

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **Diseño de un sistema de clasificación granulométrico para el carbón mineral, empleado en Loma de Níquel, estado Miranda.**

**Trabajo Especial de Grado presentado ante la  
Ilustre Universidad Central de Venezuela  
por la Bachiller Yuleidy Elena Herrera  
para optar al Título de Ingeniera de Minas**

**Caracas, junio 2014**

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **Diseño de un sistema de clasificación granulométrico para el carbón mineral, empleado en Loma de Níquel, estado Miranda.**

**TUTOR ACADÉMICO: Profa. Katherine Silva**

**CO-TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Luis De Abreu**

**TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Luis Gómez**

**Trabajo Especial de Grado presentado ante la  
Ilustre Universidad Central de Venezuela  
por la Bachiller Yuleidy Elena Herrera  
para optar al Título de Ingeniera de Minas**

**Caracas, junio 2014**

## **DEDICATORIA**

---

Este Trabajo Especial de Grado está dedicado a ti mamá, Cruz Elena Herrera, por tu apoyo incondicional, por tu amor, por confiar siempre en mí, por tus sabios consejos, y por la formación humana y académica que me diste, sin ti no lo hubiese logrado. Tu esfuerzo se ha convertido hoy en tu triunfo y el mío, espero haber cumplido uno de tus sueños.

Te Amo Profundamente!

## AGRADECIMIENTOS

---

A Dios por permitirme vivir y por cruzar en mi vida personas maravillosas.

A mi mamá por ser la mejor madre y padre del mundo. Por su infinita paciencia y amor. Por cada consejo que me diste y por tu apoyo incondicional. Gracias a ti soy lo que soy. Simplemente la vida no me alcanzará para agradecerte todo lo que has hecho por mis hermanos y por mí.

A ti, tía Mirian que en cualquier lugar de donde estés, indudablemente sé que estas orgullosa de mi. Haces falta!

A mis hermanos, Yorjan y Eduardo, que han sido mi pilar de apoyo, que gracias a ellos han sido mi lucha por ser una mejor persona para que caminen a mi lado. Los amo.

A mis hermanas Nay y Naza, por su amistad y apoyo incondicional. Y dándole gracias a Dios por permitir haberlas conocido. Nunca es tarde!

A mis tíos y familia, en especial a mi tío Juan y a mi tía Ana, por su valioso apoyo incondicional.

A la UCV, por permitirme ser parte de esa gran casa, además, al Departamento de Minas por abrirme las puertas y confiar en mí.

A mi tutora, la Profa. Katherine Silva, por la orientación, el seguimiento, la paciencia y la supervisión continúa de este Trabajo. Gracias por todo su tiempo invertido en la elaboración de esta tesis.

A mi co-tutor, el Prof. José Luis De Abreu, por sus sabios consejos y colaboración en todo momento.

Al Prof. Miguel Castillejo por su disposición y apoyo incondicional, y recomendaciones brindadas y además, por hacer de los días de ensayos, ratos agradables.

A mis profesores de Departamento de Minas, Aurora, Alba, Omar, Spic, José Luis Contreras, María Eugenia, Isidro y a José Duque por sus enseñanzas durante mi formación académica. Así

como también a los profesores del Departamento de Geología, Alezones, Mauricio Bermúdez y Ander por ser parte de mi formación.

Muy agradecida con la empresa Loma de Níquel por darme la oportunidad de realizar el Trabajo Especial de Grado y formar parte de ella.

A mi tutor industrial, Ing. Luis Gómez por su apoyo incondicional y colaboración brindada.

Al equipo de la Gerencia de Procesos y aseguramiento de calidad por las asesorías brindadas y colaboración. En especial a Gheison, Joseph, Miguel, Jean, Jesús, y los demás muchachos.

A la Gerencia de Mina por su apoyo incondicional, en especial al Ing. José Luis Barbieri por sus sabios consejos, al Ing. Luis Bolívar por su apoyo y por confiar en mí en todo momento, al Ing. Jorge Andrade por sus enseñanzas y consejos, y además, a los Ing. Jaime Noguera y al Ing. Gerardo Ávila por su apoyo brindado. Así como también, al Ing. Ángel Hinestroza, al Ing. Jesús Romero por sus enseñanzas. Igualmente a Yorman, Henbelk, Ramón, Renzo, Calderón, Lili, Julián, Evelio, y a cada una de aquellas personas de la Gerencia que me ayudaron en todo momento y que nunca faltaba un instante para hacerme sonreír.

A la familia Marrero por brindarme su apoyo incondicional.

A mis hermanos, amigos y compañeros fiel durante toda la carrera universitaria, Yury y Ángel por su amistad, paciencia, apoyo incondicional y por esta lucha para ser Ingenieros. Los amo.

A mis brujas, María G, Sasha, Denise y Ari, por formar parte de mi vida, y por su apoyo incondicional. Las adoro!

A mis amigas: Nory, Eglis, Yusmari, Dulce, Yenifer y Rissbel por su amistad y por formar parte de mi vida. Las adoro!

A mis amigos, Johan, Ramón, Vicente, Elías y Eduardo, Enyer, Carlos Rodríguez, Carlos Guerrero, José Carrero, José, Zule, Néstor, Juancho, Daniel, Manuel, Guaji, Elio, Ricardo, Grillet, Fiorella, Mariano, Frank y Luis. A Josefa, Marino, la Sra. Morella, María Teresa, Yoleida, y a todas esas personas que de alguna forma estuvieron durante mi formación universitaria.

## RESUMEN

---

**Yuleidy Elena Herrera**

### **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICO PARA EL CARBÓN MINERAL EMPLEADO EN LOMA DE NÍQUEL, ESTADO MIRANDA.**

**Tutor Académico: Profa. Katherine Silva. Co-Tutor Académico: Prof. José L, De Abreu.  
Tutor Industrial: Ing. Luis Gómez.**

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.**

**Departamento de Minas. Año 2014, 152 p.**

**Palabras clave:** Carbón, criba, granulometría, finos, Loma de Níquel.

**Resumen:** Loma de Níquel se encuentra ubicada en la nueva vía Tiara, en el estado Miranda, es una empresa dedicada a la extracción y producción del níquel, que utiliza el carbón mineral como reductor del hierro presente en el mismo. El objetivo principal del estudio, fue diseñar un sistema de clasificación granulométrico para el carbón mineral, empleado en dicha empresa.

Para realizar dicho sistema, se procedió en primer lugar a estudiar la situación actual de la empresa, analizando los datos, de la granulometría y humedad de los carbones empleados anterior y actualmente, suministrados por la Gerencia de procesos y Aseguramiento de calidad, para obtener discrepancias o similitudes entre ellos, así como también, se le realizaron ensayos mecánicos de resistencia a la compresión simple y de desgaste progresivo a dicha roca y a su vez ensayos granulométricos, para tenerlos como referencia en el diseño del sistema.

Se emplearon cuatro (4) métodos para la obtención de la superficie de cribado, donde se tomó como resultado el valor obtenido mediante la aplicación del método Híbrido, por ser el más confiable, debido a los factores de corrección que se emplean en el mismo. A partir del valor obtenido del método (área de cribado), se calcularon todos los parámetros que complementan el diseño del sistema de clasificación granulométrico, tales como: la capacidad de la tolva a suministrar el material a dicha criba y las bandas transportadoras para acarrear dicho material hasta la zona de descarga. Por último, se estimaron los costos de los equipos involucrados en dicho sistema, para tener una aproximación de lo que podría ser la inversión total.

Para que el sistema de cribado sea lo más eficiente posible, la empresa debe construir la criba, ya que las que existen en el mercado, están sobre estimada o por debajo de los requerimientos necesarios.

## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, junio 2014

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Minas, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Yuleidy Elena Herrera., titulado:

**“Diseño de un sistema de clasificación granulométrico para el carbón mineral empleado en Loma de Níquel, estado Miranda”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniera de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**.

---

**Jurado**  
**Profa. María Teresa Artigas**  
**Jurado**



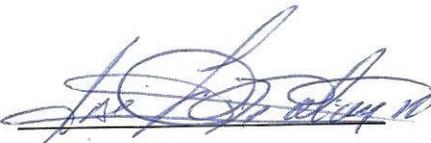
---

**Jurado**  
**Prof. Carlo Di Yorio**  
**Jurado**



---

**Tutora Académica**  
**Profa. Katherine Silva**



---

**Co Tutor Académico**  
**Prof. José Luis De Abreu**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
RESUMEN .....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	2
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.2.1. <i>Objetivo General</i> .....	2
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
CAPÍTULO II .....	4
GENERALIDADES DE LA EMPRESA.....	4
2.1. <i>Ubicación geográfica</i> .....	4
2.2. <i>Reseña histórica</i> .....	5
2.3. <i>Geología regional</i> .....	6
2.4. <i>Geología local</i> .....	8
2.5. <i>Proceso de producción del ferroníquel en Loma de Níquel</i> .....	11
2.6. <i>Uso del carbón mineral en Loma de Níquel</i> .....	15
2.7. <i>Manejo y procesos del carbón mineral dentro de Loma de Níquel</i> .....	16
2.7.1 <i>Descarga del carbón mineral y toma de muestras</i> .....	16
2.7.2. <i>Traslado del carbón mineral a Planta de carbón</i> .....	19
2.7.3. <i>Traslado del carbón mineral a Planta de trituración</i> .....	21
CAPÍTULO II .....	23
MARCO TEÓRICO.....	23
3.1 <i>Carbón mineral</i> .....	23
3.1.1 <i>Generalidades</i> .....	23
3.1.2 <i>Tipos de carbón:</i> .....	23
3.1.3 <i>Propiedades físicas y mecánicas del carbón mineral</i> .....	24
3.1.4 <i>Preparación del carbón</i> .....	26
3.1.5 <i>El carbón en Venezuela</i> .....	27
3.1.6 <i>Principales productores de carbón en Venezuela</i> .....	28
3.1.7 <i>El carbón en la producción de ferroaleaciones y sus usos</i> .....	28
3.2 <i>Cribas</i> .....	29
3.2.1 <i>Tipos de Cribas según las operaciones de clasificación</i> .....	30
3.2.2 <i>Control de las dimensiones</i> .....	31

3.2.4 Factores que afectan el cribado.....	33
3.3 Diseño de cribas .....	33
3.3.1 Cálculo de la superficie de cribado.....	35
3.3.2 Parámetros para la selección de una criba.....	54
3.4 Tipos de cribas sugeridas para el carbón.....	57
3.4.1 Generalidades.....	57
3.4.2 Sistema de cribado de carbón.....	57
3.5 Cintas transportadoras.....	58
3.6 Resistencia a la fragmentación.....	63
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>64</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>64</b>
4.1 Tipo de investigación.....	64
4.2 Diseño de la investigación.....	64
4.3 Población y muestra .....	66
4.3.1 Descripción de las tomas de material.....	67
4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de los datos .....	67
4.4.1. Situación actual del carbón mineral empleado en la empresa.....	67
4.4.2 Levantamiento de la información en campo.....	68
4.4.3 Ensayos de laboratorio para determinar parámetros físicos y características mecánicas del carbón mineral.....	68
4.4.4 Cálculos pertinentes para la selección del sistema de cribado.....	74
4.6. Estimación de costo .....	77
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>78</b>
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>78</b>
5.1 Situación actual de las condiciones granulométricas del carbón mineral.....	78
5.1.2 Contenido de humedad presente en el carbón mineral.....	80
5.1.3 Riesgo de incendio en el silo del carbón.....	83
5.2 Ensayos mecánicos:.....	85
5.2.1 Ensayo de Slake Durability.....	85
5.2.2 Resistencia a la compresión simple .....	88
5.3 Granulométrica del carbón en el período mayo-agosto de 2013.....	93
5.4 Cálculos pertinentes para el diseño del sistema de cribado.....	97
5.4.1 Tamaño del producto .....	97
5.4.2 Tasa de alimentación para la criba.....	99
5.4.3 Calculo de la capacidad de la tolva de almacenamiento para carbón mineral .....	101
5.4.4 Calculo de la superficie de cribado.....	105
5.4.5 Cálculos para la determinación de los parámetros de las cintas transportadoras.....	120
5.5 Estimación de costos del sistema de cribado.....	134
5.5.1 Costo de la Tolva.....	134
5.5.2 Costo de la Criba propuesta.....	134
5.5.3 Costos de las bandas transportadoras.....	137

CONCLUSIONES.....	139
RECOMENDACIONES.....	141
BIBLIOGRAFÍA.....	142
ANEXO 1.....	145
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	146
APÉNDICE A.....	150
APÉNDICE B.....	151
APÉNDICE C.....	152

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA EMPRESA LOMA DE NÍQUEL.....	4
FIGURA 2. EXTENSIÓN GEOGRÁFICA DEL COMPLEJO OFIOLÍTICO. IMAGEN DE RADAR.....	6
FIGURA 3. PERFIL LITOLÓGICO DEL SUELO.....	10
FIGURA 4. CONFORMACIÓN DE LOS CHEVRONES.....	12
FIGURA 5. PILA DE HOMOGENIZACIÓN.....	12
FIGURA 6. DIAGRAMA DE PRODUCCIÓN DEL FERRONÍQUEL.....	15
FIGURA 7. DESCARGA DEL CARBÓN MINERAL EN PATIO EXTERNO A.....	17
FIGURA 8. ILUSTRACIÓN DE LA TOMA DE MUESTRA DEL CARBÓN MINERAL EN LAS PILAS.....	18
FIGURA 9. ÁREAS DE DESCARGAS Y DESTINOS DEL CARBÓN MINERAL DENTRO DE LA EMPRESA LOMA DE NÍQUEL.....	18
FIGURA 10. CRIBAS VIBRATORIAS DE CARBÓN. MARCA MAVI, MODELO CALHA VIBRAT. VICAL - A. 550x1500 / RV. CON UNA LUZ DE APROXIMADAMENTE 105 MM.....	19
FIGURA 11. VISTA LATERAL DE LA TRITURADORA.....	20
FIGURA 12. VISTA DESDE ARRIBA DE LOS RODILLOS SUPERIORES.....	20
FIGURA 13. ILUSTRACIÓN FRONTAL DE LA PILA DE HOMOGENIZACIÓN DE MINERAL CON LOS VALLES DE CARBÓN MINERAL DE COLOR NEGRO.....	21
FIGURA 14. ZONAS CARBONÍFERAS DE VENEZUELA.....	27
FIGURA 15. REPRESENTACIÓN DE LA LUZ DE MALLA Y EL DIÁMETRO DEL ALAMBRE.....	32
FIGURA 16. IMÁGENES DE LAS PANTALLAS GENERADAS POR A) UN PROGRAMA BASADO EN ELEMENTOS FINITOS, B) PROGRAMA DE CONTROL DE LA OPERACIÓN DE CRIBADO.....	35
FIGURA 17. DATOS TÍPICOS DE CAPACIDAD UNITARIA PARA UNA CRIBA VIBRATORIA.....	43
FIGURA 18. VALORES TÍPICOS DE LOS FACTORES DE CRIBADO DEL MATERIAL DEL SOBRETAMAÑO $K_3$ Y DE MEDIA ABERTURA $K_2$ .....	44
FIGURA 19. VALORES TÍPICOS DEL FACTOR DE EFICIENCIA $K_4$ .....	45
FIGURA 20. CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA DE CRIBADO A ESPESOR CONSTANTE DE LOS FINOS DE CARBÓN MINERAL HÚMEDO.....	48
FIGURA 21. CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA DE CRIBADO A TIEMPO CONSTANTE DE LOS FINOS DE CARBÓN MINERAL HÚMEDO.....	49
FIGURA 22. TIPOS DE CRIBAS SUGERIDAS PARA EL CARBÓN.....	57
FIGURA 23. ETAPAS DEL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	65

FIGURA 24. UBICACIÓN DE LOS PATIOS EXTERNOS Y EL ÁREA 380, DONDE ALMACENAN EL CARBÓN MINERAL. CORTESÍA DE LA EMPRESA LOMA DE NÍQUEL.....	66
FIGURA 25. PARÁMETROS FÍSICOS DEL MATERIAL A CRIBAR PARA EL DISEÑO O SELECCIÓN DE UNA CRIBA.....	68
FIGURA 26. BALANZA METTLER P2010. CORTESÍA DEL LABORATORIO DE BENEFICIO DE MINERALES, ÁREA QUÍMICA, FI, UCV. ....	70
FIGURA 27. BALANZA DIGITAL OHAUS. CORTESÍA DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS, FI-EGMG, UCV. ....	70
FIGURA 28. BATERÍA DE TAMICES. CORTESÍA DEL LABORATORIO DE BENEFICIO DE MINERALES FI, UCV. ....	71
FIGURA 29. FIGURA 30. SACUDIDOR DE TAMICES. CORTESÍA DEL LABORATORIO DE BENEFICIO DE MINERALES FI, UCV.....	71
FIGURA 31. IMAGEN DEL EQUIPO UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE <i>SLAKE DURABILITY</i> . CORTESÍA DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS, FI-EGMG, UCV.....	72
FIGURA 32. EQUIPO DE CARGA PUNTUAL. CORTESÍA DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS, FI-EGMG, UCV. ....	74
FIGURA 33. ESQUEMA DE LOS PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO DE UNA CRIBA .....	75
FIGURA 34. GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRÍA DEL CARBÓN DE LOS MATERIALES B Y A1.....	79
FIGURA 35. PORCENTAJE DE HUMEDAD PRESENTES EN EL CARBÓN MINERAL DE LOS PROVEEDORES ANTERIORES Y EL PROVEEDOR ACTUAL, ENTRE EL PERÍODO 2010-2013.....	81
FIGURA 36. PORCENTAJES DE AGUA PRESENTES EN EL CARBÓN MINERAL DEL PROVEEDOR B ENTRE EL MES DE MAYO Y AGOSTO .....	82
FIGURA 37. IMAGEN TERMOGRÁFICA DEL SILO DE CARBÓN .....	84
FIGURA 38. TOLVA DE CARBÓN DE LA EMPRESA LOMA DE NÍQUEL.....	84
FIGURA 39. PÉRDIDAS DE MASA DE CARBÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS EN MEDIO SECO Y EN AGUA .....	87
FIGURA 40. MUESTRA N° 4-PA, ENSAYADA CON TIPO DE CARGA PARALELA. A REPRESENTA LA MUESTRA ANTES DE SER FALLADA Y LA B, REPRESENTA DESPUÉS DE ENSAYADA .....	92
FIGURA 41. MUESTRA N° 8-OB, ENSAYADA CON TIPO DE CARGA DIAGONAL. A REPRESENTA LA MUESTRA ANTES DE SER FALLADA Y LA B, REPRESENTA LA MUESTRA DESPUÉS DE ENSAYADA .....	92
FIGURA 42. CLASIFICACIÓN DE LA ROCA DE ACUERDO AL UCS ( <i>UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH</i> ) .....	93
FIGURA 43. GRANULOMETRÍA DEL CARBÓN DEL MATERIAL B, DEL MES DE MAYO DE 2013 .....	94
FIGURA 44. GRANULOMETRÍA DEL CARBÓN DEL MATERIAL B, DEL MES DE JUNIO DE 2013.....	95
FIGURA 45. GRANULOMETRÍA DEL CARBÓN DEL MATERIAL B, DEL MES DE JULIO DE 2013 .....	95
FIGURA 46. GRANULOMETRÍA DEL CARBÓN DEL MATERIAL B, DEL MES DE AGOSTO DE 2013 .....	96
FIGURA 47. GRANULOMETRÍA DEL CARBÓN DEL MATERIAL B, DESDE EL MES DE MAYO 2013, HASTA EL MES DE AGOSTO DE 2013.....	97
FIGURA 48. DIAGRAMA DEL SISTEMA DE CRIBADO PARA EL CARBÓN MINERAL, EMPLEADO EN LOMA DE NÍQUEL. ....	99

FIGURA 49. ESQUEMA TEÓRICO DEL BALANCE DE MASA DEL CARBÓN MINERAL .....	100
FIGURA 50. VALORES DE LOS L, QUE SE SUGIERE QUE TENGA LA PARTE SUPERIOR DE LA TOLVA.....	102
FIGURA 51. VALORES DE LOS LADOS, QUE SE SUGIERE QUE TENGA LA PARTE INFERIOR DE LA TOLVA.....	103
FIGURA 52. MODELO QC TUSA.....	135
FIGURA 53. MODELO CS TUSA .....	135
FIGURA 54. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CRIBAS VIBRATORIAS INCLINADAS SIMPLEX.....	135
FIGURA 55. MODELO BIVI.TEC.....	136

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PRINCIPALES PRODUCTORES DE CARBÓN MINERAL EN VENEZUELA.....	28
TABLA 2. TIPOS DE OPERACIONES DE CRIBADO .....	31
TABLA 3. FACTORES QUE AFECTAN EL CRIBADO .....	33
TABLA 4. CAPACIDADES ESPECÍFICAS EN FUNCIÓN DE LA LUZ DE MALLA .....	38
TABLA 5. FACTORES DE CORRECCIÓN DE SOBRETAMAÑO O RECHAZO Y DEL TAMAÑO MITAD.....	39
TABLA 6. FACTOR C. EN FUNCIÓN DEL % DE PARTÍCULAS QUE EXISTEN DE DIMENSIÓN INFERIOR A LA MITAD DE LA LUZ.....	40
TABLA 7. FACTOR D, EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LA MALLA .....	40
TABLA 8. FACTOR E. SE APLICA CUANDO EL CRIBADO ES POR VÍA HÚMEDA .....	40
TABLA 9. MÉTODO DEL FACTOR .....	43
TABLA 10. FACTOR DE NÚMERO DE POSICIÓN DE LA CUBIERTA .....	46
TABLA 11. FACTOR DE ÁNGULO DE LA CRIBA.....	46
TABLA 12. FACTOR DE CRIBADO EN HÚMEDO.....	46
TABLA 13. FACTOR DE FORMA DE LA PARTÍCULA .....	47
TABLA 14. FACTOR DE FORMA DE LA PARTÍCULA .....	47
TABLA 15. FACTOR DE HUMEDAD.....	47
TABLA 16. VALORES ESTABLECIDOS PARA TRES TIPOS DE MATERIALES CON LA RESPECTIVA LUZ DE MALLA .....	51
TABLA 17. FACTOR DE RECHAZO .....	51
TABLA 18. FACTOR DE SEMITAMAÑO .....	52
TABLA 19. FACTOR DE EFICIENCIA .....	52
TABLA 20. COEFICIENTE DEL TIPO DE MATERIAL (K) .....	59
TABLA 21. FACTOR DE REDUCCIÓN POR PENDIENTE DE LA BANDA (D) .....	60
TABLA 22. SEPARACIÓN DE LOS RODILLOS.....	61
TABLA 23. PESO APROXIMADO DE LAS CORREAS TRANSPORTADORAS .....	61
TABLA 24. PESO APROXIMADO DE LOS RODILLOS PORTADORES .....	62
TABLA 25. PESO APROXIMADO DE LOS RODILLOS DE RETORNO .....	62
TABLA 26. BATERÍA DE TAMICES, UTILIZADAS PARA HACER EL ENSAYO GRANULOMÉTRICO .....	69
TABLA 27. MODELO UTILIZADO PARA LA TABULACIÓN DE LOS DATOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA.....	70
TABLA 28. ABERTURAS DE TAMICES QUE FUERON UTILIZADOS EN LOMA DE NÍQUEL, PARA LAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS.....	70

TABLA 29. ESPECIFICACIONES DEL CARBÓN CRIBADO / ROM UTILIZADO EN LOMA DE NÍQUEL .....	79
TABLA 30. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL MATERIAL B Y A1 .....	80
TABLA 31. ESPECIFICACIONES DEL CARBÓN CRIBADO / ROM UTILIZADO EN LOMA DE NÍQUEL .....	84
TABLA 32. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE SLAKE DURABILITY PARA LA MUESTRA HÚMEDA.....	85
TABLA 33. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE SLAKE DURABILITY PARA LA MUESTRA SECA.....	86
TABLA 34. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL, CON TIPO DE CARGA PARALELA A LA MUESTRA .....	89
TABLA 35. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL, CON TIPO DE CARGA PERPENDICULAR A LA MUESTRA.....	90
TABLA 36. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL, CON TIPO DE CARGA DIAGONAL A LA MUESTRA .....	91
TABLA 37. PORCENTAJE DEL CARBÓN MINERAL. RESULTADO DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA.....	98
TABLA 38. CONSUMO DE CARBÓN EN LOMA DE NÍQUEL, DESDE EL AÑO 2010 HASTA EL 2013. ....	100
TABLA 39. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS MÉTODOS EMPLEADOS, PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA O SUPERFICIE DE CRIBADO.....	118
TABLA 40. AMPLITUD Y FRECUENCIAS SUGERIDAS PARA LA CRIBA EN ESTUDIO.....	120
TABLA 41. ALIMENTACIONES TEÓRICAS (T/H) DE LAS BANDAS .....	120
TABLA 42. COSTO ESTIMADO PARA UNA TOLVA.....	134
TABLA 43. CARACTERÍSTICAS DE LA CRIBA VIBRATORIA DEL PROVEEDOR SIMPLEX .....	137
TABLA 44. CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS DEL PROVEEDOR SIMPLEX.....	137

## INTRODUCCIÓN

---

La empresa Loma de Níquel, dedicada a la extracción y procesamiento mineral para la producción de ferroníquel, la misma perteneciente a la CORPORACIÓN VENEZOLANA DE MINERÍA, S.A - DIVISIÓN NÍQUEL (CVM-DN), y se encuentra ubicada en el kilómetro 19 de la nueva vía Tiara, estado Miranda.

