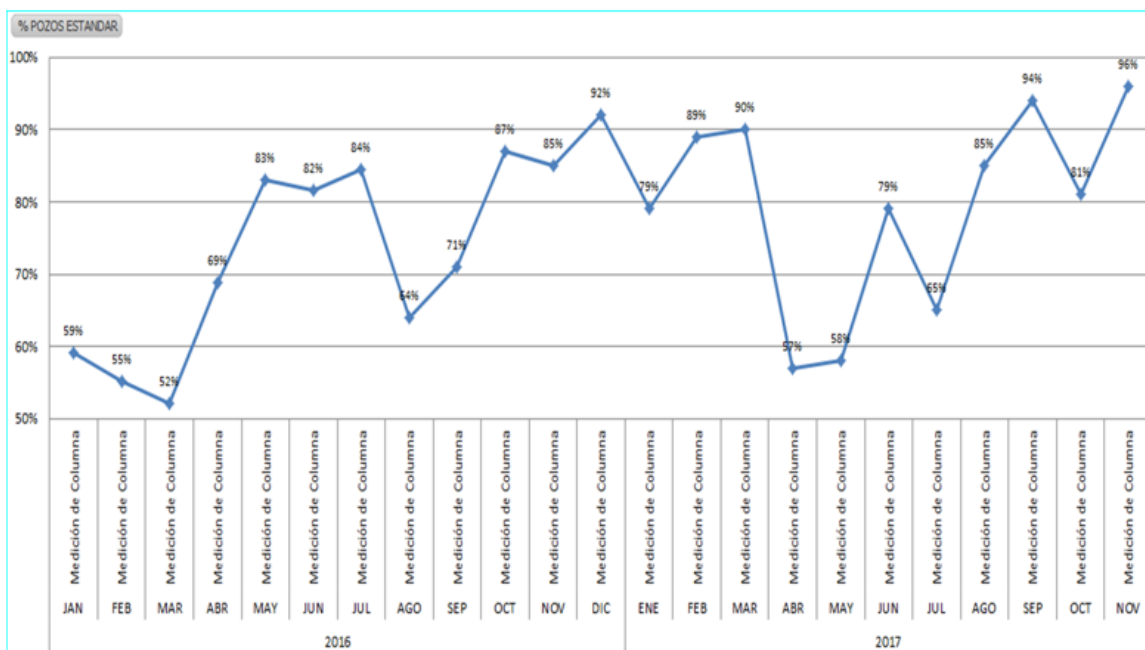
**Figura 16. Cargue y Nivelación – Oscar C**

La gráfica anterior nos representa el resultado de la comparación de dos actividades realizadas en campo, la primera es el trabajo de nivelación por el trabajador de campo, el cual toma una muestra y la envía al departamento de voladura, y la segunda actividad es realizada por el personal encargado de control de calidad los cuales realizan el mismo procedimiento de nivelación, toman muestras y envían al departamento de voladura, esta contra-verificación se realiza con el objetivo de comparar la nivelación y cumplir con los parámetros establecidos por la mina, y así tener una profundidad del barreno para optimizar los recursos que son usados en el proceso. Según los resultados obtenidos en la gráfica los valores que superan el 80% son

aceptables según diseño y los valores inferiores a esta cifra, no cumplen parámetro según diseño, lo que al final afecta el tamaño del material rocoso, después de voladura.

En la siguiente grafica podemos apreciar otro resultado del análisis tomado por el personal en campo comparándolo con los reportes del personal de control de calidad, donde nos permite evidenciar la columna de cargue realizada por el personal contra el diseño de cargue según lo planeado, en la cual los valores por encima del 80% son resultados aceptables, este parámetro ha sido un aspecto que ha estado en constante mejora ya que este es considerado un aspecto que depende 100% del personal, aunque la gráfica nos muestra porcentajes irregulares, ninguno de estos en los últimos 23 meses ha disminuido por debajo del 50%.