En el proceso productivo del ferroníquel es necesario el uso de carbón mineral para la combustión y reducción del hierro presente en el mineral que es extraído. Este carbón funciona como agente reductor y debe presentar ciertas características granulométricas específicas para permanecer en todo el proceso de reducción que le corresponde.

Desde aproximadamente el mes de mayo de 2013, hubo un cambio de proveedor de carbón, el cual está presentando características que no cumplen con los requerimientos granulométricos estipulados por el proceso, generando consecutivas afectaciones sobre las operaciones. Es por ello que el presente trabajo tiene como objetivo general proponerle a la empresa, implementar un sistema de cribado para el carbón mineral, con la finalidad de brindar una herramienta que permita un desarrollo en las operaciones y procesos más eficientes, de modo que no continúen persistiendo los problemas que está acarreado el tipo de carbón que se está manipulando.

El trabajo de investigación consta de cinco (5) capítulos, donde se contemplan el planteamiento de problema y objetivos de la investigación en el capítulo uno (1), en el siguiente capítulo se hablará un poco sobre la empresa, la geología presente, así como también, el manejo y uso del carbón mineral dentro de las operaciones de la empresa. El capítulo tres (3) se mostrarán los antecedentes de dicho proyecto, además, las bases teóricas abordando los términos y definiciones que permiten una mejor comprensión del trabajo; en el capítulo posterior se hablará sobre el marco metodológico que busca describir en detalle los procedimientos utilizados, adicionalmente los resultados obtenidos y el análisis de estos correspondiente al capítulo cinco (5); así mismo, contiene una sección de conclusiones y recomendaciones que busca plasmar de forma precisa la resolución del problema para la empresa.

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

---

### 1.1. Planteamiento del Problema

La Empresa Lomas de Níquel (CVM-DN), es la única planta procesadora de mineral de níquel en el país, realizando todo el tratamiento del mineral, desde el arranque del mismo hasta finalizar con el producto de FeNi (ferroníquel).

Para llegar al producto final, el mineral debe pasar por diferentes operaciones y procesos unitarios que son: extracción, trituración, manejo del material, calcinación, reducción, refinación y por último granulación.

Actualmente la empresa está utilizando carbón mineral como adición a las pilas de homogenización y corrector del material en planta. Este carbón debe presentar características físicas específicas que presentemente están fuera de los estándares de calidad, estipulados por la Corporación. De este modo, generan afectaciones en términos generales, sobre las operaciones, así como, los que se generan por la manipulación, en el silo, ductos, entre otros.

Loma de Níquel carece de un mecanismo que clasifique granulométricamente el carbón, es por esto que surge la necesidad de proponerle a la empresa, diseñar el sistema de cribado más adecuado, que permita cumplir con los requerimientos granulométricos y facilite la homogenización del material, garantizando un carbón con características físicas más idóneas y de esta manera, mejorar las condiciones en las operaciones y procesos ya antes mencionados.

### 1.2. Objetivos de la investigación

#### 1.2.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de clasificación granulométrico para el carbón mineral, empleado en la empresa Loma de Níquel, ubicada en la nueva vía Tiara, estado Miranda.

#### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual que presenta el carbón utilizado en la empresa Loma de Níquel.
- Caracterizar física y mecánicamente el carbón utilizado actualmente en la empresa.

- Analizar los resultados granulométricos existentes del carbón en el período mayo-agosto del 2013.
- Diseñar un sistema de cribado que permita mejorar el proceso actual.
- Estimar los costos del sistema de cribado.

### **1.3. Justificación de la investigación**

La empresa Loma de Níquel se ve afectada en su proceso por las características que está presentando el carbón mineral utilizado en las operaciones de calcinación y reducción, además de los diversos problemas que se generan en las áreas donde se efectúan dichas operaciones. Al cribar el carbón correctamente, se estarían obteniendo fragmentos con las dimensiones requeridas para las diversas etapas; de manera que el material de finos irán a las pilas de homogenización y el carbón con las dimensiones estipuladas será el utilizado como carbón de corrección que va directamente a los hornos de calcinación. Además permitiría disminuir las obstrucciones y riesgos de compactación que se presenta desde las tolvas de alimentación hasta los dosificadores.

### **1.4. Alcance y limitaciones de la investigación**

Ofrecer una herramienta técnica que permita un desarrollo de las operaciones y procesos más eficientes, de manera que no continúen persistiendo los problemas que está acarreado el tipo de carbón actual. En cuanto a las limitaciones en que se pueda ver afectado el proyecto de investigación, se encuentran la falta de información estadística, producto de fallas en el seguimiento por parte del área de control de calidad. Además, de la adquisición de la malla para realizar la simulación en la criba vibratoria de laboratorio para desarrollar uno de los métodos.

Adicionalmente a esto, se tuvo como limitante el no poder contar con la información suministrada por los proveedores para ofrecer un monto total del sistema de cribado propuesto; por lo que la estimación será sobre su semejanza con las otras cribas, tolvas y cintas transportadoras.

# CAPÍTULO II

## GENERALIDADES DE LA EMPRESA

### 2.1. Ubicación geográfica

La empresa Loma de Níquel está ubicada en el KM. 19 (Figura 1) de la nueva vía Tiara, Edo, Miranda, Municipio Guaicaipuro. La vía que da acceso a la empresa se encuentra en el Km. 54 de la Autopista Regional del Centro.

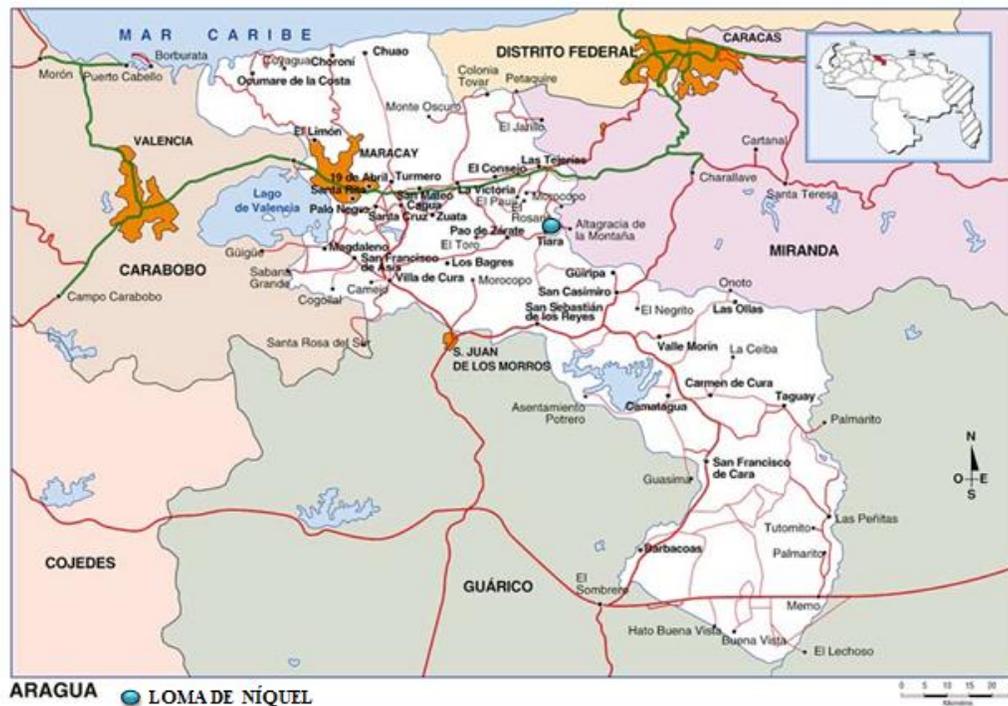


Figura 1. Ubicación geográfica de la empresa Loma de Níquel  
Nota. Fuente: (a-venezuela.com) (Edición propia)

## **2.2. Reseña histórica**

En 1941 fue descubierto el yacimiento niquelífero tradicionalmente llamado Loma de Hierro. En el año 1970, el Ministerio de Minas e Hidrocarburos asumió los derechos sobre el yacimiento y mediante decreto, se declaró el desarrollo del yacimiento niquelífero Loma de Níquel, un polígono de aproximadamente 7000 has.

En diciembre de 1992, el Ministerio de Minas e Hidrocarburos conceden a la empresa Cofeminas, C.A. los derechos para la explotación del yacimiento. El estudio de factibilidad fue financiado y gerenciado por el grupo Anglo American, importante grupo internacional con inversiones en recursos naturales, y desarrollado por Tecnoconsult, empresa venezolana de ingeniería de consulta. Con la incorporación de Cofeminas, C.A. al grupo Anglo American, para el año 1996, cambia de razón social y pasa a llamarse Minera Loma de Níquel, C.A., empresa operativa responsable de desarrollar el proyecto.

Minera Loma de Níquel inicia operaciones a finales del año 2000, siendo oficialmente inaugurada por el ex presidente, Hugo Chávez Frías, en marzo del 2001. Para ese entonces fue la mayor operación minera privada de gran escala en el país y formando parte del Grupo Anglo American, hasta el año 2012 que cesó la extracción y producción en Venezuela el 10 de noviembre de dicho año. Tras vencer las concesiones y los permisos para continuar su operación Minera Loma de Níquel, es asumida el 11 de noviembre de 2012 por la Corporación Venezolana de Minería S.A., División Níquel y pasa a llamarse Loma de Níquel.

La producción ha estado en el orden de 17.500 toneladas por año de aleación de ferroníquel de bajo carbón, destinado a la producción de acero inoxidable.

El programa de extracción y procesamiento mineral está diseñado para una producción máxima de 1,3 millones de toneladas secas al año, con un contenido de níquel promedio de 1,50%, por un período de treinta años.

Esta empresa es reconocida como una gran empresa por sus niveles de productividad y calidad en la producción de Níquel, contemplando la seguridad, la responsabilidad social y la preservación del medio ambiente.

### 2.3. Geología regional

El cuerpo principal del Complejo ofiolítico Loma de Hierro (Figura 2), tiene una extensión de unos 21 Km, desde unos 4 Km al oeste del poblado de Tiara, estado Aragua, hasta las proximidades de TÁCATA, estado Miranda, con una anchura variable entre 1 a 5 Km de distancia, en dirección N 70 E.

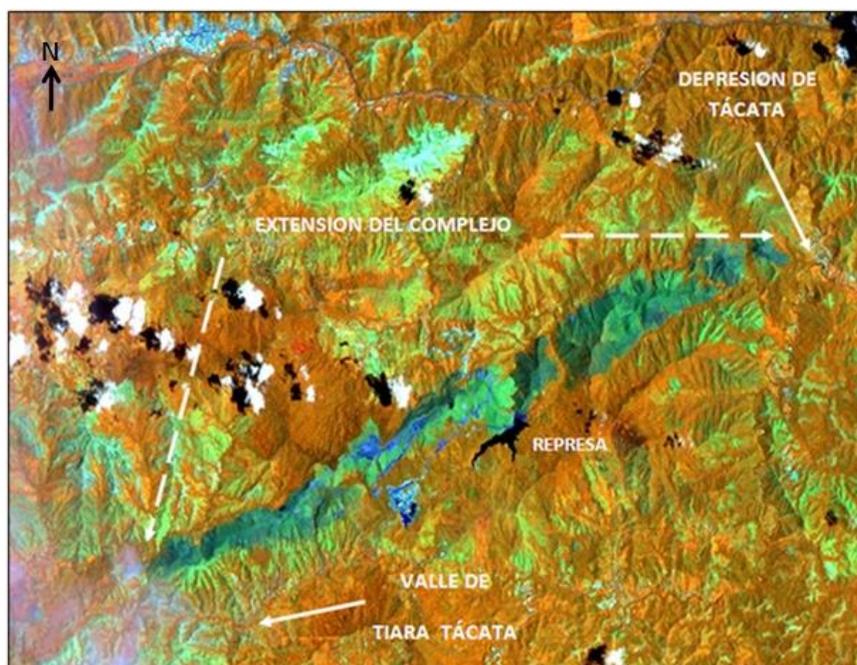


Figura 2. Extensión geográfica del complejo ofiolítico. Imagen de radar  
Nota. Fuente: Departamento de Geología, Loma de Níquel

**Formación Tiara:** De acuerdo con (PDVSA-Intevep, 2001), los afloramientos de la Formación Tiara se extienden por unos 60 km en una franja discontinua desde los cerros al sur de Ocumare del Tuy y Cúa, al sur de TÁCATA, Altagracia de la Montaña, Agua Fría, Tiara, El Pao de Zárata y las cabeceras del valle del río Tucutunemo, en Aragua central y en el sector occidental del estado Miranda.

Se indica la presencia de basalto, así como rocas gabroides, a veces con cristales de piroxenos y plagioclasas con textura ofítica, los piroxenos a veces transformados a hornblenda y clorita, e interpreta que estos cuerpos pueden ser "sills" o diques, como equivalentes hipoabisales al basalto. Dicho metabasalto es de grano fino, denso, de color gris claro a negro, con textura sub-ofítica, algunas variedades son porfídicas, con fenocristales de plagioclasa en una matriz

muy fina, a veces muy alterada. Junto a las rocas ígneas, describe una sección de metatoba, de color negro y matriz muy fina, constituida por fragmentos de rocas volcánicas, plagioclasa, cuarzo y ftanita. Describen a las lavas de la formación, como metabasalto porfídico, de color verde, de grano fino, formados por fenocristales grandes de augita, plagioclasa, magnetita titanífera y olivino, en una pasta de microcristales de augita y plagioclasa. Indicó además, rocas de tipo intrusivo gabroicas o diabásicas, de mineralogía semejante a las de las lavas, con láminas augíticas grandes en relación ofítica y subofítica, con granos tabulares de plagioclasa. Piburn, estudió la formación en el área al norte de San Sebastián, dividiéndola en dos miembros: el inferior está formado por conglomerados volcánicos gruesos y mal escogidos, constituidos por fragmentos de lava porfirítica, en capas de 3 ó más metros de espesor y tobas cristalinas en capas de hasta 30 cm, formadas por plagioclasa, hornblenda y clinopiroxena. El miembro superior está formado por tobas cristalinas líticas, en espesores de hasta 10 m, metalavas, ocasionalmente almohadillas y lentes diseminados de ftanita negra, que llegan a 3 ó 4 m de espesor. Muestran que los metabasaltos están constituidos por plagioclasa, piroxenoanfibolitizado, así como calcita, prehnita, pumpellita, epídoto y clorita. Estas rocas se interdigitan con los metagabros. Esta formación representa una secuencia de diabasa, diques de microgabro y basalto con muy bajo grado de metamorfismo; menciona además la presencia de metabrechas volcánicas con fragmentos constitutivos de gabro y rocas volcánicas. Navarro, describe tobas de ceniza o de lapilli, lavas almohadilladas con plagioclasas y clinopiroxeno y aglomerados volcánicos de fragmentos de lavas y tobas, en una matriz de ceniza volcánica. Se señala que estas rocas han sido sometidas a un metamorfismo de muy bajo grado en la facies de la pumpellita-actinolita.

En la localidad tipo señala un espesor de unos 900 m, Shagam, estimó un espesor superior a los 400 m. Piburn, da un espesor de 5.000 m para la sección expuesta en el Guárico.

**Formación Tucutunemo:** La Formación Tucutunemo se extiende de Este a Oeste, desde la región de Los Teques - Cúa en el estado Miranda, hasta la región de Tinaquillo en el estado Cojedes, atravesando parte de los estados Aragua y Guárico. (PDVSA-Intevep, 2001).

De acuerdo a la descripción original, esta unidad consiste principalmente en filitas carbonáceas arenosas que varían a meta areniscas y limolitas cuarzo feldespáticas, encontrándose también cantidades menores de areniscas de grano grueso (asperones) y

conglomerados cuarzo-calcáreos. Una zona discontinua pero prominente de caliza cristalina negra, de grano fino, asociada a un conglomerado calcáreo, se ubica cerca de la parte superior de la secuencia y cerca de la base de la misma, aparecen algunas capas delgadas de toba básica afanítica de color verde.

Se estima un espesor de 350 m, pero debido al replegamiento y naturaleza de los contactos, esta cifra, al igual que la dada a otras unidades metamórficas de la Cordillera de la Costa, debe tomarse solamente de carácter referencial y aparente.

## **2.4. Geología local**

En Venezuela, los depósitos de níquel se asocian con rocas ultra básicas serpentínizadas de la Cordillera de la Costa. Todos los depósitos y manifestaciones estudiadas son del tipo Regolítico. Hasta el momento en nuestro país no se han ubicado depósitos primarios de níquel asociados con sulfuros de origen magmática. El yacimiento de Sapolita niquelífera de Loma de Hierro, se encuentra según de cartografía nacional en latitud  $10^{\circ} 11' N$  Y Longitud  $67^{\circ} 08' W$ , de origen Mesozoico-Cretácico o paleoceno. (Loma de Níquel, 2000).

La fila del complejo ofiolítico de Loma de Hierro, se correlaciona con la formación Las Hermanas de la Napa de Villa de Cura, del flanco sur de la Serranía del Interior.

Sobre la roca ultra máfica de la fila de Lomas de Hierro se ha formado una cobertura de Sapolito niquelífero, que en algunos lugares tiene gruesas capas de moco de hierro, las laderas adyacentes son empinadas, con pendientes entre 25 y 35%.

La génesis del yacimiento de Loma de Hierro está constituida por un complejo peridotita-gabro, de origen secundario, el cual se compone de peridotita serpentinizada, dunitas, piroxentas, troctolita y gabro asociado a basalto. La peridotita es principalmente una harzburgita de grano grueso con olivino y enstatita de color negro a verdoso de acuerdo al grado de serpentización. El aspecto general de estas rocas es muy uniforme a través de todo el cuerpo, aunque en el borde septentrional aparecen rocas complejas entre peridotita y troctolita.

Se puede afirmar que el manto regolítico que cubre a la Loma de Hierro es producto de un proceso de alteración superficial, activo bajo determinadas condiciones climáticas y

topográficas, que se denomina laterización. Los cambios bruscos de temperatura y la circulación subterránea de las aguas de infiltración, alteran gradual y progresivamente a la roca, predominando la acción geoquímica de disolución o ataque sobre la mecánica de erosión. Las aguas se infiltran por las fisuras o diaclasas producidas por efecto de los efectos dinámicos, posiblemente durante el emplazamiento de la masa peridotítica, y ponen rápidamente en solución a los silicatos de magnesio y hierro anhidros. En esta etapa de alteración, de la roca tiene aproximadamente su estructura primitiva: lamelas de hidratos de hierro y de sílice residual.

Durante el proceso, la roca adquiere un mayor grado de porosidad y permeabilidad, facilitando la penetración y circulación de las aguas de infiltración y el ataque continuo a la roca fresca por reacciones geoquímicas, también se produce la eliminación de los productos en solución durante algún tiempo después del período de lluvias intensas.

Al observar el regolito, se aprecia en la mayoría de los casos que la roca fresca alterada presenta texturas progresivamente más terrosas hacia la superficie, a la vez que se produce enriquecimiento en níquel; luego se observa un brusco empobrecimiento en níquel, enriquecimiento en hierro y cobalto. El límite que separa las zonas enriquecidas en níquel de las enriquecidas en hierro en algunos casos pronunciado y se manifiesta en un cambio de color que se convierte en marrón oscuro al pasar de la saprolita mineralizada a la laterita.

El espesor de la laterita “in situ” representa el residuo insoluble de la masa de la roca ultramáfica infrayacente de la cual teóricamente se ha liberado una cantidad de níquel, que puede concentrarse niquelíferas.

Las menas niquelíferas contienen proporciones variables de magnesio y níquel bajo la forma de garnierita, que es un silicato hidratado de magnesio y níquel. Mineralógicamente, son variedades de antigonita en las cuales el níquel reemplaza al magnesio en proporciones variables.

Las formas topográficas de Lomas de Hierro indican período de reposo alternando con períodos de levantamiento. Muchos de los suelos niquelíferos se formaron y concentraron durante períodos de reposo asociados a una profunda meteorización, interrumpidos por períodos de levantamiento, lo cual originó una erosión acelerada.

Se ha interpretado una edad cretácica en base a la asociación de las rocas y gabroides, con su cobertura sedimentaria y las volcánicas en formación.

Para el yacimiento se establecieron 4 zonas litológicas variables (Figura 3):

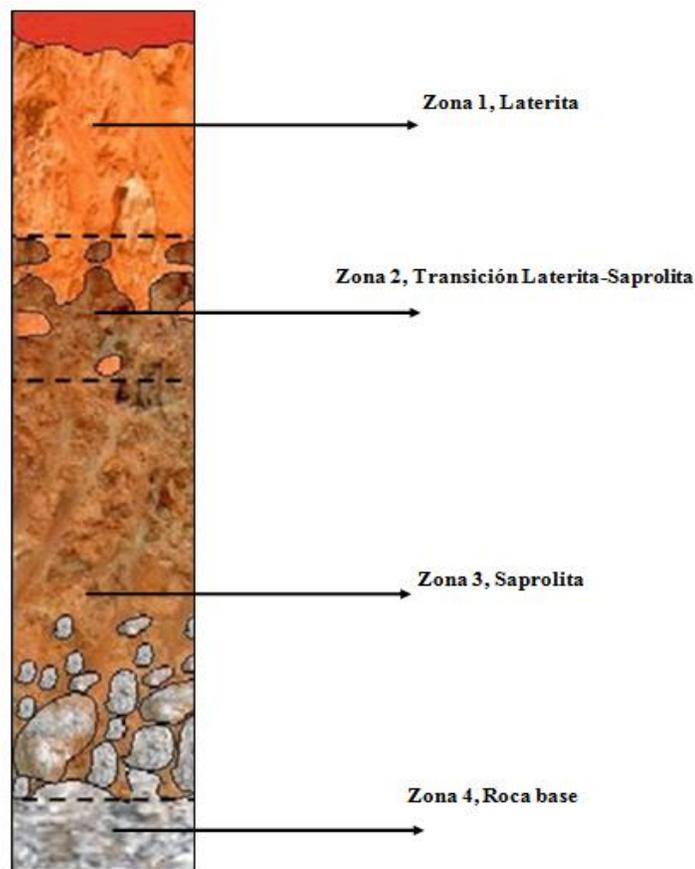


Figura 3. Perfil litológico del suelo

**Nota.** Fuente: Departamento de Geología, Loma de Níquel

- Zona 1 (Laterita): es un manto arcilloso, de color rojizo por su alto contenido de hierro, con pequeñas concreciones y costras de goetita-limonita. A pesar de ser bastante poroso, el peso específico del material es elevado por el contenido de hierro que varía entre 35 y 45 %; el contenido de níquel es relativamente bajo (0.8 %).
- Zona 2 (Transición Laterita-Saprolita): es de color amarillo rojizo e infrayacente a la Zona 1. Tiene un alto grado de humedad y bajo peso específico. El níquel se ha concentrado por precipitación iónica de las aguas de penetración en forma de agrierita disemina. En general

en esta zona los porcentajes de hierro disminuyen y aumentan los de Níquel. En algunos casos es prácticamente imposible diferenciar la Zona 1 de la Zona 2 por su similitud física.

- Zona 3 (Saprolita): es la parte comprendida entre la base de la Zona 2 y la base del complejo ultrabásico serpentizado. Es una serpentina muy alterada de color verde amarillento claro, con fragmentos descompuestos de roca, progresivamente menos alterada a medida que aumenta la profundidad; se caracteriza por el desarrollo de sistemas de fracturas y alto grado de porosidad. La zona es compleja por las irregularidades que presenta, es porosa de bajo peso específico, alto contenido de níquel y magnesio y bajo contenido de hierro.

- Zona 4 (Roca base): esta zona comprende las peridotitas con grado variable de serpentización. Posee el tenor inicial de níquel de las peridotitas 0.25 %. No se considera como mena. Representa el límite inferior de la zona de mineralización.

## **2.5. Proceso de producción del ferroníquel en Loma de Níquel**

Para dar con el producto final ferroníquel, el mineral debe pasar por varias etapas que se describirán a continuación:

Extracción del mineral: la mina que es a cielo abierto se encuentra a unos 4,5 Km aproximadamente de la planta procesadora. El cual es explotado usando el método de excavaciones por terrazas, con una altura de 5 m entre ellas y un ángulo máximo de taludes de 34 grados. A través de palas excavadoras, el mineral es extraído de forma selectiva del yacimiento y transportado en camiones roqueros de capacidad de 50 - 55 t de carga efectiva, hasta la primera fase de trituración.

Preparación del mineral:

a) Trituración primaria: descarga el material sobre una criba fija con orificios de 450 mm de apertura, en éste primer paso se realiza la primera selección granulométrica del mineral; las rocas con dimensiones superiores a los 450 mm se desvía a una trituradora de mandíbula; cuyo movimiento cíclico de acercamiento y alejamiento entre el componente de mandíbula móvil y la mandíbula fija, disminuye el tamaño de las rocas hasta los 300 mm. El material pasante (con tamaño promedio menor a 450 mm) de la criba fija se envía a una trituradora de rodillos, donde el frotamiento de dos rodillos dentados girando en sentido opuesto también disminuye su tamaño promedio a menos de 300 mm. Por lo tanto todo el material proveniente de la

trituration primaria, tiene una dimensión promedio inferior a los 300 mm, lo cual indica una de las variables operativas a monitorear en el control de éste subproceso.

b) Trituración Secundaria: todo el material proveniente de la primera etapa es triturado por dos rodillos dentados girando en sentido opuesto, y así reducir hasta menos de 100 mm el material recibido de mina. En dicha etapa se encuentra un punto de monitoreo y control de proceso mediante el muestreo del material; donde se mide la composición química del mineral y su granulometría.

Luego por otra correa transportadora es enviado hasta un apilador automático para la conformación de pilas de homogenización (Método *Windrow*), que están conformadas por quince (15) pilas tipo chevron (Figura 4 y 5) de composiciones químicas específicas y entre cada valle de dicha pila (6) es incorporado carbón mineral. Luego por un recuperador de cangilones automático, recoge de forma continua el mineral y es enviado por medio de cintas transportadoras hasta la fase de secado para llenar un silo de 25 Ton que sirven de fuente de alimentación al horno secador (a esta área es llamada: “Primer proceso mineral” PPM).

Una vez secado el mineral (humedad de salida de 21 %), éste pasa a una última etapa de reducción de tamaño.



Figura 4. Conformación de los Chevrones  
**Nota.** Fuente: Propia



Figura 5. Pila de homogenización  
**Nota.** Fuente: Propia

c) Trituración Terciaria: el material se envía a una criba vibratoria, donde las rocas con dimensiones superiores a los 30 mm se separan y se trituran mediante la frotación centrífuga entre un cono móvil y un cilindro fijo, saliendo con un tamaño inferior a los 25 mm. En ésta etapa, hay otro punto de control y monitoreo de la composición química, la humedad y la

granulometría del mineral. Para luego ser almacenado en una pila cubierta (llamada pila seca) de 12.000 TMS.

En la base de la pila se encuentran situados cuatro (4) dosificadores, ubicados estratégicamente, dos (2) para cada cinta transportadora que va hacia los hornos de calcinación cargados de mineral. Más adelante se encuentran dos (2) dosificadores más que descargan carbón mineral sobre las mismas correas transportadoras cargadas de mineral.

Calcinación: El mineral proveniente de pila seca, pasa por un proceso de calcinación con la finalidad de eliminar la humedad restante y el agua absorbida químicamente, además de reducirlo químicamente (pre-reducción). Se utiliza carbón como agente reductor. Esto se realiza en dos hornos rotativos, uno para cada línea, a una temperatura de 800 °C. El mineral fino recolectado en las estaciones de desempolvado de planta (electrofiltros), es enviado a la planta de peletización, donde se aglomera con agua, sin aditivos químicos y una porción de mineral fino del área de secado, para su reciclaje a la alimentación de los calcinadores en forma de pellas.

En el proceso de calcinación existen 3 variables que afectan la calidad de calcinado producido, tales variables son:

a) Tiempo: el tiempo de residencia del mineral dentro del horno influye directamente sobre la cantidad de gases liberados ya que las reacciones de secado, deshidratación y pre-reducción poseen una cierta cinética, por lo que, a mayor tiempo de residencia se logra la mayor completación de las mismas y en consecuencia un mejor producto calcinado. El tiempo de residencia varía en función de la velocidad de rotación del horno de forma inversamente proporcional.

b) Temperatura: como se explicó anteriormente las reacciones de secado, deshidratación y pre-reducción requieren de una temperatura. El perfil térmico del horno varía según la combinación de múltiples factores: flujo de aire, potencia del ventilador de tiro, etc.

c) Granulometría: la granulometría es un factor que influye en la velocidad de reacción y por lo tanto, en el grado de completación de las mismas. A menor granulometría las reacciones ocurren con mayor velocidad, ya que es un proceso que ocurre de afuera hacia adentro, y se

aumenta el área de contacto entre las partículas de mineral, el carbón y los gases. Sin embargo, una granulometría muy fina incrementa el arrastre de material por la exhaustión, es por ello que debe operarse dentro de un rango granulométrico adecuado para el proceso.

Reducción- Fusión: el mineral pre-reducido y calcinado es introducido en dos hornos de arcos eléctricos sumergidos, donde la generación de un arco eléctrico sobre la carga de mineral, genera calor para la fusión. En el proceso se crean dos fases: una de menor densidad o escoria y otra más pesada o fase metálica con una proporción importante de Ni y Fe. La escoria, representa aproximadamente el 70% de la carga, y la misma es granizada durante su colada por una corriente de agua, para su posterior transporte por una cinta transportadora hasta un lugar de desecho previamente aislado y seguro. La fase metálica, es colada en cuatro horas en cucharas para su posterior depuración o refinado de impurezas, de acuerdo a los requerimientos de los clientes.

Refinación: inmediatamente, los metales colados del horno de reducción sobre la cuchara precalentada, se inicia la inyección de oxígeno y cal en forma controlada, para la primera fase de remoción del nivel de impurezas, posteriormente la cuchara es integrada a un sistema de electrodo, para conformar un horno de arco tipo cuchara donde será desoxidada. Son tomadas muestras especiales para el control de grados de impurezas.

Granulación: el ferro-aleación (Fe-Ni) es granulado en un tanque especial de agua, clasificada por tamaño y almacenada de acuerdo a las especificaciones para su posterior expedición a los clientes.

Todo el proceso productivo se puede apreciar gráficamente en el siguiente diagrama, desde la extracción del mineral en la mina hasta el despacho del ferroníquel, (Figura 6).

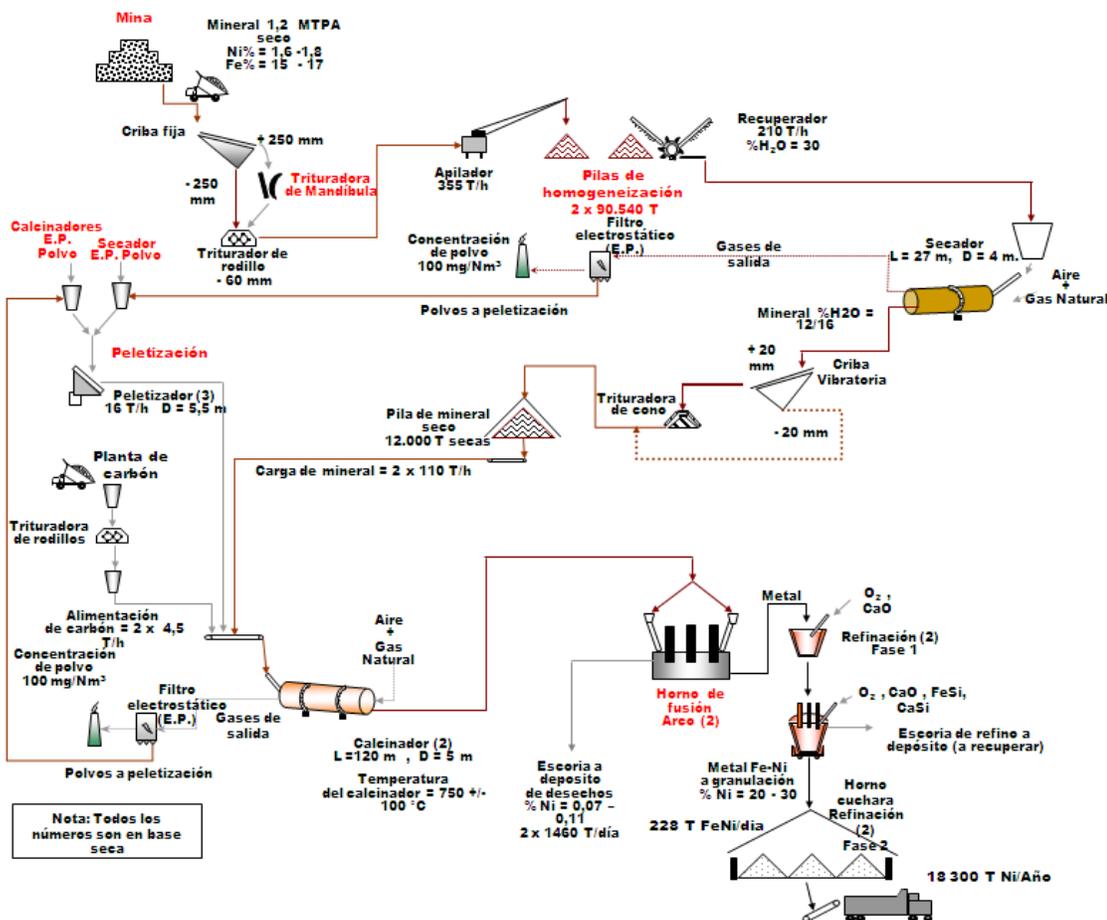


Figura 6. Diagrama de producción del ferroníquel  
**Nota.** Fuente: Sinpotras, Loma de Níquel

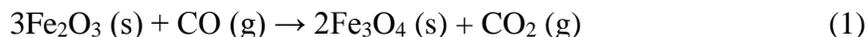
## 2.6. Uso del carbón mineral en Loma de Níquel

El carbón mineral juega un papel muy importante en el proceso productivo del ferroníquel. Es utilizado como combustión y agente reductor del hierro en los procesos de calcinación y de reducción, ya que el mineral lo presenta en gran proporción.

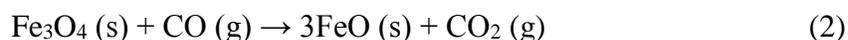
Para entender los procesos asociados al uso de carbón en Loma de Níquel se presenta a continuación el conjunto de reacciones y temperaturas asociadas a la cinética del carbón en el proceso de calcinación.

La pre reducción del mineral para la producción del ferroníquel, consiste esencialmente en la reacción química entre los compuestos de óxidos de hierro contenidos en el mineral y una atmósfera creada por un agente reductor (carbón mineral). Estos compuestos de óxidos de

hierro en su mayoría  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematita) reaccionan con una atmosfera reductora de monóxido de carbono (CO) producida por la descomposición térmica del carbón, se inicia alrededor de los 500 °C bajo la siguiente de reacción:



Posteriormente al sobrepasar los 570 °C este nuevo compuesto  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita) y el remanente dejan de ser meta-estables para seguir reaccionando con la atmosfera reductora y producir en una última etapa de reacción óxido ferroso (FeO- wustita) bajo la siguiente ecuación:



Finalmente dependiendo de las características fisicoquímicas del carbón, que vienen para el proceso de Loma de Níquel, determinadas por su porcentaje de carbono fijo (CF) y su capacidad de sobrevivencia al proceso de calcinación; en esta última etapa del óxido se completa su reducción alrededor de los 700 °C bajo la siguiente reacción:



Esta última reacción, puede ocurrir en mayor o menor proporción dependiendo del aprovechamiento del carbón utilizado, del perfil térmico y de la granulometría del mineral y del carbón alimentado, que incide directamente en la fusión horaria de los hornos reductores.

Es importante destacar que, cuando el carbon entra al calcinador con finos (particulars por dibuja de los 5 mm), Este tiende a quemarse automáticamente y no completa su objetivo dentro del calcinador.

## **2.7. Manejo y procesos del carbón mineral dentro de Loma de Níquel**

### **2.7.1 Descarga del carbón mineral y toma de muestras.**

El carbón es transportado en condiciones normales durante un promedio de 12 horas de viaje para llegar a la empresa Lomas de Níquel.

Luego el carbón es descargado en dos patios, los cuales están identificados como: patio externo A y patio externo B, estos se encuentran situados frente a la entrada de la empresa. Allí es descargado por Volquetas con un promedio de masa de 27 t aproximadamente. La recepción de carbón semanal es de aproximadamente de 1800 t, para un consumo promedio mensual de 7000 t/mes.

En la Figura 7, se aprecia la descarga de una volqueta en el patio externo A, para la conformación de una pila a certificar, es decir, contabilizar la masa y caracterizar la misma, tanto química, como físicamente (granulometría) antes de ser usada en la planta.



Figura 7. Descarga del carbón mineral en Patio externo A

**Nota** Fuente: Propia. Cortesía de Loma de Níquel

Mientras está en conformación la pila de carbón mineral en el patio externo A, diariamente se van tomando muestras del material que es descargado por las volquetas en dicho patio, las muestras son tomadas en la pila en forma de zigzag por el personal de control de calidad, el peso de la misma es de aproximadamente 8-10 Kg por cada una; como se observa en la Figura 8. Toda esta actividad es realizada antes de que el material sea homogeneizado con un cargador frontal utilizando la técnica de acarreo y apilamiento.

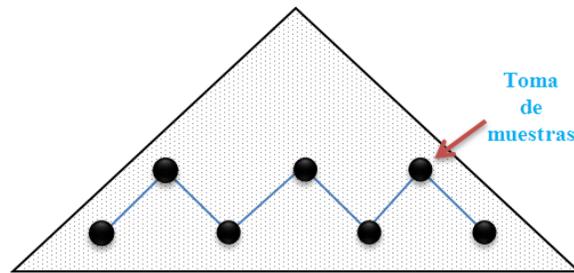


Figura 8. Ilustración de la toma de muestra del carbón mineral en las pilas  
**Nota.** Fuente: Propia

Luego el material almacenado en el Patio externo A es transportado a la Planta de carbón. En la salida de los dosificadores es tomada una muestra diaria y el que es almacenado en Patio externo B es trasladado a planta de trituración, sin embargo, en algunos casos lo almacenan en 380 antes de triturarlo, como se muestra en la Figura 9.

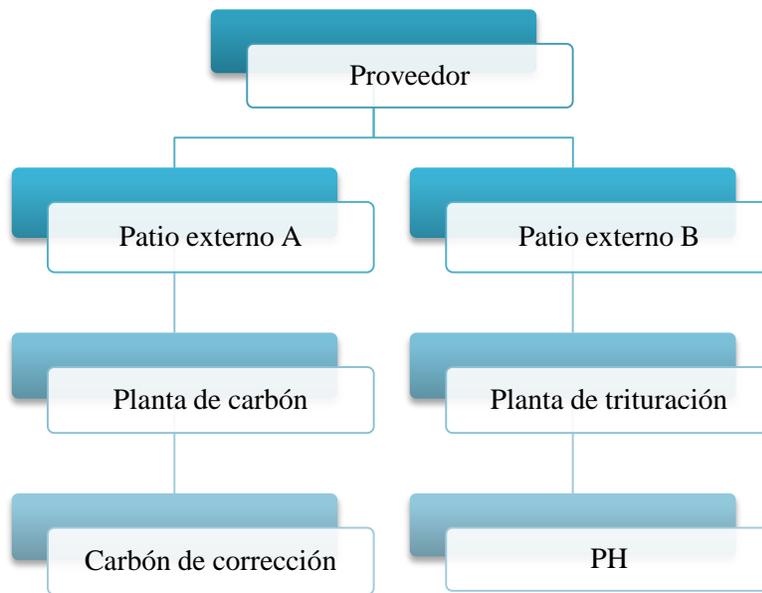


Figura 9. Áreas de descargas y destinos del carbón mineral dentro de la empresa Loma de Níquel  
**Nota.** Fuente: Propia

La data historia del consumo del carbón (2010-2013) que se revisó para este estudio, demuestra, que se utiliza aproximadamente el 50% en la Planta de Trituración de dicho carbón mineral, para la conformación de las pilas de homogenización y el otro restante es empleado en la Planta de carbón. Ambos procesos, serán detallados en los dos (2) siguientes puntos.

## 2.7.2. Traslado del carbón mineral a Planta de carbón

Esta área se encarga de procesar y almacenar el carbón mineral que proviene de patio externo A. En dos tolvas, de capacidad de 33 m<sup>3</sup> cada una, es descargado dicho carbón. Luego en las salidas de ambas tolvas se encuentran dos cribas vibratorias (Figura 10), el cual poseen una luz de aproximadamente 105 mm. El material de sobre tamaño es desviado al piso para posteriormente ser reprocesado por el personal del área, dicho reproceso se realiza adicionando este material a las pilas de homogeneización.

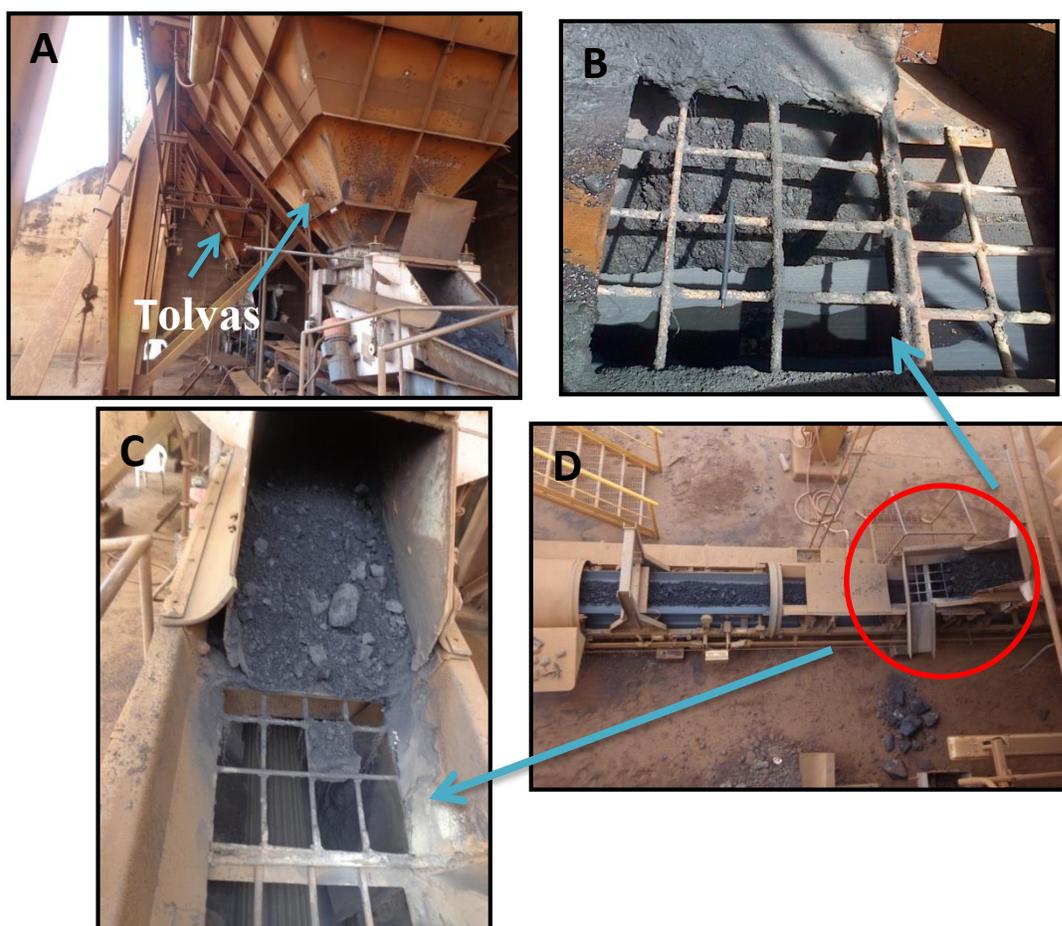


Figura 10. Cribas vibratorias de carbón. Marca MAVI, modelo Calha vibrat. Vical - A. 550x1500 / RV. Con una luz de aproximadamente 105 mm

**Nota.** Fuente: Propia. Cortesía de Loma de Níquel

A: Vista diagonal de las dos tolvas

B: Malla de una de las cribas vibratorias (vista desde arriba)

C: Descarga del carbón sobre la malla

D: Vista desde arriba de la descarga del mineral

Una vez clasificado el material es trasladado por medio de una cinta transportadora, a una trituradora de rodillos para disminuir su tamaño (Figura 11 y Figura 12), con una capacidad de 60 Ton/h y una abertura máxima de entrada de 20 mm, disminuyendo su tamaño hasta aproximadamente, entre 5 - 10 mm; para posteriormente ser enviada a un silo de almacenamiento por medio de una cinta de cangilones.

El carbón es almacenado en un silo de 600 m<sup>3</sup> de capacidad, pero debido a las condiciones físicas del carbón, solo se llena hasta un 80% de su capacidad total, esto por medidas de seguridad y para también disminuir la compactación del material, ya que en experiencias anteriores por encima de estos niveles el carbón compactado dentro del silo genera mayor cantidad de obstrucciones en la salida (dosificadores) del mismo y por ende paradas en las líneas de producción.

Luego, por medio de dos dosificadores conectados al silo de carbón se encuentran unas cintas transportadoras *Flexowell*, denominadas por su codificación: 550-1326-01 (línea 1), 550-1326-02 (línea 2) y 550-1326-03 (reversible), para posteriormente transportar el material hasta otras cintas transportadoras que provienen de “pila seca” cargado de mineral. Cabe destacar, que hay un tercer dosificador (550-1326-03), llamado “dosificador de emergencia”, por condiciones operativas.