### CARGUE – MEDICION DE COLLARES



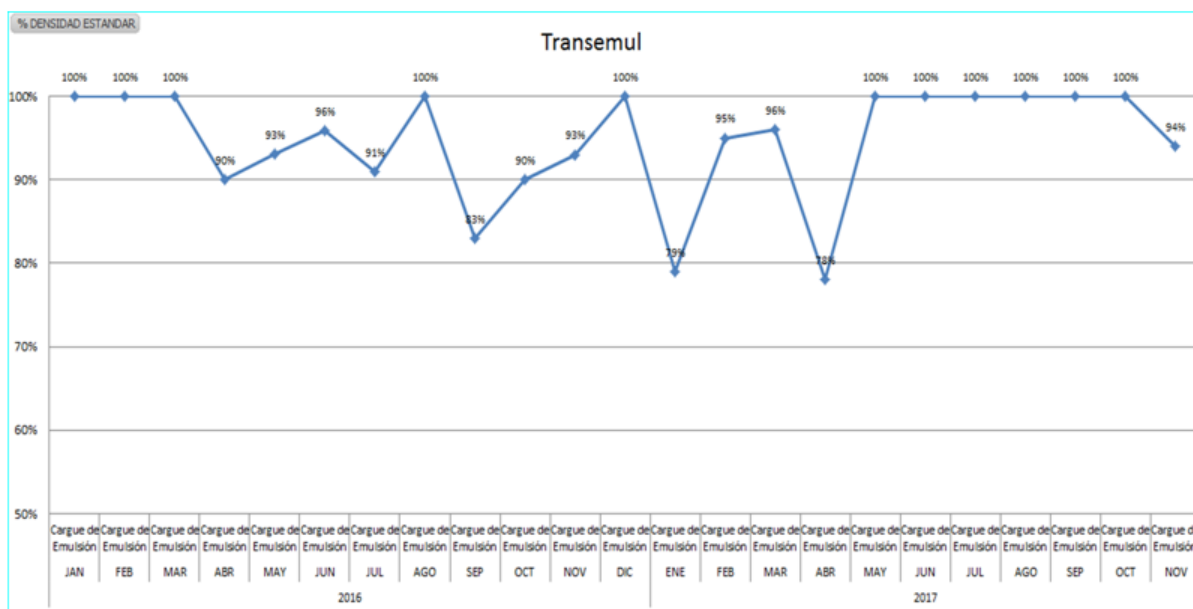
**Figura 17. Cargue y Medición de Collares – Oscar C**

En la siguiente grafica podemos apreciar otro resultado del análisis tomado por el personal en campo comparándolo con los reportes del personal de control de calidad, donde nos permite

evidenciar la columna de cargue realizada por el personal contra el diseño de cargue según lo planeado, en la cual los valores por encima del 80% son resultados aceptables, este parámetro ha sido un aspecto que ha estado en constante mejora ya que este es considerado un aspecto que depende 100% del personal, aunque la gráfica nos muestra porcentajes irregulares, ninguno de estos en los últimos 23 meses ha disminuido por debajo del 50%.

El siguiente factor fue uno de los últimos parámetros que se implementó como control en el departamento de voladura, ya que los parámetros anteriormente mencionados eran seguido rigurosamente, pero sin embargo continuaban apareciendo tamaños rocosos por fuera del diseño, lo que conllevó a que siguieran analizando y que podía eventualmente afectar el tamaño del material, llegando así a determinar que la *densidad* jugaba un papel importante en el resultado final de la muestra, por lo cual este parámetro fue añadido a los controles y análisis respectivos.

### DENSIDAD DE AGENTE EXPLOSIVO



**Figura 18. Densidad de Agente Explosivo – Oscar C**

Dicha densidad el departamento de voladura a partir de diferentes análisis estableció que el valor óptimo de la densidad debe estar entre 1,04 – 1,06 gr/cm<sup>3</sup>, después de establecido este

parámetro, se evidencio que se mejoró sustancialmente los tamaños esperados del material rocoso, de ahí que tomaron como referencia que la densidad debe cumplirse siempre por encima del 90%, como podemos evidenciar en la gráfica anterior solo 3 meses en los últimos 23 meses no se ha cumplido dicho parámetro.