Figura 11. Vista lateral de la trituradora  
**Nota.** Fuente: Propia



Figura 12. Vista desde arriba de los rodillos superiores  
**Nota.** Fuente: Propia

En las salidas de los dosificadores nuevamente se toman muestras que varían entre 2 a 5 Kg. A dichas muestras se le realizan solamente ensayos químicos, debido a que no es posible

realizarle análisis granulométricos por las condiciones en el área y del instrumento, que solo permiten tomar los fragmentos grandes y se desprecian los finos.

### 2.7.3. Traslado del carbón mineral a Planta de trituración

Desde el Patio externo B el carbón es trasladado el carbón hasta la primera fase de trituración, es decir, dicho material realiza el mismo recorrido que el mineral como se explicó detalladamente en el punto del “Proceso de producción del ferróníquel en Loma de Níquel”. Luego por medio de cintas transportadoras pasa por la trituradora secundaria para luego ser nuevamente transportado por cintas y descargado a través de un apilador en los valles de las pilas tipo chevron que conforman las pilas de homogeneización, lo cual constituyen un total de seis (6) valles como se muestra en la c.

En la pila de homogeneización mineral, se adiciona el carbón entre los valles de los chevrones 6-7, 7-8, 8-9, 10-11, 11-12, y 13-14. En la Figura 13, se puede observar que el color negro representa el carbón añadido en los valles de los chevrones.

El carbón que es adicionado a dicha pila varía entre 2% a 3,5% del total de masa de mineral apilado, este porcentaje es previamente calculado por el Departamento de Proceso, cumpliendo con los requerimientos químicos de la pila en conformación.

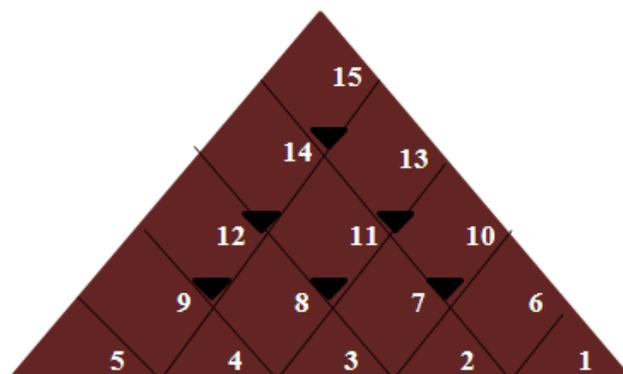


Figura 13. Ilustración frontal de la pila de homogeneización de mineral con los valles de carbón mineral de color negro

**Nota.** Fuente: Propia

En algunos casos, el carbón mineral es almacenado previamente antes de llevarlo a la planta de trituración en PPM o también llamado numéricamente por codificaciones de las áreas de la empresa, 380.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

---

Las bases teóricas constituyen el pilar de la investigación, y presentan toda la información principal y complementaria concernida al proyecto. Son de mucha importancia, ya que a partir de las definiciones se fundamentará dicho trabajo. Por lo tanto, a continuación se definirán los términos y conceptos relacionados con el tema de estudio para que permitan una mejor comprensión del trabajo.

### **3.1 Carbón mineral**

Es una roca combustible, sedimentaria y de origen orgánico, compuesta principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. Se formó a partir de la acumulación vegetal, que se ha ido consolidando entre otros estratos de roca y se ha alterado por los efectos combinados de la presión y el calor a lo largo de millones de años para acabar formando las vetas de carbón (World coal institute, 2005)

(Salsamendi, 1977), define el carbón mineral, como un producto o roca mineral de color castaño o negro, que proviene del cambio metamórfico sufrido por la acumulación de fragmentos de plantas enterradas bajo capas de roca sedimentarias.

#### **3.1.1 Generalidades**

#### **3.1.2 Tipos de carbón:**

Según su grado de carbonificación creciente, se pueden distinguir (World coal institute, 2005) los siguientes tipos generales de carbones:

- Turba: Sustancia de color entre pardo y negro, originada por la transformación de la materia orgánica vegetal de las turberas, por efecto de factores como la temperatura y la humedad, cuando cesa la acción bacteriana, que puede contener hasta un 90% de agua que se reduce al 25% por secado al aire. Tiene una composición aproximada de 60% de carbono, 35% de oxígeno y 6% de hidrógeno, y un poder calorífico entre 6 y 13 MJ/kg.

- Lignito: Su composición media, libre de cenizas y humedad, es carbono entre el 65 y el 75%, hidrógeno entre el 5 y el 6%, y oxígeno entre el 20 y el 27%; el porcentaje de carbono crece con la madurez y disminuye el oxígeno y el hidrógeno. Recién extraído, su humedad puede llegar al 40 ó 50%, y seco al aire mantiene una humedad higroscópica del orden del 20%. Posee un alto contenido en materias volátiles y en azufre, a veces superiores al 50% y al 10%, respectivamente.
- Hulla: Es un carbón bituminoso de la serie ligno-hullera. De color grisáceo, su composición porcentual es del 74 al 84% de carbono, del 11 al 21% de oxígeno, menos del 5% de hidrógeno, del 8 al 44% de materias volátiles, agua y cenizas el resto. Su poder calorífico varía de 22 a 35 MJ/kg.
- Antracita: Es un carbón de alto rango, negro, duro y brillante, a veces con irisaciones, que se forma en la última fase de la carbogénesis. Contiene más del 90% de carbono y del 5 al 8% de materias volátiles; arde con llama corta casi sin humo y su poder calorífico suele estar entre 23 y 38 MJ/kg.

### **3.1.3 Propiedades físicas y mecánicas del carbón mineral**

(Salsamendi, 1977), indica, que las propiedades físicas del carbón mineral, son aquellas características que lo describen en su estado natural antes de ser procesado, para luego ser utilizado en el mercado. Las propiedades físicas dependen de la constitución misma del carbón, de manera que estas propiedades se interrelacionan. Las propiedades físicas y mecánicas más importantes que deben tomarse en cuenta son: gravedad específica, dureza, triturabilidad, friabilidad, estabilidad del tamaño, color, lustre, fractura, clivaje, dimensión, meteorización y combustión espontánea.

- Gravedad específica: es la relación entre el peso del carbón en el aire y el peso de igual volumen de agua. El peso específico del carbón mineral oscila entre 1,25 y 1,70 g/ml, que generalmente aumenta con el rango. Este valor afecta su ignición, entre más baja sea su gravedad específica, menor sería su ignición.
- Dureza: Este concepto para el carbón mineral se relaciona directamente con su estructura. Carbones de alto contenido de volátiles son usualmente más firmes que los de bajo

contenido. Los carbones firmes o duros se deterioran menos que los carbones blandos, y por lo consiguiente, aguantan más el transporte..

- Triturabilidad: Es una propiedad que determina la facilidad de fragmentación. La Triturabilidad es un factor de importancia cuando se requiere que el carbón tenga una granulometría específica para uso industrial. Además, es la facilidad con la que el carbón se desmenuza sin reducirse totalmente a polvo. Es una combinación de dureza, resistencia, tenacidad y modo de fractura.

- Friabilidad y Estabilidad: Estos términos se refieren a la propiedad del carbón de resistir roturas en el manejo que recibe durante su transporte y manipulación. Dicho de otra de forma, es la capacidad que presentan los carbones de descomponerse fácilmente en granulometrías inferiores por efecto de un impacto o un rozamiento.

- Color y Lustre: El color del carbón mineral varía desde marrón en los lignitos, a gris oscuro y negro intenso en las antracitas. El lustre es la manera en que el cuerpo del mineral refleja la luz desde su superficie. En casi todos los carbones bituminosos, existen bandas de carbón de lustre brillante intercaladas con bandas de carbón opacos. Los carbones bituminosos duros, generalmente tienen un lustre opaco.

- Fractura y Clivaje: El término fractura se refiere a la manera en que el carbón se parte al golpearlo, generalmente este término es indicativo del rango del carbón. Las antracitas y carbones cannel se fracturan en pedazos que tienen superficies curvas irregulares, este tipo de fractura se conoce con el nombre de fractura concoidal.

- Abrasividad: Es la capacidad del carbón para desgastar elementos metálicos en contacto con él. Esta propiedad nos va a condicionar enormemente el material que se tenga que usar en la maquinaria (molinos, trituradoras, entre otros). Está relacionada con las impurezas que acompañan al carbón: sílice y pirita sobre todo.

- Resistencia Mecánica: Tiene gran influencia en los sistemas de explotación del carbón. Esto es porque muchas veces la veta carbonífera se usa como paredes, techos y suelos de las propias galerías de la explotación. Además, hay que tener en cuenta que las vetas suelen ser heterogéneas, por lo que es importante estudiar este aspecto.

- Fragilidad: Es la facilidad que presentan los carbones para romperse o quebrarse en pedazos. Es lo opuesto a la cohesión. Este término se refiere a la habilidad del carbón de resistir roturas en el manejo que recibe durante su transporte. Se trata de una propiedad

negativa, que va a depender de su tenacidad y elasticidad, de las características de su fractura y de su resistencia.

### 3.1.4 Preparación del carbón

El carbón bruto extraído directo de la mina (es decir, no triturado, tamizado, ni procesado), que es transportado y vaciado en la planta de procesamiento, es llamado comúnmente, carbón ROM, por sus siglas en inglés *run of mine*, (Ampla, 2006). Además, a menudo contiene impurezas y trozos de material no deseados, con fragmentos de diferentes tamaños.

Una vez extraído el carbón de la mina, se procede posteriormente a su tratamiento, cuyo fin es mejorar la calidad del carbón, reduciendo su contenido en materia no combustible y en sustancias que pueden dar problemas en su combustión.

(Walters, s.f), indica que los pasos posteriores que se le realizan al carbón en su preparación son:

✓ Fragmentación: El carbón extraído de la mina debe reducirse hasta alcanzar un tamaño máximo aceptable para su tratamiento en la planta de preparación. Generalmente el circuito de reducción de tamaño está conformado por operaciones de trituración (que se utiliza a veces después del lavado del carbón) para fragmentar las piezas de gran tamaño y ajustarlas a los requisitos del mercado.

✓ Clasificación por tamaños: El carbón se clasifica por tamaños antes y después del lavado. Para ello, se utilizan diferentes procedimientos dependiendo del tamaño del carbón; así, el carbón en bruto al entrar en la planta de preparación pasa por cribas.

✓ Almacenamiento: Por lo general, el carbón se almacena en tres puntos de la cadena de preparación y tratamiento, los cuales se describen a continuación:

1. Almacenamiento del carbón bruto entre la mina y la planta de preparación.
2. Almacenamiento del carbón lavado entre la planta de preparación y el punto de carga en vagonetas o camiones.

3. Almacenamiento del carbón lavado.

✓ Lavado del carbón: El carbón bruto contiene materiales que van desde el carbón “puro” hasta roca, con variados elementos de densidades relativas comprendidas entre 1,30 y 2,5, Walters (s.f.). El carbón se limpia separando el material de baja densidad (producto comercial)

del de alta densidad (residuo). La densidad de separación depende de la naturaleza del carbón y de los requisitos de calidad del carbón lavado.

Generalmente cuando se requiere de un material (en este caso el carbón mineral), el cliente lo solicita con ciertas especificaciones, es decir, estas especificaciones son físicas y químicas, las cuales varían de acuerdo al uso que le vayan a dar al producto. Estas son especificaciones del producto de carbón, que se refiere a las modificaciones que pueda realizar el cliente periódicamente (Ampla, 2006).

### 3.1.5 El carbón en Venezuela

Los carbones explotados actualmente en Venezuela son del Terciario (paleoceno y oleoceno) y en calidad se agrupan dentro de la categoría de sub-bituminosos a lignitos, con un alto contenido de volátiles, con un buen rendimiento energético y baja concentración de cenizas y azufre. Los carbones de Venezuela son jóvenes y de débil coquificación. En la Figura 14, se muestran las siguientes zonas carboníferas



Figura 14. Zonas carboníferas de Venezuela

Nota. Fuente: Propia

Éstas cuencas son: Cuenca Carbonífera del estado Zulia, Faja Carbonífera de Guárico Nororiental, Zona Carbonífera de Aragua Meridional, Cuenca Carbonífera de Naricual en Anzoátegui, Zonas Carboníferas del estado Táchira (área de Lobatera y zona de Rubio), Región Carbonífera de Santo Domingo, Zonas Carboníferas del Estado Falcón.

Casi el 95% del potencial carbonífero de Venezuela está en la Cuenca Carbonífera del Zulia (Miban, s.f), lo que equivale a 0,5% de las reservas mundiales de carbón. Así mismo, las reservas probadas de carbón venezolano, se encuentran en un 83% en esta zona.

### 3.1.6 Principales productores de carbón en Venezuela

De acuerdo con los niveles de producción de carbón (Miban, s.f) registrados durante el año 2009, el estado que concentró la mayor parte fue el estado Zulia (95%), mientras que el restante 5% se distribuyó en los estados Táchira y Falcón. Por su parte, la participación del carbón producido en el país aportó cerca del 5% para satisfacer el mercado interno, el resto 95% fue destinado al mercado internacional.

En la Tabla 1, se muestran los nombres de las empresas venezolanas productoras de carbón y su ubicación geográfica. En el 2013 por decreto presidencial crearon la Corporación Venezolana de Minería, el cual, las siguientes empresas pertenecen a esta Corporación.

Tabla 1. Principales productores de Carbón mineral en Venezuela

N°	Nombre de la empresa	Ubicación
1	CARBOZULIA	Zulia
2	Carbosuroeste	Táchira

Nota. Fuente: (Miban, s.f)

### 3.1.7 El carbón en la producción de ferroaleaciones y sus usos

Las ferroaleaciones son conocidas como aquellas aleaciones con un alto porcentaje de hierro, que poseen diferentes elementos constitutivos además del carbón (World coal institute, 2005), los cuales dependen de los usos posteriores. Por lo general, estas son de suma utilidad para mejorar las propiedades de algunas aleaciones como el acero.

Apenas el 1% del volumen anual producido (World coal institute, 2005), se utiliza en el país para la fabricación de ferroaleaciones a través de una planta industrial localizada en el estado Bolívar, y de coque para cubrir parcialmente las necesidades de la industria siderúrgica y del aluminio.

Las ferroaleaciones más conocidas son las que contienen níquel, silicio, magnesio y cromo, se caracterizan por sus propiedades, entre las cuales destacan: resistencia a la corrosión y para contrarrestar los efectos del azufre.

Otra aplicación importante, es cuando se realiza desoxidación en procesos siderúrgicos, éstas se mezclan con: magnesio, calcio, vanadio, boro, cobalto, fósforo, níquel, titanio, entre otros.

El carbón es esencial para la producción de hierro colado y acero; cerca del 64% de la producción de acero en todo el mundo proviene de altos hornos que utilizan carbón.

Entre los usos más importantes esta la fabricación de vehículos, trenes, edificios, barcos, puentes, neveras, equipos médicos, son ejemplos de productos fabricados en acero. Resulta vital para las máquinas que crean casi todos los productos que utilizamos en la actualidad.

### **3.2 Cribas**

De acuerdo con (Fueyo, 1999), el cribado es un conjunto de operaciones mecánicas de clasificación de materiales de forma y dimensiones variadas, mediante la presentación de estos materiales sobre unas superficies con aberturas que dejan pasar los trozos de dimensiones inferiores a las dimensiones de las aberturas (pasante), mientras que los trozos de medidas superiores son retenidos (sobredimensionados) y clasificados por tamaños.

Esta operación se debe a que los materiales procedentes de las operaciones de trituración o molienda, tienen una distribución granulométrica por lo tanto hay que hacer una separación por dimensiones en función de su uso final.

El objeto de las operaciones de cribado es la separación de los fragmentos más gruesos contenidos en el todo-uno con el fin de eliminarlos o de enviarlos otra vez a las operaciones de reducción de tamaño. También, puede pretenderse la separación de los fragmentos más

pequeños para eliminarlos o clasificarlos en distintas dimensiones comerciales. Esto permite aumentar la capacidad de los equipos de trituración y evitar la sobretrituración.

En función del tamaño de los distintos elementos a clasificar y de los procesos utilizados, existe una terminología específica que se emplea con más o menos frecuencias, de acuerdo con (Fueyo, 1999), son las siguientes:

- Descabezado o escalpado: es la eliminación de los elementos más gruesos de dimensiones más o menos anormales contenidos en una muestra.
- Precribado: es la separación previa que se hace a la muestra antes de pasar a la etapa de trituración con el objeto de eliminar la fracción más fina para que no entre en el aparato. En función del tipo final de granulometría que se esté buscando este material fino se elimina o se conduce mediante una cinta transportadora a la parte del circuito que le corresponda.
- Calibrado: se realiza sobre parrillas fijas o con movimiento y se utiliza para la separación de los bloques o grandes guijarros con tamaños superiores a 100 mm.
- Cribado: este término está reservado a la separación de materiales comprendidos entre 1,5 mm y 100 mm. El proceso se realiza mediante cribas planas o inclinadas de sacudidas, cribas de vaivén, cribas vibrantes y cribas rotativas, más conocidas como trómeles.
- Tamizado: cuando el tamaño de los materiales a separar se encuentra entre 0,04 mm y 1,5 mm se utiliza este término y generalmente se realiza sobre telas muy finas.
- Recribado: se realiza esta operación cuando una vez realizado el cribado para la eliminación de finos, bien sea por una clasificación primaria imperfecta o bien por los residuos creados durante las manipulaciones como ocurre con los carbones.
- Desempolvado o captación de polvos: se aplica a toda operación de cribado cuya parte de producto fino constituye un residuo.
- Agotado: recibe este nombre las operaciones por vía húmeda que tienen por objeto la eliminación del excedente de líquido en la mezcla sólido-líquido que se encuentran saturadas.

### **3.2.1 Tipos de Cribas según las operaciones de clasificación**

Según las operaciones de clasificación de mineral en función de lo antes descrito, (Wills, s.f) propone sistemáticamente en la Tabla 2, su recomendación en cuanto a la criba que mejor se adapta a los resultados que se quieran obtener.

Tabla 2. Tipos de operaciones de cribado

Operación y descripción	Tipo de criba
Depuración primaria: Estrictamente, la separación de una pequeña cantidad de material de sobretamaño de una alimentación formada predominantemente por finos. Típicamente la separación de material de sobretamaño de una alimentación con aproximadamente, un máximo de 5% de sobretamaño y un mínimos de 50% de tamaño medio.	Gruesos: parrilla. Intermedios y finos: igual que la usada para separaciones.
Separación, gruesos: La separación de un tamaño a 4,75 mm y mayor.  Separación, intermedios: La separación de un tamaño menor de 4,75mm y mayor a 425µm.	Cribas vibratorias, horizontales o inclinadas.  Cribas vibratorias, de alta velocidad, tamizadoras y cribas centrífugas. Tamices estáticos.
Eliminación de agua: Eliminación de agua libre de una mezcla de sólidos-agua. Generalmente limitada a tamaños de 4,75 mm y mayores.	Cribas vibratorias horizontales, inclinadas (alrededor de 10°), y centrífugas, tamices estáticos.
Separación de basura: Separación de materia extraña de un material procesado. Esencialmente una forma de operación de depuración. El tipo de criba depende del intervalo de tamaños del material procesado.	Cribas vibratorias; horizontales o inclinadas. Cribas tamizadoras o centrífugas. Tamices estáticos.
Otras aplicaciones: Deslamado, transporte, recuperación e medios, concentración.	Cribas vibratorias; horizontales o inclinadas. Cribas oscilatorias y centrífugas. Tamices estáticos.

Nota. Fuente: (Wills, s.f)

### 3.2.2 Control de las dimensiones

Según (Fueyo, 1999), las dimensiones de paso de las mallas y chapas perforadas son expresadas en mm. Por el contrario, las dimensiones de las telas metálicas son designadas por el número correspondiente a la cantidad de mallas por pulgada lineal se puede ver en esquema de la Figura 15, o al número de mallas por  $\text{cm}^2$ . Una y otra de estas designaciones permiten calcular la distancia de eje a eje de los hilos, pero no la luz de malla, la cual depende del diámetro del hilo o alambre. Si se tiene en cuenta, además, que los diámetros del alambre son designados no por su dimensión efectiva, sino por unos números relacionados con diversos calibres o normas, variables entre países, es necesaria una labor de normalización a nivel internacional.

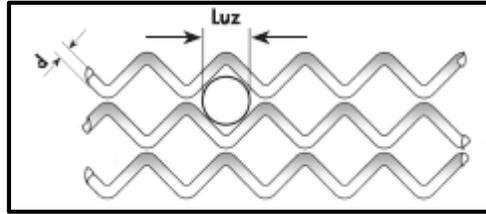


Figura 15. Representación de la luz de malla y el diámetro del alambre

**Nota.** Fuente: (Grupo Nuba, s.f)

De acuerdo con un estudio realizado en el 2008, para la utilización de un tamiz por (Grupo Nuba, s.f), sugieren que se necesitan dos parámetros para definir una malla; uno es la luz de malla y la otra la superficie abierta, que se mide como la proporción de la superficie total de la malla que queda libre, o sea que no forma parte de la estructura de hilos o alambres. De esa forma lo que se define como ‘número de malla’, que en estos tamices normalizados se denomina “número de mesh” utilizando la palabra mesh que dignifica malla en inglés, es la cantidad de hilos por pulgada lineal que tiene la malla, pero manteniendo constante la superficie abierta, que en ASTM es del 60%. Es decir que cuanto más grande es el mesh más finos deberán ser los hilos.

La primera serie de mallas normalizada fue la Tyler, propuesta por la compañía de mallas *The W.S. Tyler Company*, que se basaba en un tamiz que tenía 200 hilos por pulgada lineal. Con los hilos de grosor normalizado correspondía una luz de malla de 74 micras. Los tamices de luz de mallas inferiores y superiores se hallaban mediante una progresión geométrica, multiplicando o dividiendo sucesivamente por la raíz cuarta de dos.

A raíz de esta norma, cada país fue desarrollando sus propias series normalizadas como son la UNE en España, ASTM en Estados Unidos, DIN en Alemania, AFNOR en Francia, JIS en Japón, entre otras. En la Tabla 3, se presenta la comparación entre las series de tamices más importantes del mercado, propuesta por (Fueyo, 1999), en milímetros y pulgadas. (Apéndice A).

### 3.2.4 Factores que afectan el cribado

En una investigación, (Kelly, 1990) estudió los factores que determinan la rapidez con la cual pasan las partículas a través de una superficie de cribado (como se ilustra en la Tabla 4), donde se pueden dividir en dos grupos: los relacionados con las propiedades de las partículas y los que dependen de la máquina y su operación. En realidad, muchos de los factores son interdependientes y no pueden considerarse en forma aislada. Por ejemplo, la rapidez con que pasa el material sobre la superficie de la criba es también importante, ya que determina el espesor del lecho y el tiempo de residencia. De hecho, depende de las características de la máquina tales como el ángulo de inclinación, la amplitud, la frecuencia y el tipo de superficie de cribado, así como de propiedades de las partículas tales como la forma y la distribución de tamaños en la alimentación. Tabla 3.

Tabla 3. Factores que afectan el cribado

Factores del mineral	Factores de la máquina
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Densidad global</b></li> <li>✓ <b>Forma de la curva de distribución de tamaños</b></li> <li>✓ <b>Forma de las partículas</b></li> <li>✓ <b>Humedad de la superficie</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Superficie de la criba:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Área:</li> <li>Porcentaje de área abierta</li> <li>Tamaño de la abertura</li> <li>Forma de la abertura</li> <li>Espesor</li> </ul> </li> <li>✓ Vibración:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Amplitud</li> <li>Frecuencia</li> <li>Dirección</li> </ul> </li> <li>✓ Ángulo de inclinación</li> <li>✓ Método de alimentación de la criba</li> </ul>

Nota. Fuente: (Kelly, 1990)

### 3.3 Diseño de cribas

En el diseño de cribas existen numerosos trabajos académicos e industriales. Sin embargo, específicamente para las condiciones de estudio de este trabajo, la investigación es más limitada. A continuación, se presentan los estudios más relacionados al tema de investigación.

(Bajzelj, 2006), en su Trabajo especial de Grado, realizó un estudio sobre el diseño de una máquina cribadora de material pétreo, modular, con una capacidad de carga de (300 m<sup>3</sup>/día). Para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado se hizo uso de un método de diseño

conocido como T.R.I.Z (Teoría para la resolución de problemas con soluciones inventivas), el cual mediante contradicciones permite llegar a un diseño óptimo y económico. Luego de hacer un análisis mediante el TRIZ, se llegó, que una criba modular con un sistema vibratorio de masas desbalanceadas es el más óptimo. El diseño de la máquina fue realizado parte por parte. Así se tuvo que el mínimo factor de seguridad obtenido fue de 9,8, el cual se encuentra ubicado en el ala de la viga larga del primer *deck*. El diseño modular de la máquina permite que se pueda variar la capacidad de cribado dependiendo de las necesidades de las canteras. Comparando el diseño de la máquina, con otros diseños existentes en el mercado internacional, se puede ver que este proyecto implica simplicidad y bajo costo de fabricación con un método de cribado sencillo. La simulación computarizada de los elementos de la criba fue realizada en *CosmosWorks 2006*. Esto nos permitió verificar los resultados obtenidos en los cálculos matemáticos. El sistema de control diseñado es muy sencillo, y fue realizado en el programa *Electronic Workbench*. Este programa permite escoger los 149 elementos eléctricos necesarios para realizar un sistema de control óptimo. El diseño de la máquina fue realizado en su totalidad de acero A36, el cual es un acero que se puede conseguir con facilidad en el Ecuador, esto influye en el costo final de la maquinaria, el cual arrojó valores de VAN (US\$ 1194), TIR (15,97%) y B/C (1,05), esto refleja que la máquina diseñada va a tener éxito en el campo para el cual fue diseñada.

(Pineda & Rojas, 2004); en su Trabajo Especial de Grado, realizaron el análisis sobre un sistema vibratorio para transporte y clasificación de material granular. Se construyó un prototipo de sistema vibratorio en el cual se muestran dos aplicaciones de las vibraciones mecánicas en la industria: el transporte y la clasificación de sólidos a granel. El diseño del sistema contempla la variación de diversos parámetros, como ángulo de inclinación y longitud de los flejes, excentricidad o amplitud del movimiento y velocidad angular, que permiten analizar su influencia sobre el comportamiento del material en cada proceso. Se realizaron experiencias prácticas que permitieron establecer influencia de la variación de parámetros de diseño del sistema mecánico en los procesos de transporte y la clasificación del material granular. En relación con la inclinación de los flejes se verificó recomendación teórica de un ángulo de inclinación de 30° para obtener una velocidad óptima de transporte. En cuanto a la

amplitud del movimiento y la velocidad angular, se encontró un rango adecuado de 5 a 7 mm para la amplitud y de 300 a 450 RPM para la velocidad.

Actualmente importantes empresas del ramo, se han dedicado a desarrollar programas computacionales de diversas índoles que permiten simular y controlar desde los esfuerzos generados como el efecto de la vibración, como se muestra en la Figura 16.

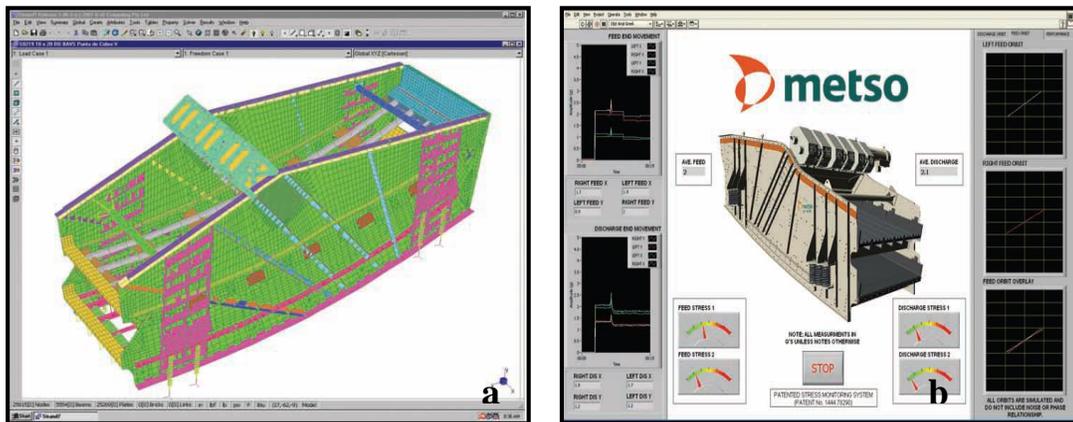


Figura 16. Imágenes de las pantallas generadas por a) Un programa basado en elementos finitos, b) Programa de control de la operación de cribado  
**Nota.** Fuente: Catálogo de METSO.

Autores definen que para diseñar un sistema de cribado se debe comenzar calculando la superficie de cribado.

### 3.3.1 Cálculo de la superficie de cribado

Existen un gran número de autores que plantean fórmulas y metodologías para el cálculo de la superficie de cribado con enfoques diferentes. Estos procedimientos o cálculos muchas veces difieren entre sí, y se usan de manera indistinta, en función de la experiencia de los autores y de la diversidad de los materiales y las condiciones imperantes tanto de la operación como de las condiciones de las labores, teniendo en cuenta el medio ambiente donde se desarrollan; sobre todo en el sector industrial, donde se producen desviaciones importantes.

En este caso, se describirá la metodología que plantean tres (3) autores, que son:

1. (Fueyo, 1999) Método de “Alimentación total” y Método de “Capacidad de paso”.

2. (Kelly, 1990), Método del “Factor empírico y Método de las “Características de cribado”.
3. (Bouso, 2010), “Método híbrido”.

En el texto de (Fueyo, 1999), se plantean dos bases de cálculo completamente diferentes para determinar la superficie de cribado, los cuales son, el primero utilizando la alimentación, llamado el método “Alimentación total”, y el otro método, haciendo uso del pasante, llamado “Capacidad de paso”.

(Kelly, 1990), indica que hay dos enfoques básicos para el cálculo de una criba: en esencia, son métodos empíricos basados en datos tabulados o en gráficas (Método de alimentación y Método pasante), y métodos basados en pruebas hechas con el mineral real. Estos métodos son de fiabilidad limitada y los datos de los diferentes fabricantes dan diferentes resultados. Consecuentemente sólo deben usarse para obtener un valor estimado inicial.

Uno de los métodos de cálculo, basado en datos tabulados o en gráficas, donde (Kelly, 1990), lo llama “Método del factor empírico” y se fundamenta en la alimentación total que se realiza a la criba, se conoce como “Método de alimentación” y el “Método pasante”, que se basa en la masa sólida por unidad de tiempo que pasa por una superficie específica de malla de una determinada luz de paso. Los factores de corrección aplicados a las fórmulas, conceptualmente son similares, sin embargo, difieren en magnitud, dando como consecuencia que no pueden utilizarse indistintamente.

El segundo método basado en pruebas hechas con el mineral real, (Kelly, 1990), lo define como “Método de las características de cribado”, e implica el uso de un tamiz de laboratorio para determinar las características durante el cribado del material en cuestión. Se efectuó una sola prueba en ciclo cerrado en una pequeña criba industrial para generar un factor de aumento progresivo y explicar así las dos diferentes acciones de cribado.

(Bouso, 2010), plantea un método al que llamó “Método híbrido”, en el cual tomó lo más conveniente de los métodos de alimentación y pasante, para sus aplicaciones concretas, y que al mismo tiempo resultara coherente. Consiste en estudiar con detalle cada uno de los parámetros y condiciones que afectan a la capacidad del cribado, y por consiguientemente a la superficie necesaria.

### **Metodología planteada por Fueyo**

Estos cálculos se basan uno de ellos, en la alimentación total que se realiza a la criba y el segundo se basa en la capacidad de paso de dichos materiales a través de la superficie cribante.

Los factores de corrección que se han de aplicar a las fórmulas son similares pero diferentes y nunca deben mezclarse (Fueyo, 1999).

En la Ecuación 1, (Fueyo, 1999), plantea la fórmula para el cálculo de la superficie de cribado en función de la alimentación.

$$\text{Superficie de cribado} = \frac{\text{Alimentación}}{\text{Capacidad Específica} * B * C * D * E}$$

Ecuación 1. Superficie de cribado

Donde la Superficie de cribado viene dado en m<sup>2</sup> y la Alimentación a la malla en m<sup>3</sup>/h.

Capacidad Específica obtenida de la Tabla 5

B- Sobretamaño o rechazo. Factor obtenido de la Tabla 6

C- Tamaño mitad. Factor obtenido de la Tabla 6

D- Factor posición de la malla. Ver Tabla 11

E- Factor sistema de riego. Viene determinado por el tamaño y abundancia de riesgo. Ver Tabla 12

(Fueyo, 1999), menciona que la fórmula antes descrita (Ecuación 1), se aplica para cada uno de los paños de la criba en función de los resultados se determina la superficie cuadrada necesaria de cribado.

En la Tabla 4, se muestran las capacidades específicas de cribado de un material ya sea triturado o en forma natural en función de la luz de malla. Para calcular la superficie de cribado por el método basado en la alimentación, de acuerdo con la Ecuación 1.

La mayoría de estas tablas las suministran los fabricantes de los equipos, tomando en cuenta las siguientes condiciones: la granulometría del material utilizado en la alimentación, el porcentaje de partículas superiores al tamaño de clasificación (rechazo), que forman la

fracción gruesa, y el porcentaje de partículas inferiores a la mitad del valor de dicho tamaño de clasificación, es decir, semitamaño.

Por otro lado, los diferentes factores que depende en este caso del sobretamaño o rechazo, Tamaño mitad, Factor posición de la malla, Factor sistema de riego están tabulados.

Tabla 4. Capacidades específicas en función de la luz de malla

<b>Luz (mm)</b>	<b>CAPACIDAD ESPECÍFICA</b>	
	<b>(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h)</b>	
	<b>Triturado</b>	<b>Natural</b>
<b>0,4</b>	1,20	3,00
<b>0,7</b>	1,50	3,00
<b>0,8</b>	2,10	3,40
<b>1,2</b>	2,70	4,30
<b>1,6</b>	3,60	5,50
<b>2,4</b>	5,20	6,70
<b>3,3</b>	6,70	8,60
<b>4,7</b>	8,80	11,3
<b>6,5</b>	12,0	16,3
<b>12</b>	16,0	23,0
<b>19</b>	22,0	29,0
<b>25</b>	26,0	33,0
<b>31</b>	30,0	37,0
<b>38</b>	33,0	40,0
<b>45</b>	35,0	43,0
<b>50</b>	37,0	45,0
<b>57</b>	39,0	48,0
<b>63</b>	41,0	50,0
<b>70</b>	43,0	53,0

**Nota.** Fuente: Fueyo (1999)

En la Tabla 5, se muestra los factores de corrección utilizados para las partículas superiores al tamaño de clasificación o rechazo, es decir, sobretamaño, que forman la fracción gruesa y el porcentaje de partículas que inferiores al valor mitad de dicho tamaño de clasificación, semitamaño.

Tabla 5. Factores de corrección de sobretamaño o rechazo y del tamaño mitad

	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>%</b>	<b>Sobretamaño</b>	<b>T. Mitad</b>
<b>0</b>	0,92	0,40
<b>5</b>	0,93	0,45
<b>10</b>	0,94	0,50
<b>15</b>	0,96	0,55
<b>20</b>	0,97	0,60
<b>25</b>	1,00	0,70
<b>30</b>	1,03	0,80
<b>35</b>	1,06	0,90
<b>40</b>	1,09	1,00
<b>45</b>	1,13	1,10
<b>50</b>	1,18	1,20
<b>55</b>	1,24	1,30
<b>60</b>	1,30	1,40
<b>65</b>	1,42	1,50
<b>70</b>	1,54	1,60
<b>75</b>	1,75	1,70
<b>80</b>	2,00	1,80
<b>85</b>	2,70	1,90
<b>90</b>	3,60	2,00

**Nota.** Fuente: Fueyo (1999)

Para realizar los cálculos de la superficie de cribado basados en la capacidad de paso de dichos materiales (Ecuación 2) a través de la superficie cribante, se emplea la misma fórmula con tablas de coeficientes diferentes para la capacidad específica, el sobretamaño o rechazo y el tamaño mitad.

$$\text{Superficie de cribado} = \frac{\text{Material pasante}}{\text{Capacidad específica} * B * C * D * E}$$

Ecuación 2. Superficie de cribado. Material pasante

Donde

Superficie de cribado (m<sup>2</sup>) y Materia pasante (t/h) = Alimentación – Rechazo (t/h)

Capacidad específica (t/m<sup>2</sup>.h) – Coeficiente en función de la clase de material a clasificar y la dimensión del hueco. Ver Apéndice B.

B- coeficiente en función de la cantidad de sobretamaño o rechazo que acompaña al todo-uno. Ver Apéndice C.

C- coeficiente en función del porcentaje (%) de partículas inferiores a la mitad de la dimensión del hueco de la criba y que acompaña al material a clasificar. Ver Tabla 6.

D- coeficiente que depende de la posición de la malla en la criba de clasificación. Este coeficiente permite corregir el hecho de que, debido a la estratificación del material, los productos finos no pueden caer en la bandeja inferior hasta después de recorrer una pequeña distancia. Ver Tabla 7.

E- coeficiente en función de que el cribado se efectúe por vía húmeda, con sistemas de riego. Ver Tabla 9.

La fórmula se aplica para cada bandeja o paño y se toma como referencia el valor de la que necesite mayor superficie de cribado. En función de ese valor y de las características de las cribas de cada fabricante, se instalará una criba con una superficie de cribado siempre algo mayor que el valor obtenido (Fueyo, 1999).

Tabla 6. Factor C. En función del % de partículas que existen de dimensión inferior a la mitad de la luz

%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	0,55	0,70	0,80	1,00	1,20	1,40	1,80	2,20	3,00	----

Nota. Fuente: Fueyo (1999)

Tabla 7. Factor D, en función de la posición de la malla

Posición	Primera	Segunda	Tercera	Cuarta
Factor D	1,00	0,90	0,80	0,70

Nota. Fuente: Fueyo (1999)

Tabla 8. Factor E. Se aplica cuando el cribado es por vía húmeda

Luz del hueco cuadrado en mm	2	3	5	6	8	10	12	20	25	o mas
Factor E	1,10	2,00	2,50	2,50	2,25	2,00	1,50	1,30	1,20	1,10

Nota. Fuente: Fueyo (1999)

(Fueyo, 1999), Fueyo estableció el rendimiento o eficiencia de cribado ( $E_0$ ), expresando el porcentaje de los productos finos de la alimentación que pasan a través de la criba. Aunque es un valor muy complejo de obtener, ya que depende de gran cantidad de factores, existen varias fórmulas que realizan estos cálculos. Los factores influyen en el rendimiento de paso se pueden asumir los siguientes:

- Factores propios de la superficie de cribado: dimensión y formas de las aberturas, perfil de la sección de paso, inclinación, superficie libre de paso, entre otros.

- Factores propios del producto a cribar: granulometría, eficiencia de forma, distribución de tamaño, humedad, plasticidad, etc.
- Factores propios del movimiento de la criba: frecuencia del movimiento, amplitud, coeficiente de aceleración, ángulo de trabajo, etc.
- Factores propios a las condiciones de trabajo de la criba: número de paños, velocidad de alimentación, coeficiente de disponibilidad, eficiencia, entre otros.

Una de las fórmulas de eficiencia más empleadas (Fueyo, 1999), es la descrita a continuación:

$$E = 100 * P * \frac{P}{A * a}$$

Ecuación 3. Formula de eficiencia

Como  $A = P + R$ ,  $Aa = Pp + Rr$ , la Ecuación 3, puede ser planteada como la expresión siguiente:

$$E (\%) = \frac{100 * 100 * (a - r)}{a * (100 - r)}$$

Ecuación 4. Eficiencia

siendo:

$m$ : es la abertura de la malla de la criba

$A$ : la masa de alimentación

$P$ : la masa del material pasante

$R$ : la masa de rechazo

$a$ ,  $p$  y  $r$ : porcentajes de partículas con dimensiones inferiores a  $m$ , respectivamente en la alimentación, pasante y rechazo, el rendimiento o eficiencia de cribado viene dado por la fórmula:

Se establece que los granos de dimensiones críticas son los granos de dimensiones comprendidas entre  $m$  y  $m/2$ .

El rendimiento de cribado es necesario para determinar de la superficie de la criba, con el objeto de no perder producción por el uso de una superficie menor.

## Metodología planteada por Kelly

(Kelly, 1990), como se mencionó anteriormente, el describe dos métodos empíricos para el cálculo de la superficie de cribado, el primero basado en tabulaciones o en gráficas y el segundo en pruebas hechas con el material real. Ambas metodologías se describen a continuación:

- **Método del factor empírico:** este método se basa principalmente en función de la rapidez de flujo de masa de la alimentación. (Kelly, 1990), plantea la siguiente ecuación para el área de la superficie de cribado:

$$A = \frac{I}{(Iu/\rho_b) \rho_b * K\Sigma}$$

Ecuación 5. Área de la superficie de cribado

Donde:

A= área de la superficie de cribado

I= rapidez de flujo de la masa de la alimentación

Iu = capacidad unitaria

$\rho_b$ = densidad global de la alimentación

$K\Sigma$ = el producto de diversos productos de corrección

Este autor plantea el uso de 10 factores de corrección ( $K$ ) en la ecuación para calcular la superficie de cribado, básicamente esta es una de las diferencias más sobresaliente entre las distintas formulaciones, encontradas en la bibliografía. Estos factores son especificados en la Tabla 10.

Tabla 9. Método del factor

<b><i>Iu</i></b>	<b>Capacidad unitaria</b>
<b><math>K_{\Sigma}</math></b>	$K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6 \times K_7 \times K_8 \times K_9 \times K_{10}$
<b><math>K_1</math></b>	Factor de área abierta: (% de área abierta de la criba) / 100
<b><math>K_2</math></b>	Factor de medio tamaño: para hacer correcciones por el porcentaje de alimentación que pasa por una abertura de la criba (Figura 11).
<b><math>K_3</math></b>	Factor de sobretamaño: un factor para hacer correcciones por el porcentaje de sobretamaño en la alimentación (Figura 12).
<b><math>K_4</math></b>	Factor de eficiencia de cribado (Figura 13).
<b><math>K_5</math></b>	Factor de cubierta: para hacer correcciones por la longitud efectiva reducida de las cubiertas inferiores (Tabla 14)
<b><math>K_6</math></b>	Factor de ángulo de la criba: para hacer correcciones por la inclinación no óptima de la criba (Tabla N 15)
<b><math>K_7</math></b>	Factor de cribado en húmedo (Tabla 16)
<b><math>K_8</math></b>	Factor de forma de la abertura (Tabla 17)
<b><math>K_9</math></b>	Factor de forma de la partícula (Tabla 18)
<b><math>K_{10}</math></b>	Tenacidad o condición de humedad de la superficie (Tabla 19)

Nota. Fuente: Kelly, 1990

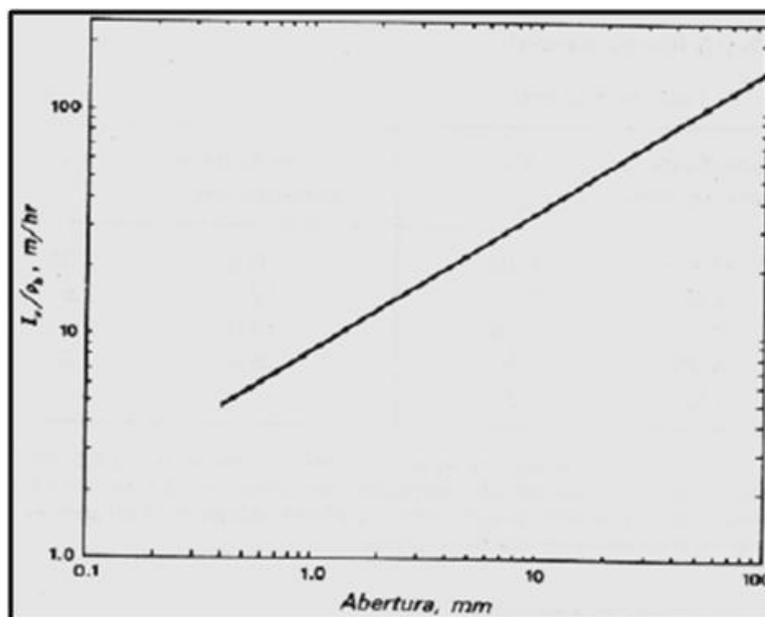


Figura 17. Datos típicos de capacidad unitaria para una criba vibratoria

Nota. Fuente: Kelly, 1990

En las Figuras 17, 18, y 19, muestran las gráficas que permiten estimar los valores típicos de  $I_u$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  y de  $K_4$ . Estos valores fueron determinados por numerosos ensayos previos. Como el método lo indica, son datos tabulados o gráficas.

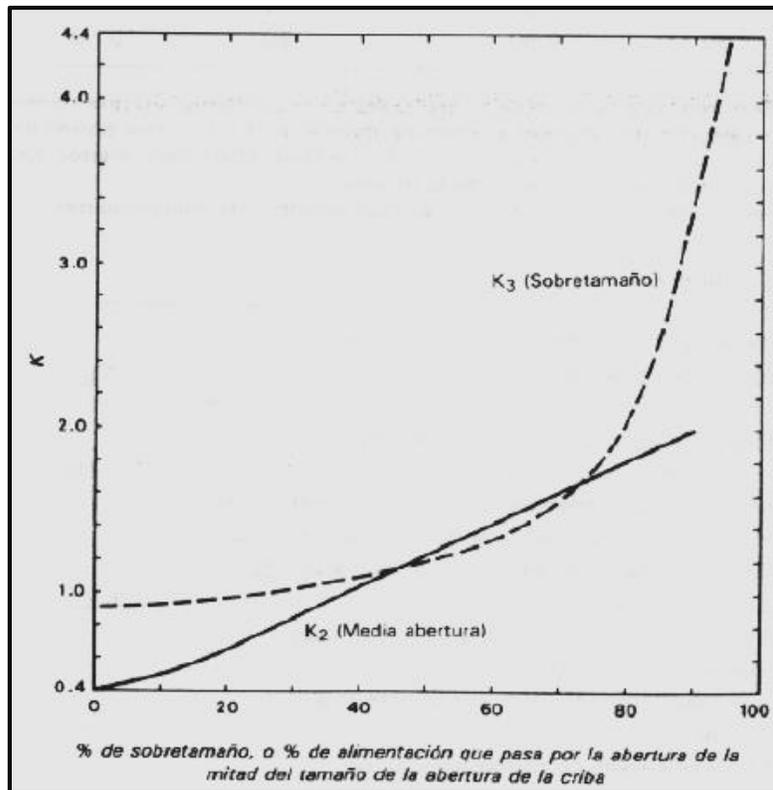


Figura 18. Valores típicos de los factores de cribado del material del sobretamaño  $K_3$  y de media abertura  $K_2$

**Nota.** Fuente: Kelly, 1990

La Figura 19, muestra la gráfica para determinar el factor de eficiencia de cribado, a partir del porcentaje de capacidad nominal o factor de eficiencia.