### Cifras de Productividad

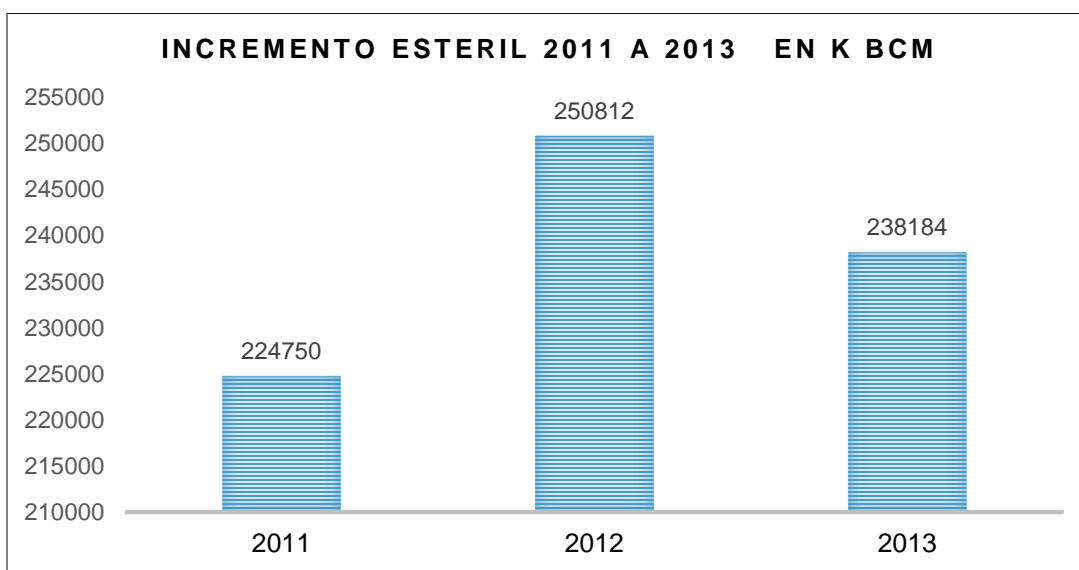
El Cerrejón para cumplir con los planes trazados utiliza una serie de controles para llevar un registro diario y poder revisar el cumplimiento en tiempo real/hora, para actuar a tiempo y reforzar el área que está generando fallas en el plan para cumplir con las metas propuestas; la siguiente figura es un pantallazo del seguimiento que se realiza en un software especializado de uso exclusivo del cerrejón, el cual por medidas de segura, se nos solicitó ser censurado. Este programa tiene en cuenta parámetros como, Volúmenes, Parámetros de Camiones, Desempeño del operador, Clima, entre otros.



Figura 19. Cifras de Producción – Oscar C

En la anterior grafica podemos apreciar el rendimiento de la producción comparada con lo planeado, la cual es identificada por Zona y Tajo, y desglosa la cantidad de Estéril y Carbón removido, graficando los resultados de la producción por hora, identificando la producción Real/Plan en un rango de <95% al >=105%, en el cual se espera estar en el rango de Real/Plan >=100% <105%

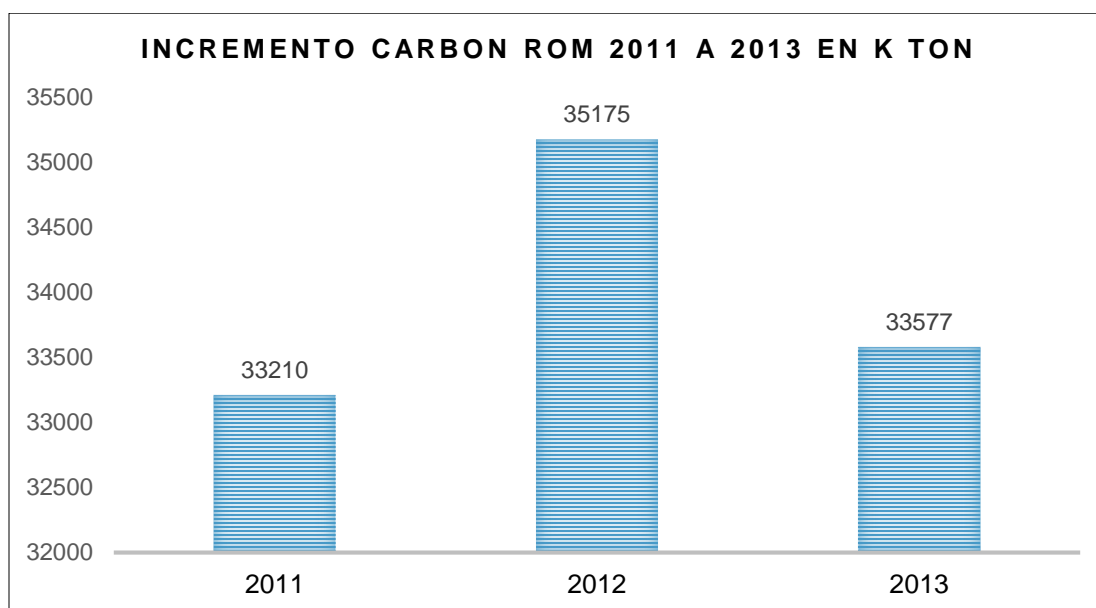
A través de los años y desde que la mina fue abierta, la producción ha venido incrementando, tanto de estéril como carbón, garantizando así que el Cerrejón sea una empresa competitiva y productiva a nivel nacional e internacional para satisfacer las necesidades de los mercados, las siguientes cifras son extraídas del Registro Histórico Anual de la producción de Estéril y Carbón.