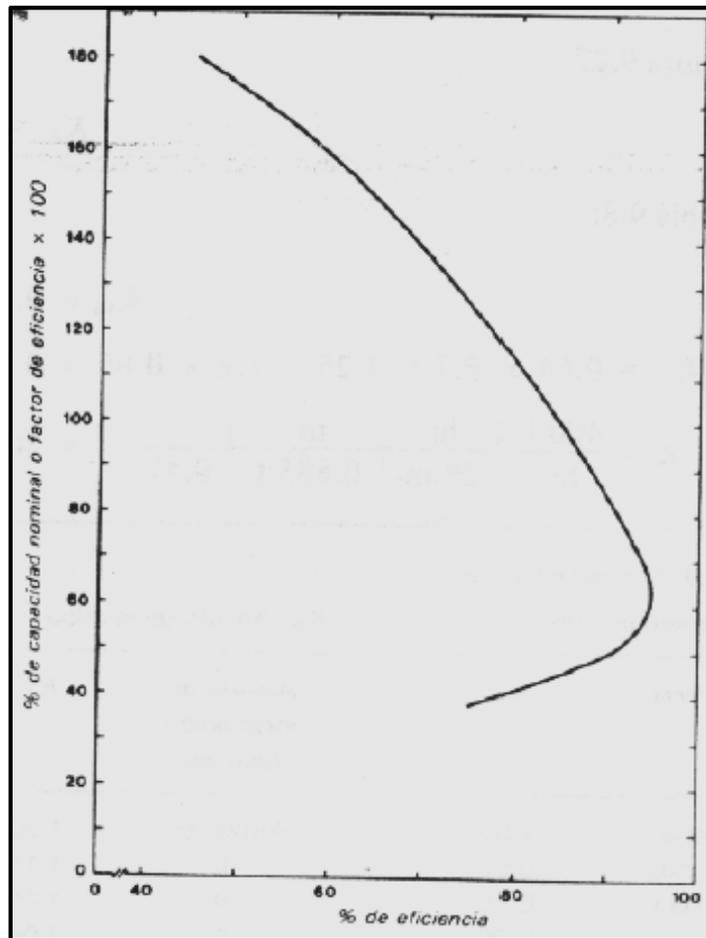


Figura 19. Valores típicos del factor de eficiencia  $K_4$

**Nota.** Fuente: Kelly, 1990

En la Tabla 10, se indica el valor de  $K_5$  según el número de posición de cubierta en la que se encuentran el o los paños de la criba. Asimismo, el factor de ángulo de la criba  $K_6$  dependerá de la inclinación que tenga dicha criba. En la Tabla 11, se muestra el valor de  $K_6$  ángulos que van desde  $0^\circ$  hasta  $20^\circ$ .

Tabla 10. Factor de número de posición de la cubierta

<b><math>K_5</math>: Número de cubierta</b>	
<b>Cubierta</b>	<b><math>K_5</math></b>
<b>Superior</b>	1.00
<b>Segunda</b>	0.90
<b>Tercera</b>	0.80
<b>Cuarta</b>	0.70

Nota. Fuente: Kelly, 1990

Tabla 11. Factor de ángulo de la criba

<b><math>K_6</math>: Ángulo de la criba</b>	
<b>Ángulo de inclinación (grados)</b>	<b><math>K_6</math></b>
<b>Horizontal</b>	1.20
<b>5</b>	1.15
<b>10</b>	1.05
<b>15</b>	1.00
<b>20</b>	0.95

Nota. Fuente: Kelly, 1990

El factor  $K_7$ , se usa cuando se agrega agua al material a razón de 1 a 2.5 vol. %. Cabe destacar que para tamaños de alimentación mayores de 25 mm, el cribado en húmedo se vuelve mucho menos eficaz. Para dimensiones por debajo de 850  $\mu\text{m}$ , el cribado en húmedo plantea problemas (Kelly, 1990). Se encuentra tabulado en la Tabla 12.

Mientras que los diferentes valores para las formas de las aberturas de las mallas de cribado  $K_8$ , se muestra en la Tabla 13.

Tabla 12. Factor de cribado en húmedo

<b><math>K_7</math>: Cribado en húmedo</b>			
<b>Tamaño de la abertura (mm)</b>	<b><math>K_7</math></b>	<b>Tamaño de la abertura (mm)</b>	<b><math>K_7</math></b>
<b>0.8</b>	1.25	9.5	2.25
<b>1.6</b>	1.5	12.7	2.5
<b>3.2</b>	1.75	19.0	2.71
<b>4.75</b>	1.9	25.4	2.9
<b>7.9</b>	2.1		

Nota. Fuente: Kelly, 1990

Tabla 13. Factor de forma de la partícula

<b><math>K_8</math>: Forma de la abertura</b>	
<b>Forma</b>	<b><math>K_8</math></b>
<b>Abertura cuadrada</b>	1.0
<b>Longitud de ranura, 6 o más veces el ancho</b>	1.60
<b>Longitud de ranura, 3 a 6 veces el ancho</b>	1.40
<b>Longitud de ranura, 2 a 3 veces el ancho</b>	1.10
<b>Aberturas circulares</b>	0.80

Nota. Fuente: Kelly, 1990

Kelly (1990), indica que el porcentaje de partículas alargadas en la alimentación que tienen una relación de longitud a anchura mayor de 3 a 1, y que tienen un ancho mayor que la mitad del ancho de la abertura pero menor que una y media veces el ancho de la misma. Además, los factores  $K_8$  y  $K_9$  son estrechamente interdependientes. Tabla 13 y Tabla 14.

Tabla 14. Factor de forma de la partícula

<b><math>K_9</math>: Forma de la partícula</b>			
<b>Partículas alargadas %</b>	<b><math>K_9</math></b>	<b>Partículas alargadas %</b>	<b><math>K_9</math></b>
<b>5</b>	1.00	40	0.75
<b>10</b>	0.95	50	0.70
<b>15</b>	0.90	60	0.65
<b>20</b>	0.85	70	0.60
<b>30</b>	0.80	80	0.55

Nota. Fuente: Kelly, 1990

Tabla 15. Factor de humedad

<b><math>K_{10}</math>: Humedad</b>	
<b>Tenacidad o condición de humedad de la superficie, o ambas</b>	<b><math>K_{10}</math></b>
Roca húmeda, lodosa o pegajosa en alguna forma; yeso, rocas fosfáticas y similares.	0.75
Material con humedad superficial, procedente de minas o canteras, material de pilas de almacenaje con humedad superficial mayor de 14 vol. % pero no higroscópico.	0.85
Material seco de tajo; sustancias químicas manufacturadas por trituración, secas en terrones, humedad superficial menor de 10 vol. %.	1.00
Material secado en forma natural, no triturado; material que han sido secados antes del cribado; o materiales cribados en estado caliente.	1.25

Nota. Fuente: Kelly, 1990

El factor de la humedad es sumamente importante, ya que se debe elegir el factor  $K_{10}$  que más se ajusta al tipo de material o roca que se quiere cribar para obtener los resultados deseados. (Tabla 15).

- **Método de las características de cribado:** el segundo método para calcular las dimensiones de una criba, implica el uso de tamices para determinar las características durante el cribado del material en cuestión. Se efectuó una sola prueba en ciclo cerrado en una pequeña criba de escala de laboratorio para generar un factor de aumento progresivo y explicar así las dos diferentes acciones de cribado.

Luego se realiza una serie de pruebas con un solo tamiz usando diferentes cargas (es decir, espesores iniciales del lecho). Estas pruebas deben efectuarse con sólo un tamaño de abertura, el que ha de usarse en la práctica. Al hacer funcionar el tamiz en un sacudidor durante diversos tiempos, la creciente acumulación de subtamaño en el recipiente permite obtener gráficas de la eficiencia contra el espesor inicial del lecho. La Figura 20 y la Figura 21, contienen resultados ilustrativos tabulados, donde, estos conjuntos de curvas, representan las características de cribado del material sometido a prueba.

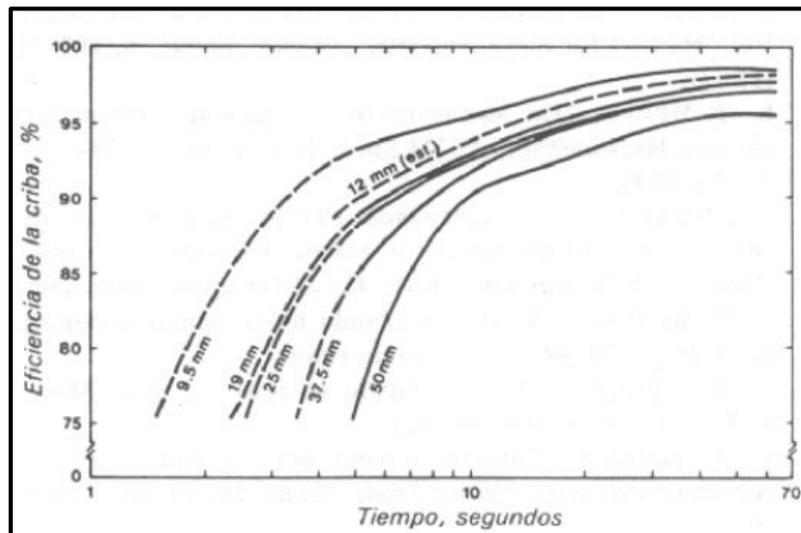


Figura 20. Características de respuesta de cribado a espesor constante de los finos de carbón mineral húmedo

Nota. Fuente: Kelly, 1990

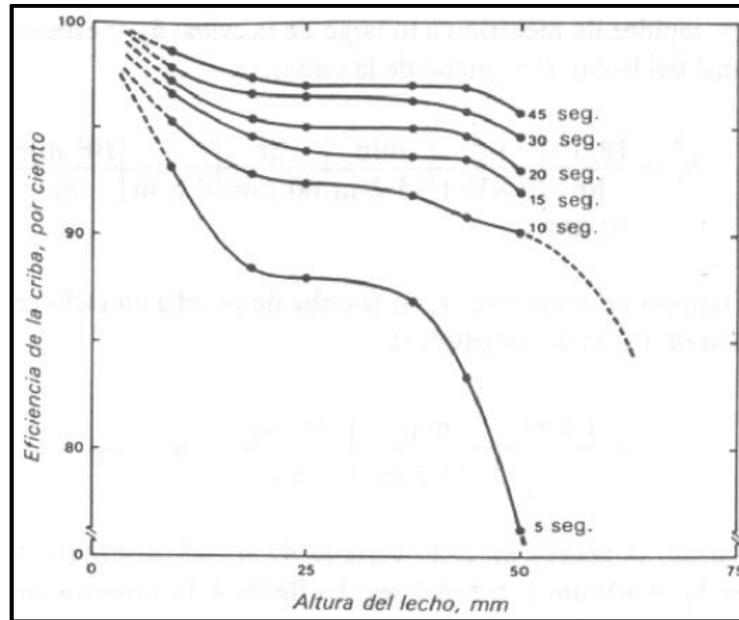


Figura 21. Características de respuesta de cribado a tiempo constante de los finos de carbón mineral húmedo

Nota. Fuente: Kelly, 1990

### **Metodología planteada por Bouso**

Para el desarrollo de esta metodología se tomaron distintos factores de corrección, necesarios por las características del material y de la criba. Dichos factores, permitirán corregir la capacidad básica establecida en unas condiciones específicas (carbón, material triturado y natural) que por supuesto, difícilmente se ajustarán a la operación a estudiar (Tabla 16). La capacidad básica multiplicada por todos estos factores de corrección, que se recogen finalmente en un factor total (ft), nos dará una capacidad corregida (Bc).

Es necesario definir el término de capacidad específica, sin embargo esta definición está sujeta al método que el investigador escoja para desarrollar los cálculos. De acuerdo con (Bouso, 2010), si se utilizan las unidades en el Sistema Internacional (SI), la superficie específica en cuestión, es de  $1 \text{ m}^2$  y la luz de paso de la malla (Lm) se expresa en mm y la masa sólida se expresa en  $\text{t/h. m}^2$ . Entonces, se conoce como capacidad básica o específica, bien de paso o de alimentación, a una malla de luz determinada.

(Bouso, 2010), indica que la capacidad específica según el primer método, basado en la alimentación a una malla, da valores mayores que el segundo, basado en la masa que pasa a través de la misma. Para este caso, la capacidad específica o básica tabulada que señala el autor, están en función del tonelaje teórico que debe pasar la malla.

Por lo tanto, tonelaje teórico que debe atravesar la malla ( $T_p$ ), dividido por la capacidad básica corregida, nos dará finalmente la superficie de cribado necesaria ( $S$ ), para la clasificación estudiada.

Para describir el Método Híbrido, Bouso (1999) se explica con detalle, cada uno de los parámetros y condiciones que afectan a la capacidad del cribado, y por consiguientemente a la superficie necesaria. Dichos parámetros y condiciones son valores definidos tras numerosas series de pruebas. Los factores de corrección determinados por Bouso (1999) serán expuestos a continuación:

**Forma del material:** los valores de la capacidad básica han sido calculados separadamente para productos naturales o de forma redondeada, y para productos triturados o de forma cúbica, por lo cual primeramente hay que definir el tipo de producto, para tomar el valor correcto de las dos opciones posibles.

**Capacidad básica o específica:** esta capacidad (Tabla 16) es expresada en  $t/m^2.h$  de producto de densidad aparente  $1,6 t/m^3$  que pasa por una malla de luz determinada, de alambre de acero y con área libre del 50%, colocada en la primera posición de una criba instalada con una inclinación de  $20^\circ$ . El producto de alimentación con un contenido de partículas superiores a la luz de malla, rechazo, del 25% y de partículas inferiores al tamaño mitad de la malla, semitamaño, del 40%. Eficiencia de cribado considerada del 94%.

**Densidad específica aparente:** los valores “empíricos” de la capacidad básica están basados en un producto de densidad específica  $1,6 t/m^3$ , por lo que cualquier otro producto de distinta densidad tendrá una capacidad proporcional a la misma, es decir, el valor de la capacidad básica deberá ser corregido con un factor:

$$af_a = \frac{\rho_a}{16}$$

Ecuación 6. Factor de la densidad

Tabla 16. Valores establecidos para tres tipos de materiales con la respectiva luz de malla

<b>CAPACIDAD BÁSICA B (t/m<sup>2</sup>.h)</b>			
<b>Luz de malla mm</b>	<b>Material</b>		
	<b>Carbón</b>	<b>Triturado</b>	<b>Natural</b>
<b>0.50</b>	2.0	2.7	3.5
<b>0.80</b>	2.6	3.4	4.4
<b>1.00</b>	2.8	3.7	4.9
<b>1.25</b>	3.1	4.1	5.5
<b>2.0</b>	4.0	5.3	7.1
<b>4.0</b>	6.0	8.0	10.5
<b>5.6</b>	7.5	10.0	13.0
<b>6.3</b>	8.1	10.8	14.0
<b>8.0</b>	9.4	12.5	16.0
<b>10.0</b>	10.8	14.4	18.6
<b>12.5</b>	12.5	16.6	21.5
<b>16.0</b>	14.3	19.0	25.1
<b>20.0</b>	16.5	22.0	29.0
<b>25.0</b>	19.5	26.0	33.4
<b>31.5</b>	22.5	30.0	37.9
<b>40.0</b>	26.0	34.7	42.5
<b>50.0</b>	29.3	39.0	47.4
<b>63.0</b>	33.0	44.0	52.0
<b>80.0</b>	36.8	49.0	57.0
<b>100.0</b>	42.0	56.0	63.0
<b>120.0</b>	47.3	63.0	68.0

Nota. Fuente: Bouso, (1999)

**Partículas superiores al tamaño de clasificación o rechazo (R):** la capacidad básica considera un producto de alimentación con un 25 % de rechazo, por lo que cualquier otro porcentaje, significa que debe corregirse la capacidad básica con un factor  $f_r$  lógicamente  $f_r = 1$  para un valor del rechazo  $R = 25 \%$  (Tabla 17).

Tabla 17. Factor de rechazo

<b>FACTOR DE RECHAZO</b>										
<b>R</b>	0	5	10	145	20	25	30	35	40	45
<b>Factor <math>f_r</math></b>	<b>1.10</b>	<b>1.08</b>	<b>1.06</b>	<b>1.04</b>	<b>1.02</b>	<b>1.00</b>	<b>0.98</b>	<b>0.96</b>	<b>0.94</b>	<b>0.92</b>
<b>R</b>	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

Nota. Fuente: Bouso, (1999)

**Partículas inferiores a la mitad del tamaño de clasificación:** Como en el factor anterior, la capacidad básica fue calculada en base a un producto conteniendo 40 % de partículas más finas que la mitad de la luz de la malla, por eso cualquier desviación debe ser corregida aplicando un factor  $f_s$  (Tabla 18), siendo,  $f_s = 1$  para un valor del semitamaño de 40 %.

Tabla 18. Factor de semitamaño

FACTOR DE SEMITAMAÑO										
<b>Semitamaño</b>	0	0.50	10	15	20	25	30	35	40	45
<b>Factor <math>f_s</math></b>	0.50	0.55	0.60	0.65	0.72	0.77	0.85	0.92	1.00	1.10
<b>Semitamaño</b>	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
<b>Factor <math>f_s</math></b>	1.20	1.30	1.45	1.60	1.75	1.95	2.20	2.55	3.00	3.65

Nota. Fuente: Bouso, (1999)

**Eficiencia de clasificación, (E):** Los valores de capacidad básica fueron calculados en base a una eficiencia o rendimiento de cribado, **E**, del 94 %, es decir, el 6 % de las partículas finas que debería haber pasado por la luz de la malla no pasaron, por lo que cualquier divergencia con esta hipótesis debe ser corregida con un factor de eficiencia (Tabla 19),  $f_e$  que será  $f_r = 1$  para una eficiencia  $E = 94$  %

Tabla 19. Factor de eficiencia

FACTOR DE EFICIENCIA							
<b>E</b>	98	96	94	92	90	85	80
<b>Factor <math>f_e</math></b>	0.60	0.85	1.00	1.05	1.12	1.26	1.41
<b>E</b>	75	70	65	60	55	50	45

Nota. Fuente: Bouso, (1999)

Al momento de efectuar un cálculo de cribado interesa principalmente asegurar la calidad de los diferentes productos y en general que el valor de desclasificados, **D**, en el producto grueso sea lo menor posible. Un valor normal de desclasificados podría considerarse entre 10 % y 15 %. Este valor de desclasificados condiciona la eficiencia, **E**, de cribado y con bastante frecuencia combinar una buena eficiencia y un bajo valor de desclasificados resulta imposible. Es muy frecuente que cuando el producto a cribar tiene un elevado contenido de partículas inferiores al tamaño de corte, aun con una elevada eficiencia, superior al 90 %, se obtengan

altos valores de desclasificados, y esto por pura matemática no por deficiencia del equipo de cribado.

Recíprocamente, Bouso (1999) indica que al alcanzar un bajo valor de desclasificados significaría operar con eficiencias por encima del 98 % lo cual es lógicamente imposible.

Para el cálculo de la superficie de cribado se debe conocer la relación entre eficiencia y desclasificados en función del porcentaje de partículas finas inferiores al tamaño de corte, lo que se conoce como pasante, **P**.

$$D = P * \frac{(1 - E)}{(1 - (P * E))}$$

Ecuación 7. Determinación de desclasificados (D)

$$E = \frac{(P - D)}{P * (1 - D)}$$

Ecuación 8. Determinación de la eficiencia (E)

(Bouso, 2010), define la siguiente ecuación para la superficie de cribado, utilizando la alimentación como se muestra de la siguiente manera:

$$\text{Superficie de cribado (S)} = \frac{\text{Tonelaje a cribar (T)}}{\text{Capacidad básica (B)} * \text{Factores de corrección (ft)}}$$

Ecuación 9. Superficie de cribado (S)

siendo:

S: superficie necesaria de cribado, expresada en m<sup>2</sup>.

T: masa de sólidos de alimentación o que debe pasar por la malla, expresada en t/h.

B: capacidad específica o básica, de alimentación o pasante, expresada en t/m<sup>2</sup>.

ft: factor total de corrección de la capacidad básica, sin unidades.

### 3.3.2 Parámetros para la selección de una criba

Para elegir el tipo de criba a utilizar, es necesario hacerlo en función de la naturaleza del trabajo a realizar. Dentro de los parámetros más importantes en el proceso de selección de una criba, se tienen:

- Porcentaje de área abierta: la base para escoger un tamaño específico de abertura, es obviamente el tamaño de partícula que necesita ser separado. Es más difícil la selección del diámetro del alambre (o del tamaño de la barra). Mientras menor sea este diámetro, mayor será el porcentaje de la superficie que esté disponible para el paso de las partículas, y en consecuencia mayor será la capacidad por unidad de área y eficiencia, (Kelly, 1990).
- Forma de la abertura: en la actualidad existen diversos tipos de aberturas, pero las más usadas son las cuadradas (Kelly, 1990) por su facilidad de construcción. pueden obtenerse todos los tipos de superficie de cribado con aberturas rectangulares o ranuras, las cuales proporcionan una mayor área de cribado, menos susceptibilidad al cegamiento y un paso más fácil de partículas alargadas. Además, la probabilidad de paso a través de una abertura rectangular es mayor. Estos beneficios conllevan la desventaja de una clasificación por tamaños ligeramente menos exacta.
- Abertura y diámetro del alambre: puesto que la capacidad es aproximadamente proporcional a la abertura, el tamaño de separación determina la capacidad de la criba. Un mayor diámetro de alambre o espesor de barra significa que las partículas tienen que pasar a través de un mayor espesor de la superficie de la criba, y esto también hace bajar la capacidad.
- Tamaño de la superficie de cribado: según (Kelly, 1990), indica que la capacidad es casi directamente proporcional al ancho de la criba. Una mayor longitud proporciona mayor oportunidad al paso de partículas, aumentando primordialmente la eficiencia pero aumentando solo ligeramente la capacidad.
- Efecto del ángulo de inclinación: a medida que se aumenta la inclinación de una criba, la abertura se reduce efectivamente por el coseno del ángulo de inclinación. Al mismo

tiempo, el material se mueve a través de la criba con mayor rapidez y hay indicios de que la estratificación es también más rápida. La mayoría de las cribas están diseñadas para trabajar a ángulos de 12 a 18, (Kelly, 1990).

- Espesor óptimo del lecho o capa de cribado: un aspecto importante pero difícil de aplicar, es proveer una superficie de cribado de manera que la capa de granos difíciles no sobrepase en espesor la dimensión de paso. (Fueyo, 1999) dice, que si el todo-uno contiene un 33% de granos difíciles será necesario reducir el caudal de forma que el espesor de la capa no sobrepase la abertura de la malla. No es conveniente sobredimensionar la criba excesivamente, ya que una criba sub-alimentada es tan poco eficaz como una criba sobre-alimentada. Además, (Kelly, 1990) indica, que el espesor del lecho depende de la rapidez de flujo a lo largo de la criba, es imposible calcularlo. Sin embargo, bajo un grupo de condiciones dadas, es proporcional a la rapidez de alimentación. Consecuentemente, al aumentar la rapidez de alimentación, la carga aumenta, debe elevarse la amplitud para mantener el movimiento y así también mantener alta la eficiencia.
- Humedad: los materiales completamente secos o completamente mojados son relativamente fáciles de cribar, por lo contrario, los que presentan humedad superficial tan baja como el 1%, pueden ocasionar serios problemas.

El cribado de productos húmedos es sin duda el más complejo. En un cribado fino, a causa de la viscosidad de la masa, las partículas finas se adhieren a los elementos más gruesos y son arrastrados con ellos. (Fueyo, 1999), expone las acciones de eficacia variable que intentan solucionar el problema son los siguientes:

- Empleo de luces de tamaño superiores a las deseadas.
- Aireación de la masa por dejar libres las partículas pequeñas
- Mezcla de homogeneización del material para disminuir los materiales con alto grado de humedad.
- Limpieza periódica de la superficie de cribado.
- Uso de rejillas especiales anticolmatado.

- Uso de cribas con calefacción en las telas.
- Capacidad de transporte: es la rata de alimentación para la cual la malla seleccionada pueda dar una eficiencia requerida. (Pineda & Rojas, 2004), comenta algunas de los factores que afectan la capacidad son: forma del grano, tamaño del grano, espesor de la cama del material, frecuencia de vibración, amplitud de la criba y tipo de superficie (tamaño y forma de los agujeros).

Uno de los factores que más afecta la eficiencia y la capacidad, es el taponamiento que ocurre en las mallas por las partículas de tamaño casi pero no iguales a las aberturas de las mallas de la criba.

- Efecto de la longitud y el ancho: la capacidad es incrementada con el aumento de la anchura de la superficie de cribado, mientras que el incremento de la longitud, beneficia la eficiencia de la misma. Siendo la longitud la distancia que debe viajar un grano para salir de la criba, la cual al ser incrementada, permite que esta partícula permanezca más tiempo esperando la abertura o la posición precisa para traspasar la malla (Pineda & Rojas, 2004).

Además, es importante destacar que según (Fueyo, 1999), indica que la longitud de las cribas vibrantes normales varía de 1,5 a 3 veces el ancho.

Basándose en esto, se debe optar por determinar una longitud suficiente que permita que las partículas estén el tiempo necesario para atravesar la malla, indistintamente que se clasifiquen como pequeños o como cercano.

- Eficiencia: es la relación entre las piezas de menor tamaño que pasan a través de la criba, cubierta completamente de ellas sobre la cantidad total de la misma, en la alimentación inicia (Pineda & Rojas, 2004). No es posible obtener el 100% de la eficiencia, a no ser que el gasto de potencia sea muy grande y por ende, la capacidad muy baja.
- Número y tipos de mallas: la cantidad de mallas afecta la clasificación, pues a mayor número de mallas, la selección o clasificación de tamaños, se realiza con mayor eficiencia y la clase de mallas está determinada por las características físicas del material como el tamaño, la forma y el peso (Pineda & Rojas, 2004).

### 3.4 Tipos de cribas sugeridas para el carbón

#### 3.4.1 Generalidades

Existen diversas cribas para tipos de materiales específicos, en el caso del carbón mineral se muestran a continuación:

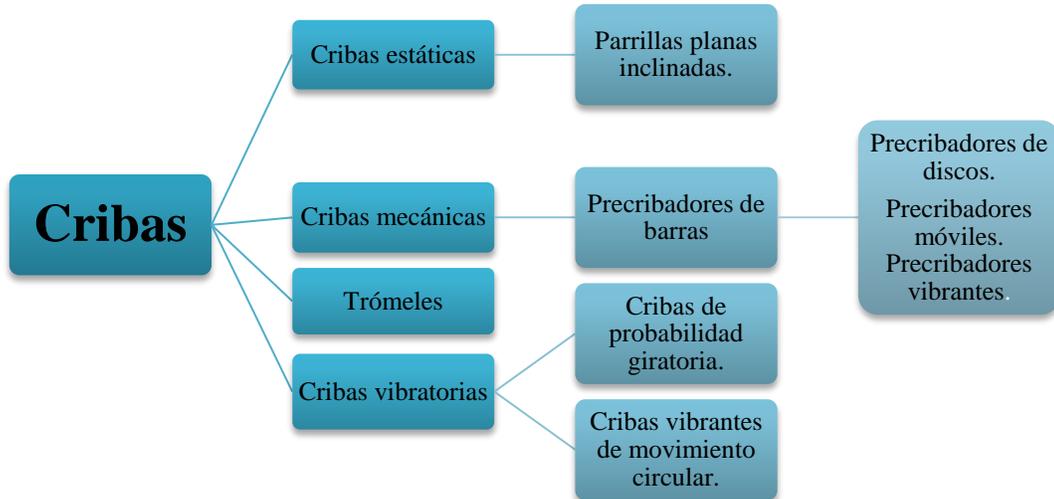


Figura 22. Tipos de cribas sugeridas para el carbón

Nota. Fuente: (Fueyo, 1999); (Kelly, 1990); Edición Propia

#### 3.4.2 Sistema de cribado de carbón

Después que el carbón es extraído de la mina, se procede (de acuerdo a su utilidad) a cribarlo para separar los fragmentos más gruesos contenidos en una mezcla, con el fin de eliminarlos o para enviarlos a una nueva etapa de fragmentación, de aquellos otros con las dimensiones requeridas, y así satisfacer las necesidades del o los tamaños requeridos para que los procesos posteriores operen de forma adecuada. Una vez clasificado los tamaños de interés, estos se pueden enviar a trituradoras y/o molinos para disminuir su dimensión o también se pueden transportar por medio de cintas transportadoras para conformar pilas para su posterior aprovechamiento.

Para el diseño de una criba, se deben considerar muchos factores. Algunos pueden ser asumidos de datos tabulados y otros calculados sobre la operación. Aunque se conoce que

calcular el valor de la cantidad de estos factores basados en una fórmula. Por ello, se requiere de diseñadores que manejen y entiendan muy bien sobre el trabajo y sus variaciones.

### **3.5 Cintas transportadoras**

Como su nombre lo indica, son bandas que se utilizan para transportar materiales, ya sea mineros, con fines industriales, agrícolas, entre otros. Según el catálogo de (Lozano, 2014), nos dice, que son equipos que se diseñan para adaptarse a cada necesidad concreta, para lo cual se fabrican numerosas tipologías distintas, en función del tamaño del material, caudal, naturaleza del producto a transportar, características de humedad, entre otros. Estas presentan diversas características:

- ✓ Fijas y móviles (soluciones estándar o soluciones especiales).
- ✓ Ripables, para apoyar directamente en el suelo sin necesidades de cimentación.
- ✓ Desplazables sobre ruedas motorizadas mediante motores eléctricos o hidráulicos.

Las cintas transportadoras, además de usarse como componentes en la distribución y almacenaje automatizados, son elementos auxiliares de las instalaciones, cuya misión es la de recibir un producto de forma más o menos continua y regular para conducirlo a otro punto. Así mismo, generalmente, las bandas transportadoras son utilizadas posteriormente en un cribado, ya que permite almacenar el material después de ser clasificado granulométricamente.

Para calcular los componentes de una cinta transportadora se deben establecer ciertos parámetros necesarios, a partir de la capacidad horaria de transporte que se necesita.

El ancho mínimo de la banda depende del tamaño máximo del material a transportar para evitar que se derrame y del esfuerzo a la tensión que debe soportar.

(De Abreu, 2000), dice que el valor de la velocidad, está relacionada con el tipo de material a transportar y además, está limitada por las condiciones de carga, tipo y tamaño máximo del material.

Para determinar la capacidad teórica, el autor parte en definir, tres tipos de materiales:

1- Arenas finas, cemento, entre otros.

2- Fragmentos de roca, gravas, es decir, la mayor parte de los materiales en minería.

3- Nódulos de arcilla y carbones bituminosos húmedos, entre otros.

Con estas consideraciones la capacidad teórica puede calcularse de la siguiente formula:

$$Q = 3600 * d * k * p * v * L^2$$

Ecuación 10. Capacidad teórica

Siendo:

k: coeficiente del tipo de material (0,45 para material tipo 1°; 0,49 para tipo 2° y 0,535 para tipo 3°)  
Tabla 20.

d: factor de reducción de pendiente de la banda. (Varia de 1 para 0°, 0,97 para 10°; 0,87 para 20° y 0,78 para 25°) Tabla 21.

p: peso específico del material (t/m<sup>3</sup>)

v: velocidad (m/s)

L: ancho de la banda (mm)

De acuerdo al tipo de material, se determina el coeficiente que viene dado por sus características. Tabla 20.

Tabla 20. Coeficiente del tipo de material (k)

Tipo	Materiales tipo	Coeficiente del tipo de material (k)
1	Arenas finas, cemento, entre otros.	0,45
2	Fragmentos de roca gravas, es decir, la mayoría de los materiales de minería.	0,49
3	Nódulos de arcilla y carbones bituminosos húmedos, entre otros.	0,535

**Nota.** Fuente: De Abreu, (2013). Edición Propia

En la Tabla 21, posterior, se muestra el factor de reducción por la pendiente de banda transportadora.

Tabla 21. Factor de reducción por pendiente de la banda (d)

Ángulo de inclinación	Factor de reducción por pendiente de la banda (d)
0°	1
10°	0,97
20°	0,87
25°	0,78

**Nota.** Fuente: De Abreu, (2013). Edición Propia

El ancho de la banda debe ser apropiado para el tamaño del material a transporta. En la relación siguiente, lo hacen en función del ancho de la banda (L) y en el tamaño máximo del material no tamizado (lm), por lo que, esto se comprueba con las relaciones.

$$L \geq 2 * lm + 0,2$$

La separación entre los rodillos superiores que soportan la carga dependerá del peso de la banda, del peso del material transportado y de la tensión de la banda.

Las separaciones de los rodillos portadores o superiores (Tabla 22) y la separación de los rodillos inferiores (Tabla 22), ambas distancias varían, ya que se toma en cuenta cuando está cargada (portadora) y cuando está vacía (inferior o de retorno). Además se debe tomar en consideración la separación en los extremos de la correa, que vienen dado por los factores B y C, datos ya tabulados (Tabla 22).

(De Abreu, 2000), sugiere que para determinar la potencia necesaria para el funcionamiento de la cinta transportadora se deben tener en cuenta la potencia para la marcha en vacío ( $W_1$ ), la potencia para transporte horizontal de material ( $W_2$ ), y la potencia para la elevación del material ( $W_3$ ).

Tabla 22. Separación de los rodillos

Ancho de la correa (mm)	S <sup>P</sup> = Separación de los rodillos portadores (m)						Separación en los extremos de la correa		Separación rodillos de retorno (m)
	Toneladas/m <sup>3</sup>						B (min)	C (min)	S <sup>R</sup>
	0,5	0,82	1,2	1,65	2	2,45			
<b>350 - 400</b>	1,65	1,65	1,5	1,5	1,35	1,35	0,6	0,45	3
<b>450 - 500</b>	1,5	1,5	1,5	1,35	1,35	1,20	0,75	0,6	3
<b>600</b>	1,5	1,5	1,35	1,35	1,20	1,20	1	0,75	3
<b>800</b>	1,5	1,35	1,20	1,20	1	1	1,35	0,9	3
<b>900</b>	1,35	1,35	1,20	1,20	1	1	1,50	1	3
<b>1000</b>	1,35	1,35	1,20	1,20	1	1	1,80	1,20	3
<b>1200</b>	1,20	1,20	1	1	1	0,9	1,50	1,50	2,75
<b>1400</b>	1,20	1,20	1	1	0,9	0,9	1,65	1,65	2,75
<b>1500</b>	1,20	1	1	1	0,9	0,9	1,80	1,80	2,45

Nota. Fuente: (De Abreu, 2000). Edición propia

Para determinar la potencia para la marcha en vacío ( $W_1$ ) se debe tomar el peso de la cinta transportadora (Tabla 23), así como también la de los rodillos, tanto portadores como retornos. Tabla 24 y Tabla 25, Además, en la determinación del peso de los rodillos, se define mediante el diámetro del mismo, así como también el ancho de la banda.

Tabla 23. Peso aproximado de las correas transportadoras

Ancho de la correa (mm)	Peso aproximado en (Kg/m)
<b>300</b>	2
<b>350</b>	2,5
<b>400</b>	3
<b>450</b>	4,5
<b>500</b>	5
<b>600</b>	7
<b>650</b>	8
<b>800</b>	12
<b>900</b>	14
<b>1000</b>	16
<b>1200</b>	25
<b>1400</b>	31
<b>1500</b>	34
<b>1600</b>	40
<b>1800</b>	51
<b>2000</b>	57

Nota. Fuente: De Abreu, (2013). Edición Propia

Tabla 24. Peso aproximado de los rodillos portadores

Ancho de la correa (mm)	Diámetro rodillos (mm)			
	100	125	150	175
	Peso en kg / conjunto de rodillos			
300	6	11	15	
350	7	12	16	
400	7	12	17	
450	8	13	18	
500	8	14	19	
600	9	15	20	
650	10	16	22	
800	11	18	24	
900		19	26	56
1000		21	28	60
1100		22	29	63
1200		23	31	67
1300		25	33	71
1400		27	35	74
1500		28	37	78

Nota. Fuente: De Abreu, (2013). Edición Propia

Tabla 25. Peso aproximado de los rodillos de retorno

Ancho de la correa (mm)	Diámetro de los rodillos (mm)			
	100	125	150	175
	Peso en Kg / conjunto de rodillos			
300	5	7	10	
350	6	8	11	
400	6	8	12	
450	7	9	13	
500	7	10	14	
600	8	11	15	
650	9	12	17	
800	10	14	19	
900		15	21	44
1000		17	22	48
1100		18	23	51
1200		19	25	55
1300		21	27	59
1400		23	28	62
1500		24	29	66

Nota. Fuente: De Abreu, (2013). Edición Propia

### **3.6 Resistencia a la fragmentación**

Peláez (1981), La resistencia que opone una roca a fragmentarse, depende de la cohesión y la elasticidad. Las fuerzas que las máquinas de fragmentación aplican a las partículas con que se alimenta crean esfuerzos y tensiones dentro del género, produciendo la fractura cuando se excede el límite elástico del material. Es evidente que no habrá fractura si la intensidad de las fuerzas aplicadas es insuficiente.

El UCS (*Unconfined Compressive Strength*) o resistencia compresiva no confinada, es la máxima carga compresiva que la roca tomará antes de la falla cuando no esté apoyada ya sea en los planos perpendiculares y se expresa en psi o Mpa. El puntaje puede variar desde 0 (si UCS < 1 Mpa) hasta 15 (si UCS > 250 Mpa).

# CAPÍTULO IV

## MARCO METODOLÓGICO

---

En este capítulo se detallan cada uno de los aspectos relacionados con la metodología, que se seleccionó para desarrollar el proyecto, el cual se orienta hacia la obtención del diseño de un sistema de cribado para carbón mineral que se utiliza en la producción de ferroaleaciones de níquel. Se describen el conjunto de acciones destinadas al análisis del problema planteado, a través de procedimientos específicos que incluye las técnicas de observación, recolección y análisis de datos.

### **4.1 Tipo de investigación**

Este trabajo se desarrolló de acuerdo las bases de una investigación de campo del tipo descriptiva y proyectiva (proyecto factible) con el objetivo de ser aplicada.

De campo ya que se realizan exploraciones y reconocimientos de las zonas donde se manipula el carbón mineral, así como también, la toma de muestras. Es del tipo descriptivo, ya que los estudios descriptivos de acuerdo con (Dankhe, 1986), buscan especificar las propiedades importantes del sujeto de estudio y someterlo a análisis. Dado que durante la investigación se consiguieron divergencias entre los diferentes autores y diseñadores de equipos de clasificación, en cuanto a metodología a utilizar para su escogencia, la experiencia del diseñador y el operador de los equipos son la herramienta principal en esta industria, se decidió estudiar las características del carbón mineral y establecer cuál de los postulados arrojaba mejor resultados. También es una investigación aplicada ya que persigue fines más directos e inmediatos para solventar un problema industrial.

### **4.2 Diseño de la investigación**

En el estudio de los factores para el diseño del sistema de cribado y específicamente el determinar los parámetros de la criba, el diseño consiste en el procedimiento operativo que se aplicó para recoger la información. Se utilizó un diseño de investigación de campo no experimental, con estudios cuantitativos.

De acuerdo con (Sabino C, 1992), el diseño de la investigación es posible clasificarlo en función del tipo de datos a ser recogido (bibliográfico o de campo). De acuerdo a la manera en cómo se recolectó la información de las características físicas y químicas del carbón para este estudio, a través de la Gerencia de Procesos y Aseguramiento de Calidad de la empresa. Esta investigación corresponde al tipo de campo.

Por otro lado, la investigación no experimental definida por (Hernández R. , 1998), es aquella en donde no se hace variar intencionalmente las variables independientes, solo se encarga de observarlas tal y como se dan en su contexto natural, además, este autor también indica que el diseño no experimental transeccional tiene como propósito describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. Esto en virtud que la investigación tomó datos durante el período de tiempo de mayo–agosto 2013.

Esta investigación tiene etapas cuantitativas, ya que se desarrollan ensayos físicos y mecánicos en los laboratorios, con las muestras de carbón tomadas dentro de la empresa Loma de Níquel, para determinar los valores de los factores que permiten escoger el sistema de clasificación donde se identifican las características y variables propias del carbón mineral, que permitirán definir los parámetros clave para la interpretación y descripción de las características del material para los cálculos pertinentes para llevar a cabo el diseño del sistema de cribado. En la Figura 23, se presenta un esquema con las etapas del diseño de la investigación.

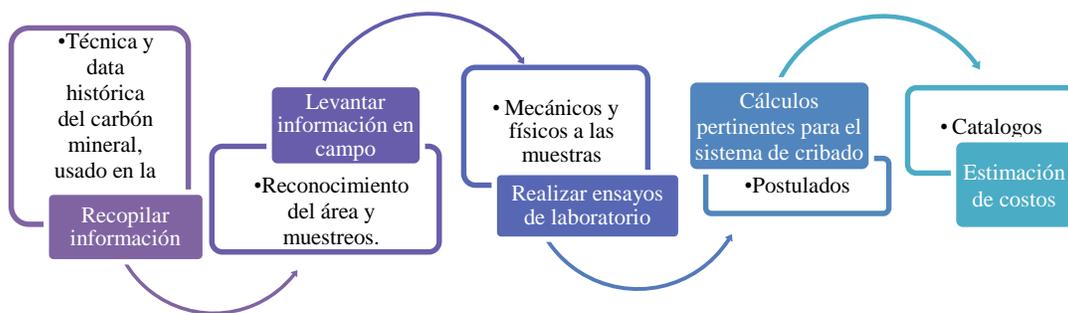


Figura 23. Etapas del diseño de la investigación

Nota. Fuente: Propia

### 4.3 Población y muestra

De acuerdo con el objetivo central de la investigación, el cual es diseñar un sistema de cribado para el carbón mineral utilizado para los procesos siderúrgicos de la empresa Loma de Níquel, siendo el carbón mineral el objeto de este trabajo. La población seleccionada está constituida por el carbón mineral ubicado en los patios externos, A y B y en 380, de la empresa entre los meses octubre–enero, como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Ubicación de los Patios externos y el área 380, donde almacenan el carbón mineral. Cortesía de la empresa Loma de Níquel

**Nota.** Fuente: Propia

Dado las características de este tipo de investigaciones la muestra está constituida por los datos de análisis granulométricos, físicos y químicos mensuales y una muestra física de carbón representativa con la finalidad de obtener información confiable y representativa.

Sin embargo, como hay un componente práctico para determinar algunas características del carbón para los cálculos, también se tomó una muestra física de estudio. Se extrajeron de los patios, un total de 56 Kg a través de una técnica de selección, que se detalla en la descripción de las tomas de material en el siguiente punto.

Para el cumplimiento del objetivo número dos (2), se utilizó la data del mes de mayo hasta el mes de agosto, dando un total de 1001 muestras de carbón mineral. Dichas muestras fueron tomadas y estudiadas por el personal de la Gerencia de Procesos y Aseguramiento de Calidad.

Las muestras se tomaron a partir del mes de mayo de 2013, ya que desde dicho mes se comenzó a recibir otro carbón mineral, es decir, hubo cambio de proveedor. Por experiencia de la empresa, con solo cuatro (4) meses de seguimiento del material es representativo para definir su comportamiento. Es por ello, que se definió tomar el período mayo-agosto para realizar el estudio.

#### **4.3.1 Descripción de las tomas de material**

Se tomaron muestras de mano y representativas de la pila. Para éstas, los tamaños máximos fueron hasta 220 mm de diámetro. La muestra de esta investigación, está conformada por 50,00 Kg de roca seleccionada para la realización de los ensayos físicos y mecánicos, el resto de la totalidad de los 56,00 Kg.(6,00 Kg restantes), se utilizaron para la determinación de las curvas y parámetros necesarios para los cálculos de la superficie de cribado.

Para identificar los tipos de carbón que ha utilizado la empresa sin perjuicio de los proveedores, se utilizará la siguiente nomenclatura:

- Proveedor anterior se identifica el carbón como “A1”
- Proveedor actual se identifica el carbón como “B”.

#### **4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de los datos**

##### **4.4.1. Situación actual del carbón mineral empleado en la empresa**

En primer lugar, se recopiló información, técnica para fundamentar la investigación. Esto, por medio del aporte histórico de los datos que compete al carbón mineral usado en la empresa, además, de las entrevistas no estructuradas con el personal encargado de todas las operaciones del mencionado material y del reconocimiento de las áreas donde se manipula.

Los datos recogidos en la Gerencia de Procesos y Aseguramiento de Calidad, estaban en presentaciones de hojas de cálculo, de los cuales se extrajeron información por semana (del material almacenado entre los meses mayo-agosto) de la distribución granulométrica de los diferentes patios del material. Los mismos fueron tabulados nuevamente y graficados para poder interpretarlos.

#### 4.4.2 Levantamiento de la información en campo

En la etapa de campo para la recopilación de información y toma de muestras se hizo uso de una serie de elementos, tales como:

- ✓ Libreta, bolígrafo, cámara fotográfica, entre otros.
- ✓ Bolsas de muestreo plásticas, guantes de vaqueta y pala.

En primer lugar, se recopiló información técnica para fundamentar la investigación. Esto, por medio del aporte histórico de los datos que compete al carbón mineral usado en la empresa y el reconocimiento de las áreas donde se manipula, además, de las entrevistas no estructuradas con el personal encargado de todas las operaciones del mencionado material.

#### 4.4.3 Ensayos de laboratorio para determinar parámetros físicos y características mecánicas del carbón mineral.

En este punto se describirán los parámetros y ensayos que fueron ejecutados para determinar datos importantes para la selección de la superficie de cribado más adecuada al sistema de la empresa.

#### Parámetros físicos

Se determinaron las características físicas que permitirán seleccionar el equipo de clasificación adecuado, las cuales se presentan en esquema de la Figura 25.

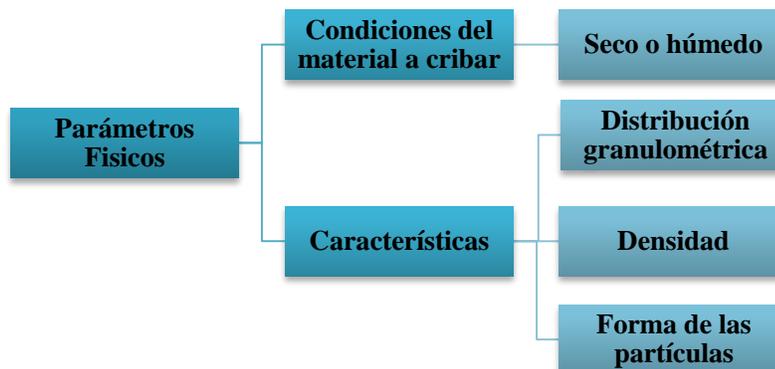


Figura 25. Parámetros físicos del material a cribar para el Diseño o selección de una Criba

Nota. Fuente: (Kelly, 1990); (Wills, s.f); (Fueyo, 1999)

- **Condiciones del material a cribar**

El carbón en estudio, se considera húmedo, debido a que presenta aproximadamente un 6% de humedad. Dicho valor, fue obtenido por el personal de la Gerencia de Procesos y Aseguramiento de Calidad de Loma de Níquel.

- **Características**

A. Determinación de la distribución granulométrica

Es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un material en sus diferentes tamaños. Se representa el resultado de este análisis mediante la llamada curva granulométrica, donde se refleja el tanto por ciento de cada intervalo de tamaños de grano que pasan por una serie de tamices establecida.

(Fueyo, 1999) dice, que los resultados granulométricos permiten determinar la dimensión media geométrica, la reducción de los módulos geométricos similares del material, el coeficiente de reducción y la desviación estándar.