**Tabla 8. Incremento Estéril 2011 a 2013 – Oscar C**

Para efectos de análisis la anterior tabla refleja el incremento en la producción de estéril comparada con el año inmediatamente anterior, es decir, el año 2011 fue comparado con la producción del 2010 y el valor de dicha comparación es el incremento reflejado en la anterior tabla, así mismo los dos años siguientes. Este incremento es representado en un valor

denominado K BCM, el cual representa K=Mil, B=Banco, C=Cúbico, M=Metros, esto quiere decir Mil Metros Cúbicos Banco.



**Tabla 9. Incremento Carbón 2011 a 2013 – Oscar C**

Así mismo como se mide la producción de estéril, la producción de Carbón es medida de igual forma, expresada en cifras K TON, K=Mil, TON=Toneladas, en la gráfica se puede apreciar el Carbón ROM, el cual representa el material removido de su estado natural sin ningún proceso. Como se aprecia en las tablas anteriores, año tras año la producción de Estéril y Carbón ha incrementado, lo que garantiza la productividad de los procesos y se evidencia una mejora continua que responde a que sea sostenible en el futuro.

### **Marco Jurídico**

La explotación minera hace uso de los recursos naturales los cuales son inherentes a la comunidad y al interés público como tal, esta actividad para que se desarrolle armónicamente tanto con el medio ambiente como con el talento humano que labora en la empresa debe estar



regida por diferentes normas y principio que regulen el desarrollo sostenible, garanticen medidas de seguridad durante todas las fases del proceso minero, las cuales expusimos anteriormente, y que haya un fortalecimiento económica para el ente privado y estatal.

Partiendo de que el Cerrejón utiliza explosivos para la extracción del Carbón mineral, hay una industria que juega un rol importante en la logística de la operación como lo es INDUMIL, una industria del estado que comercializa dichos productos, ya que como lo consagra el artículo 223 de la Constitución Política de Colombia, “Solo el gobierno puede introducir y fabricar armas, municiones de guerra y explosivos”.

El Cerrejón a través de los años siempre ha cumplido con las diferentes regulaciones colombianas para obtener los debidos permisos y mantener un estatus de vigilancia y seguridad que garanticen el uso correcto de estos explosivos en el desarrollo del proceso minero.

Según el Decreto 334 de 2002, establece normas en materias de explosivos, este regula ámbitos como el transporte para las materias primas, las cuales deben ser transportadas teniendo en cuenta altos grados de seguridad los cuales la mina cumple los requisitos del Artículo 16 del anterior decreto. Igualmente, la mina cuenta con un proceso de vigilancia y control de dichos explosivos, los cuales son auditados por el Departamento de Control de Comercio de Armas, Municiones y Explosivos del Comando General de las Fuerzas Militares de Colombia, esto en aras de que el material comprado sea efectivamente usado para tal fin y no caiga en manos de personal al margen de la ley que puedan afectar el orden público.

Igualmente, se cuenta con un comité de Armas del Ministerio de Defensa Nacional el cual avala las peticiones que formulen los particulares en relación con explosivos, dicho comité está conformado según el Artículo 31 del Decreto 2535 de 1993.

La Ley 685 de 2001, es el Código Minero que regula los aspectos en general de la Minería, desde los títulos mineros, cesión de derechos, gravámenes, concesiones, aspectos ambientales, regalías y demás aspectos que involucren al proceso minero.

Igualmente, ya que el proceso de la minería a cielo abierto produce una suma considerable de ganancias, la Ley 141 de 1994, establece el Fondo Nacional de Regalías y la Comisión Nacional de Regalías, la cual otorga al estado el Derecho a la explotación de recursos naturales no renovables con el propósito de la preservación del medio ambiente, a través de los años el Cerrejón ha cumplido con su parte y aportado cerca de 10.6 Billones de pesos según cifras divulgadas por el presidente de la compañía, en el año 2016, desde que dicha regulación fue promovida, no solo demostrando con esta suma la sostenibilidad que tiene la compañía sino el aporte que se le brinda al departamento de la Guajira y la Nación.

Así mismo, la minería es considerada como una actividad de alto riesgo, por esto, el Decreto 2090 de 2003 otorga ciertas condiciones, requisitos y beneficios del régimen de pensiones a los trabajadores que laboran en dichas actividades.

## **5.2. Discusión de los resultados**

El proceso de la voladura en su largo recorrido (más de treinta años) ha evolucionado enormemente desde su inicio hasta nuestros tiempos, ya que se inició con el uso de la dinamita convencional y con métodos totalmente manuales hasta hoy con el uso de múltiples agentes explosivos (emulsión, anfor, entre otros) totalmente seguros y su uso avalado respectivamente por las entidades estatales, la ayuda del sistemas GPS y manejo de comunicaciones vía RF que han hecho que este proceso sea totalmente rentable y seguro; prueba de esto es que durante sus

más de treinta años de operación minera nunca han sufrido accidentes fatales por causa de la voladura y en las encuestas los empleados del complejo carbonífero lo ratifican.

Igualmente se aprecia que para la extracción del carbón mineral juega un papel fundamental el uso de explosivos el cual contribuye a remover grandes masas de material rocoso el cual sería imposible y poco rentable sin la ayuda de la voladura y las emulsiones que se usan actualmente. También se pudo establecer que el proceso de granulometría ha venido perfeccionándose a través de la practica-error y a partir de los demás análisis que se han realizado como el esponjamiento, la profundidad y cargue de los barrenos y la densidad de la emulsión todos estos con un rango respectivo que la mina procura en lo mayor de lo posible cumplir a cabalidad dichos umbrales, igualmente estos análisis procuran que el proceso de remoción y cargue funcionen en armonía sin retrasar el proceso de extracción; lo más importante de todo lo mencionado anteriormente, es que el Cerrejón tiene como fundamento la seguridad para sus empleados, y en el día a día se demuestra por medio de las capacitaciones y se corrobora según el reporte de fatalidades desde el año 2000 al 2017 que durante el proceso de voladura no ha ocurrido ningún accidente fatal.

De acuerdo con los datos adquiridos de las encuestas y la información recolectada en las visitas a campo se determina que las personas que hacen parte de la voladura son profesionales o tecnólogos lo que hace que el proceso esté dirigido por personas con conocimiento lo que puede llevar a que estos creen o generen estrategias para agilizar el proceso o reducir los costos en el mismo.

Durante las visitas realizadas se determinó que el sistema usado MODULAR es de esencial uso para la agilidad del proceso, ya que este juega un rol desde el diseño, perforación, voladura, remoción, cargue y disposición final del carbón mineral, pero no solo este sistema hace parte de esta gran operación, ya que hay una gran conjunto de software especializado que es usado para

medir el hora-hora de la mina, para así determinar si se está cumpliendo con lo esperado o hay oportunidad de mejora, ya que como lo pudimos evidenciar, el Estéril y Carbón producidos en la mina, asciende cada vez más a través de los años.

También se notó que las emulsiones usadas son de alta calidad y en compañía de diferentes elementos, reducen enormemente el costo de la perforación y debido a la gran sensibilidad de esta sustancia el material que se usa para volarlo es poco y la reacción con lleva a obtener una granulometría que es fácil de remover y es obtenida según lo diseñado en el programa MINEX, igualmente se pudo determinar que los diferentes análisis que realiza la mina en la reducción de los componentes del agente explosivo, como el ACPM, ayuda enormemente a la reducción del costo global de la emulsión; lo cual se evidencio con una reducción del 35% desde el año 2000 al 2017, gracias a diferentes accesorios como el globo y el taponex, patrones más amplios y la inclusión del disparo electrónico.

La minería podríamos decir que se encuentran en el boom tecnológico, pero gracias al personal con que se cuenta, se espera que nuevas ideas y estrategias provenientes de los empleados sean implementadas, hay que también tener en cuenta que la mina del Cerrejón produce gran parte de las regalías que recibe el departamento y el país por lo cual mayor atención y compromiso se debe dedicar a esta área para el progreso hacia el futuro.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del anterior proyecto se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Los procesos que actualmente implementa la mina del Cerrejón, corresponden a las necesidades actuales del proceso minero, disminuyendo gastos, ahorrando tiempo, proporcionando efectos positivos como la generación de empleo de los locales, regalías para la nación y el compromiso que se tiene con la recuperación de la fauna y flora del entorno después de su explotación.
- Se pudo determinar que la granulometría obtenida si corresponde a la deseada y se ha llegado a ese punto por la mejora de todos los procesos que abarcan la voladura como, los tipos de roca, agentes, densidad de las emulsiones, detonantes, perforación usada, entre otros aspectos y por ende el manejo posterior del mismo cumple con los tiempos esperados de remoción y cargue del material.
- Se motiva a mas Ingenieros Civiles a que indaguen a fondo el proceso de voladura con explosivos en las minas de Colombia ya que es un tema que no ha sido popularmente tocado y necesita serlo, no solo por el conocimiento de las técnicas, métodos y todo lo concerniente al proceso que es de suma importancia para competir con las economías de países emergentes si no por el gran rendimiento que genera.

## BIBLIOGRAFIA

Cabrera, Mauricio y Julio Fierro. (2013). *“Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista en Colombia”*. En: L. J. Garay (Director) *Minería en Colombia: derechos, políticas públicas y gobernanza*, Contraloría General de la Republica, Bogotá, 2013.

Castilla, J., G, y Herrera, J., H. (2011). *Modelización de Parámetros de Voladura para la Optimización del Proceso Minero: La Voladura Computarizada*. Quito: X Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción.

Cueva, O., A. (2015). *Técnicas Modernas en Voladuras Controladas en Minería a Cielo Abierto*. Arequipa: Perumin 32 Convención Minera.

DANE. *Censo General 2005*, Bogotá, 2006.

Díaz, J. C., M, Guarín, M. A., A, & Jiménez-Builes, J. A. (2012). *Análisis y Diseño de la Operación de Perforación y Voladuras en Minería de Superficie Empleando el Enfoque de la Programación Estructurada* (Vol. 32). Medellín: Boletín Ciencias de la Tierra.

Güiza, L., Suárez. (2011). *Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia\**. Medellín: Universidad de Medellín.

Hall, Robert y Charles H. Jones. (1998). *“Why do some countries produce so much more output per worker than others?”*; NBER working paper 6564.

Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2004). *El Carbón Colombiano: Recursos, Reservas y Calidad*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Minería.

Jorge, D. *Actitud Positiva*. Panamericana S.A. Bogotá

Konya, C., Albarrán, E., (1998). *Diseño de Voladuras*. Cuicatl

Madrid, A. A., Carrasco. (2015). *Determinación de granulometría y estrategia de extracción de material minero para un LHD minero por medio de mediciones laser*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Mancera, N. J., Rodríguez, & Álvarez, R., León. (2006). *Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia*. 1st ed., Vol. 11). Acta Biológica Colombiana.

Perry, Guillermo y Mauricio Olivera. (2010). El impacto del petróleo y la minería en el desarrollo regional y local en Colombia. Fedesarrollo.

Perry, G., y Olivera, M. (2009). El Impacto del Petróleo y la Minería en el Desarrollo Regional y Local en Colombia. Caracas: CAF.

Persson, P., Holmberg, R., & Lee, J. (1993). *Rock Blasting and Explosives Engineering* (1st ed.). CRC Press.

Pineda, J. E., P. (2011). *La Ecología en Colombia: Relación, Impactos y Atenuación con los Sectores Minero, Energético y Portuario* (7th ed.). Bogotá: Revista de Investigaciones.

Ramos, L., (2016) *Optimización de la Ejecución de Galerías y Cruceros en la Mina Ana Maria Mediante Estandarización de Perforación y Voladura*. Perú, Universidad Nacional del Altiplano

Rehak, T., Bajpayee, T., Mowrey, G., & Ingram, D. (2001). *Flyrock Issues in Blasting*. Retrieved October 10, 2016, from <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/fiib.pdf>

Stake, R. (1995). *The art of case research*. Newbury Park, CA: Sage Publications.

Yin, R. K. (2003). *Case study research: Design and methods* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

Yin, R. K. (1984). *Case study research: Design and methods* (1st ed.). Beverly Hills, CA: Sage Publishing.



## ANEXOS

## Anexo 1. Cronograma de trabajo.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																								
MES / SEMANA	ENERO				FEBRE RO				MARZ O				ABRIL				MAYO				JUNIO			
ACTIVIDADES	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Encuestas poblaciones aledañas																								
Visita técnica día explosivos																								
Encuesta personal explosivos																								
Revisión documentos archivados y planes de trabajo																								
Reunión con el tutor																								
Análisis de datos y elaboración del informe final																								
Porcentaje desarrollado y faltante	Desarrollado: 100%																							

Tabla 1

**Anexo 3. Evidencia Fotográfica, Visitas técnicas (Fuente Oscar Carrillo).**



## Anexo 4. Encuesta Personal de Explosivos.

### ENCUESTA PERSONAL DE EXPLOSIVOS

#### FORMATO DE CONSENTIMIENTO

Esta encuesta está realizada por OSCAR WILLIAMS CARRILLO DUARTE, estudiante de décimo semestre de Ingeniería Civil de la UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA. Para la investigación titulada: “ESTUDIO DE CASO SOBRE LA EXTRACCIÓN DEL DEL CARBÓN MINERAL CON USO DE EXPLOSIVOS EN LA MINA A CIELO ABIERTO CERREJÓN, COLOMBIA.” Su participación en esta encuesta es voluntaria, usted puede negarse a participar o contestar en cualquier momento sin ninguna penalidad; usted no recibirá un beneficio directo por participar en esta investigación, sin embargo, se podrá obtener un beneficio a futuro en la comunidad; no hay riesgos previsibles involucrados en la participación de este estudio, su nombre, correo electrónico y otra información que lo identifique quedara en anonimato, nadie podrá identificarle por medio de sus respuestas y nadie sabrá que participo en ella; la encuesta tendrá una duración de 15 minutos aproximadamente; Si tiene una pregunta en cualquier momento sobre la investigación o el procedimiento se puede contactar con el tutor del proyecto, CESAR AUGUSTO LOPEZ QUINTERO en el correo electrónico: [cesar.lopez@unimilitar.edu.co](mailto:cesar.lopez@unimilitar.edu.co), o en el correo del investigador: [d7301666@unimilitar.edu.co](mailto:d7301666@unimilitar.edu.co)

**Nombre:** \_\_\_\_\_

**Correo Electrónico:** \_\_\_\_\_

**Firma:** \_\_\_\_\_

1. Edad

18 a 28 años     29 a 39 años     40 a 59 años     más de 60 años

2. Sexo

M     F

3. Nivel de educación

Primaria  
 Bachiller  
 Técnico o Tecnólogo  
 Universitario

4. ¿Cuánto tiempo lleva laborando en el departamento de explosivos?

Menos de 1 año  
 1 a 5 años  
 5 a 10 años  
 más de 10 años

5. ¿Considera usted que la ubicación proporcionada por MODULAR es de fácil interpretación para los operadores de los taladros?

\_\_\_ Sí \_\_\_ No

6. ¿El sistema MODULAR contribuye al rendimiento de la perforación de barrenos?

\_\_\_ Sí \_\_\_ No

7. ¿Todos los barrenos son perforados de acuerdo al diseño elaborado en MINEX?

\_\_\_ Sí \_\_\_ No

8. ¿Después de disparada la voladura, el material rocoso cumple con el tamaño esperado para ser removido fácilmente?

\_\_\_ Sí \_\_\_ No

9. ¿Cree usted que el desempeño de la emulsión tanto en terreno seco como húmedo es el mismo?

\_\_\_ Sí \_\_\_ No

10. ¿Los accesorios usados para reducir el consumo de emulsión cumplen su objetivo?

\_\_\_ Sí \_\_\_ No