Para llevar a cabo este ensayo, se tomaron seis (6) muestras de 500 gr cada uno, mediante la Balanza Mettler P2010, de apreciación de 0,1 gr (Figura 26). El mismo se ejecutó de la siguiente forma:

- En primer lugar, se cuarteó la muestra, se tomó un poco de cada cuarto, con el objetivo de obtener una muestra representativa. En este caso fue un peso aproximado a 500 g. este proceso se realizó seis (6) veces.

- Se preparó una batería de tamices (Tabla 26), con la siguiente numeración:

Tabla 26. Batería de tamices, utilizadas para hacer el ensayo granulométrico

Malla N°	2	1 <sup>3/4</sup>	1/2	1/4	4	6	10	25	100	PAM
mm	50,8	44,45	12,70	6,35	4,76	3,36	2,00	0,71	0,150	-

Nota. Fuente: Propia

Esta batería de tamices se colocó en un vibrador o sacudidor por 10 minutos (Figura 27), y luego se pesó el contenido de cada tamiz en una balanza digital OHAUS, la cual presenta una apreciación de 0,01 gr. (Figura 26).



Figura 26. Balanza Mettler P2010. Cortesía del Laboratorio de Beneficio de Minerales, Área Química, FI, UCV.

**Nota.** Fuente: Propia



Figura 27. Balanza digital OHAUS. Cortesía del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV.

**Nota.** Fuente: Propia

El peso de las muestras retenidas en cada tamiz, fueron tabulados de acuerdo con el modelo de la Tabla siguiente:

Tabla 27. Modelo utilizado para la tabulación de los datos del ensayo de granulometría

Malla N°	Abertura, mm	% Retenido	% Acumulado	% Pasante
----------	--------------	------------	-------------	-----------

**Nota.** Fuente: (Kelly, 1990); (Fueyo, 1999)

La data de distribución granulométrica suministrada por la empresa Loma de Níquel (en el período mayo-agosto), fue realizada con una batería de tamices, de que poseen las siguientes aperturas de mallas como se muestra a continuación:

Tabla 28. Aberturas de tamices que fueron utilizados en Loma de Níquel, para las curvas granulométricas

Abertura, mm
63
50
12,5
6,3
4
1

**Nota.** Fuente: Gerencia de Procesos y Aseguramiento de calidad. Edición Propia



Figura 28. Batería de tamices. Cortesía del Laboratorio de Beneficio de Minerales FI, UCV  
Nota. Fuente: Propia



Figura 29. Figura 30. Sacudidor de tamices. Cortesía del Laboratorio de Beneficio de Minerales FI, UCV  
Nota. Fuente: Propia

#### B. Densidad

La densidad del carbón mineral fue un dato facilitado por la Gerencia de Procesos y Aseguramiento de Calidad, de la empresa, que ha sido previamente calculado por el personal.

#### C. Forma de las partículas

Se definirá de acuerdo de las tabulaciones del autor que se vaya a utilizar para la del cálculo de la superficie de cribado.

### Características Mecánicas

#### ***Ensayo de Slake Durability***

Es un método utilizado para estimar cualitativamente la durabilidad de rocas débiles en el entorno de servicio, según la norma ASTM D4644. Este método de prueba se utiliza para asignar valores de durabilidad cuantitativas a las rocas frágiles.

El aparato GCTS, (Figura 31) consiste en una unidad de accionamiento de motor de dos (2) extremos montados en la base que gira 140mm de diámetro, de tambores resistentes de malla de alambre en veinte revoluciones por minuto (20 rpm) en los tanques de agua incluidas. Tambores resistentes a la corrosión están contruidos de malla de abertura de dos (2) mm con placas de extremo sólidos. La unidad es capaz de convertir cuatro tambores simultáneamente en el número de revoluciones especificado. El botón accionante se encuentra en la caja central donde se encuentra el motor.

Para el ensayo de *Slake Durability*, se tomaron veinte trozos de carbón mineral; diez (10) para el ensayo húmedo y diez (10) para el seco, de aproximadamente de masa de 40-50 gr cada fragmento. Los trozos pesaron inicialmente (antes de ensayarlas) para la prueba húmeda, 468,60 gr y para la prueba seca 463,8 gr.

Las muestras de roca fueron puestas en un aparato que comprende dos conjuntos de dos (2) tambores de longitud de 100 mm y el diámetro de 140 mm. Los dos tambores girados, uno en el agua, que tenía un nivel de unos 20 mm por debajo del eje del tambor y el otro en un medio seco. La rotación fue impulsada por un motor capaz de hacer girar los tambores a una velocidad de 20 rpm, que se mantuvo constante durante un período de diez (10) minutos. Luego, estas muestras de roca se secaron en un horno a una temperatura de 110° C, durante un máximo de quince horas. Finalmente, la masa de muestras secas se pesó para obtener el primer ciclo. La prueba fue llevada a cabo durante nueve (9) ciclos, pesándolas una vez secadas, para obtener un porcentaje de pérdida total por cada medio



Figura 31. Imagen del equipo utilizado para el ensayo de *Slake durability*. Cortesía del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV

**Nota.** Fuente: Propia

## **Ensayo de Carga puntual**

De acuerdo a la norma ASTM D5731, este método de ensayo cubre los lineamientos, requisitos y procedimientos para la clasificación y caracterización de la roca. Los tipos de especímenes en forma de núcleos de rocas, bloques o trozos irregulares pueden ser probados por este método de ensayo.

El probador de carga de GCTS Point es un aparato hecho de aluminio anodizado de alta resistencia que incorpora la tecnología digital para aumentar la precisión y la facilidad de uso, mientras que la reducción de su tamaño y peso. La introducción de un sensor de presión para medir la carga proporciona una mejor precisión en cualquier nivel de carga que elimina la imprecisión de la presión en rangos de carga baja.

El sistema tiene una pantalla digital que monitorea continuamente carga aplicada. La carga máxima se almacena de forma automática y obtenida fácilmente pulsando un botón. El equipo de carga puntual presenta las siguientes características:

- 100 KN de capacidad de carga ; mayor capacidad disponible
- Diseño compacto y ligero (< 14 Kg)
- Pantalla de salida en unidades del SI
- Salida digital con 10 N (o 1 libra) de resolución
- Opción de tamaño de la muestra automático
- Salidas de señal dual a un ordenador o un grabador de datos
- Software para la prueba rápida y automática
- Aumenta la producción y minimiza prueba de errores operacionales
- El funcionamiento de la batería interna
- Placas de carga punto de velocidad ultrasónica opcionales
- Rodillos y las células están disponibles para llevar a cabo triaxial, pruebas uniaxiales y brasileños.

Para la determinación de la resistencia a la compresión simple, se tomaron 30 espécimen de tipos irregulares, de los cuales sólo 26 fueron registrados los datos, debido a que el equipo no reconoció las cargas de las cuatro (4) muestras restantes.

Luego de seleccionar las muestras para cada tipo de aplicación de la carga, de acuerdo a la dirección de la estratificación de la roca (perpendicular, paralelo y diagonal) se procedió a determinar sus dimensiones (ancho y diámetro equivalente) a cada muestra por medio de un vernier. Luego se procedió con el ensayo (Figura 32), colocando la muestra entre las dos puntas cónicas metálicas de la máquina, accionada por una prensa hasta lograr la rotura del material.



Figura 32. Equipo de Carga Puntual. Cortesía del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV.  
Nota. Fuente: Propia

#### 4.4.4 Cálculos pertinentes para la selección del sistema de cribado

Como se explicó en el Capítulo III, los parámetros operacionales y técnicos para diseñar o escoger un sistema de cribado y sus cálculos, varían de acuerdo al investigador o fabricante.

En cuanto a la capacidad de la tolva se empleó una formula básica para su cálculo, además las dimensiones definidas, fue en función de la alimentación teórica que tendrá la criba. A su vez, los cálculos para determinar las caracterices que deberían tener las cintas para el transporte del carbón, están en función del material que se pretende acarrear.

En la Figura 33, se presentan un esquema de los mismos, que desglosa de manera detallada cada uno de los componentes involucrados en la selección y diseño.

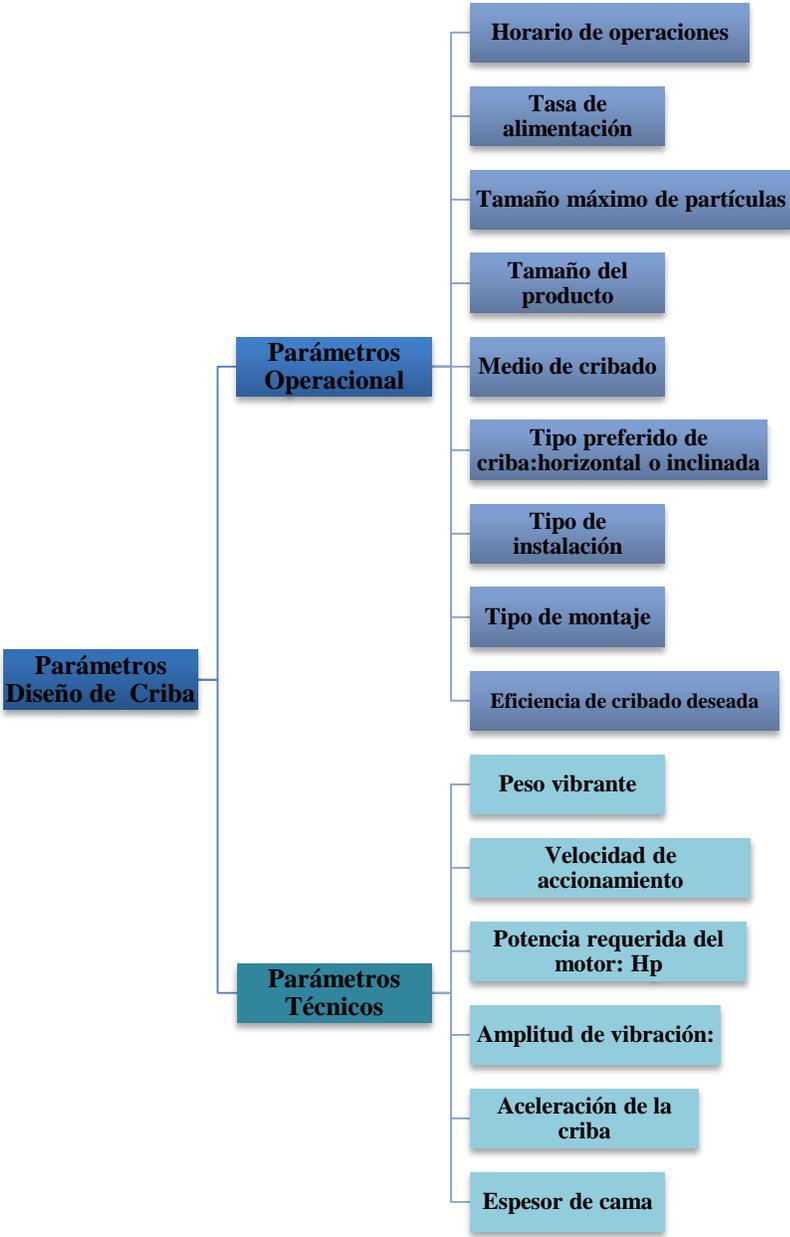


Figura 33. Esquema de los parámetros utilizados para el diseño de una criba  
**Nota.** Fuente: Kelly (1990); Fueyo (1999).

La elección de los parámetros y componentes de un sistema de cribado es, evidentemente, una elección determinada por la función de cribado y el servicio a realizar, por lo cual resulta

complicado. Esto debido, a que los procedimientos para determinar la superficie de cribado necesaria en una clasificación concreta, son absolutamente empíricos, basados por lo general en las experiencias de los fabricantes de cribas.

### ➤ **Parámetros operacionales**

De acuerdo a las operaciones en la empresa, cada uno de los parámetros descritos a continuación tiene estrecha relación con los procedimientos y requerimientos que se siguen en la Corporación, para obtener operaciones más eficientes.

- **Horario de operaciones:** la empresa presenta dos (2) turnos, un turno diurno y un nocturno, cada uno de 12 horas, el carbón mineral no es utilizado diariamente por la Planta de Procesamiento Mineral (PPM) y tampoco es trasladado a diario a las operaciones en Planta de carbón. Por ello, no se ve en la necesidad de operar la Planta de cribado los dos (2) turnos. Solamente se trabajará en el turno diurno.
- **Tasa de alimentación flujo de la criba en toneladas/hora:** Para determinar la alimentación de carbón mineral (t/h), se tomó los datos del consumo de toda la empresa del mismo desde el año 2010 hasta el 2013, para tener un valor promedio representativo.
- **Tamaño máximo de partículas:** el material posee una distribución granulométrica de dimensiones variadas. Los fragmentos de mayor tamaño pudieron ser identificados por inspección visual y el diámetro  $d_{80}$ , que indica el diámetro de la partícula será a través de análisis granulométricos.
- **Tamaño del producto:** se determinó de acuerdo a las necesidades de las Planta de Trituración y la Planta de Carbón.
- **Medio de cribado:** para definir el medio de cribado se debe tomar en cuenta las características del material y los beneficios de la superficie de cribado seleccionada, además, que evite en la medida de los posible el aglutinamiento del material fino y húmedo, así como también, duración y rentabilidad que la malla presente.

- Tipo preferido de criba: el cribado de material con un grado de humedad es sin duda el más complejo (Fueyo, 1999), siendo este, donde además, los autores sugieren para el carbón, las cribas del tipo vibratorias ligeramente inclinadas, dando un mejor resultado la clasificación de este tipo de material.
- Eficiencia de cribado deseada: se desea obtener durante el cribado, será asumida por medio de los catálogos de los fabricantes y las literaturas utilizadas, de acuerdo a los modelos de cribas que elaboran para la clasificación de carbón mineral.

➤ **Parámetros técnicos**

La mayoría de estos parámetros serán asumidos a través de revisiones bibliográficas y catálogos, que se ajusten más a las características del material y de los resultados obtenidos y definidos de los parámetros operacionales.

En cuanto a la determinación de la Superficie de cribado, como se mencionó, existen un gran número de métodos para calcular la superficie de cribado, pero para este caso, se emplearan cuatro (4): Para la realización de los cálculos adecuados, será utilizado el método híbrido de (Bouso, 2010), el método de Alimentación total” y el método de “Capacidad de paso” (Fueyo, 1999), y por último, el método del factor empírico (Kelly, 1990), todos descritos en el capítulo III. Ambos métodos son de fiabilidad limitada y los datos de los fabricantes dan resultados diferentes, por lo que consecuentemente, se obtendrán valores estimados inicialmente

Se debe tener claro, que los métodos no se pueden mezclar, ya que generarían errores en los resultados.

#### **4.6. Estimación de costo**

Para realizar la estimación de costo de la implementación del sistema, se hizo la búsqueda de precios en el mercado de los diferentes equipos que componen dicho sistema de cribado y se hizo la sumatoria de los costos de los equipos que componen el sistema de cribado.

La valoración de los equipos, se realizó mediante la revisión de los catálogos y adicional a eso en las páginas web que manejen este tipo de información.

# CAPÍTULO V

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

### 5.1 Situación actual de las condiciones granulométricas del carbón mineral

En el año 2013 surgió la necesidad de estudiar la factibilidad técnica-económica, de proveedores de carbón mineral disponible para las operaciones de la CVM-DN. La investigación que realizó la empresa indicó que la fuente preferencial de carbón era la proveniente de la región occidental (material B).

Por lo tanto las tomas de muestras y evaluaciones para este trabajo, se realizaron sobre el material B, que ha sido suministrado desde mayo del 2013 hasta la actualidad. El carbón A1, en uno (1) de los distribuidores anteriores, y se hace mención en este trabajo con fines de comparación sobre la distribución granulométrica de los tres diferentes materiales.

Cuando la empresa comenzó a recibir el carbón B identificó que las características dimensionales eran diferentes al que se utilizaba anteriormente. Lo que implicaba un tratamiento dimensional distinto en la planta. En principio la empresa recibía carbón cribado B, por lo que se recibió un 16,67% aproximadamente de material, durante la recepción de material en el 2013.

El carbón tipo ROM que llega a la Corporación no tiene unas especificaciones físicas definidas por parte de la empresa que extrae esta roca, debido a que este tipo de material es carbón tipo ROM, no procesado, y por ende, presenta ciertas irregularidades granulométricas, es decir, no cumplen con las especificaciones establecidas por la Corporación, por motivo a las características que presenta.

Con el objetivo de analizar las condiciones actuales del carbón que se utiliza en la empresa, en la Tabla 29, se indican las especificaciones granulométricas y de humedad requeridas para alcanzar los niveles apropiados en los procesos siderúrgicos llevados a cabo en dicha empresa.

Tabla 29. Especificaciones del carbón cribado / ROM utilizado en Loma de Níquel

Especificaciones	Valor
<b>Granulometría cribado</b>	$5 \text{ mm} \leq 90\% \leq 50 \text{ mm}$ $5\% \geq 5 \text{ mm}$
<b>Granulometría ROM</b>	No especificado
<b>Humedad</b>	$\leq 6\%$

Nota. Fuente: Gerencia de Optimización de Procesos, CVM-DN

Las operaciones de la CVM-DV, ya presentaban problemas con la distribución granulométrica del carbón utilizado antes de mayo 2013, es decir, inconvenientes en su mayoría con los finos (en este caso, partícula menor a 1 mm) como se puede observar en la Figura 34, donde se muestran las curvas de distribución granulométrica del carbón B cribado, carbón B ROM y carbón A1 ROM. Es importante destacar que los datos del carbón B fueron obtenidos de muestras industriales suministradas para caracterizar granulométricamente y realizar otros ensayos fisicoquímicos de interés para considerar si era apropiado para las operaciones de la empresa.

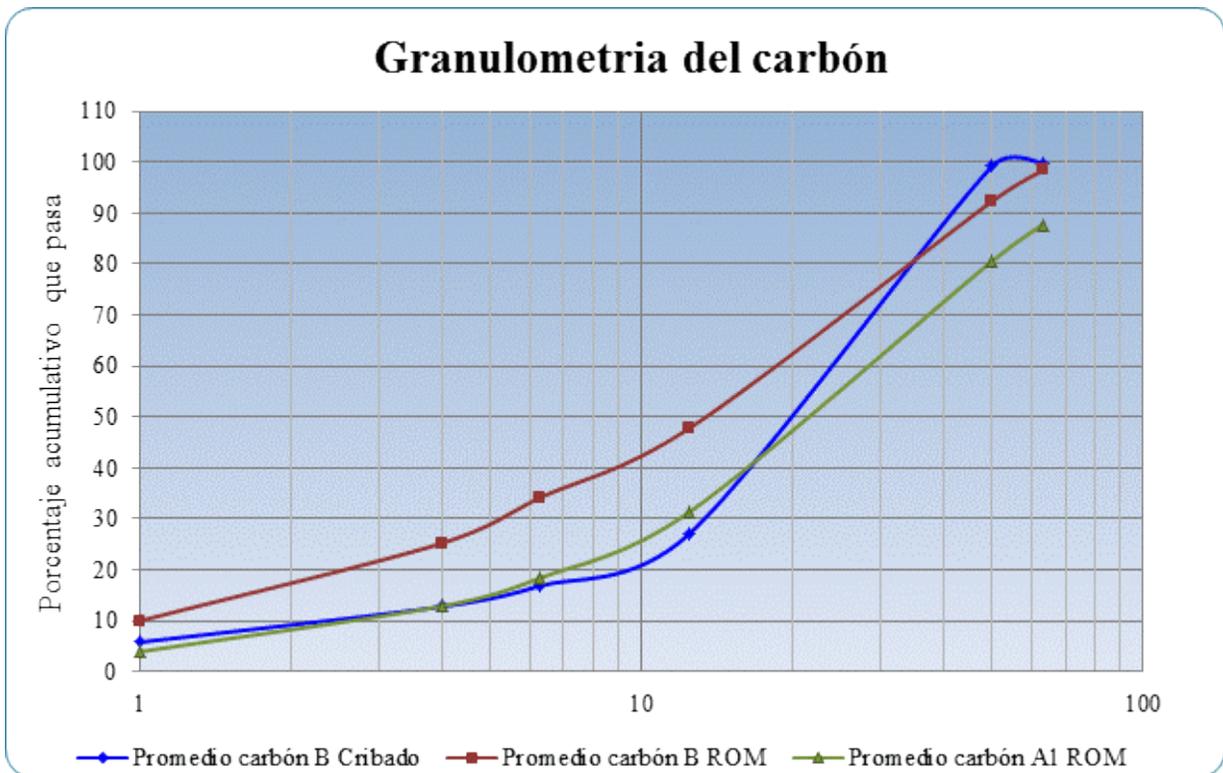


Figura 34. Gráfico de comparación de la distribución granulométrica del carbón de los materiales B y A1

**Nota.** Fuente: Departamento, Gerencia de Optimización de Procesos, CVM-DN

De acuerdo a la Tabla 30, el material que presenta la mejor distribución es el carbón cribado del material B, debido a que el porcentaje de material retenido entre las aberturas de 12,5 mm y 4 mm es el más cercano a los valores de los requerimientos de la empresa.

En la Tabla 30, se muestra que el carbón B cribado es más favorable, debido a que el porcentaje de material entre las mallas de abertura de 50 mm y 4 mm es de 86,46 %, acercándose al valor de los requerimientos específicos de la empresa, sin embargo, por ser un carbón cribado presenta un porcentaje del 12,55 % de material fino, saliéndose de las especificaciones de diseño. Además, se observa una notable diferencia entre los dos tipos de materiales, presentando un 24,65 % de material fino menor a los 4 mm del carbón B (Tabla 31). Por el contrario, el carbón A1, presenta menor proporción de finos, pero sin embargo no cumple con los estándares de calidad establecidos por la empresa.

Además, el carbón A1, presenta un 19,35% de material con sobre tamaño, es decir, el carbón que queda retenido en las mallas de abertura 50 mm y de 63 mm, se sobrepasa el porcentaje establecidas (5%) en las especificaciones de diseño. Sin embargo, el carbón B tampoco cumple con los estándares de calidad, presentando un 7,62 % de sobretamaño.

Tabla 30. Distribución granulométrica del material B y A1

	<b>% de retenido 8,25 mm *</b>	<b>% de retenido 2,5 mm **</b>
<b>Promedio carbón B cribado</b>	86,46	12,55
<b>Promedio carbón B ROM</b>	67,14	24,65
<b>Promedio carbón A1 ROM</b>	67,73	12,68

**Nota** Fuente: propia

\*Estos valores obtenidos son resultados de la sumatoria del material retenido entre las mallas de abertura 12,5 mm y de 4 mm.

\*\*Estos son los valores del material que pasa por la malla de abertura 4 mm, que a su vez, es el retenido en la malla de 1 mm y en el pam.

### 5.1.2 Contenido de humedad presente en el carbón mineral

La humedad del carbón mineral juega un papel muy importante en cuanto a su manejabilidad, aumentando las dificultades y costos de dicho manejo. Dicho esto, en la Figura 35, se puede observar notoriamente la variabilidad en cuanto a la humedad que presentaban lo antiguos

carbones y el que se está utilizando desde el año 2013. Además, el gráfico abarca el período 2010 - 2013, presentando valores máximos hasta aproximadamente 8,56%, sin dejar a un lado que en el año 2010 se presentaron valores de humedad de un 18,92% hasta 21,09%, sin embargo el promedio, se mantuvo en 8,56% para ese año.

Para el año 2011, estuvo en 4,48% y para el 2012 bajó un poco a 4,31%. Ya para el año en estudio (2013) estuvo un 0,30% por encima de lo estipulado por la Gerencia de Optimización de Procesos, CVM-DN ( $\leq 6\%$  de humedad), de los cuales, presentó una desviación de casi el 2%.

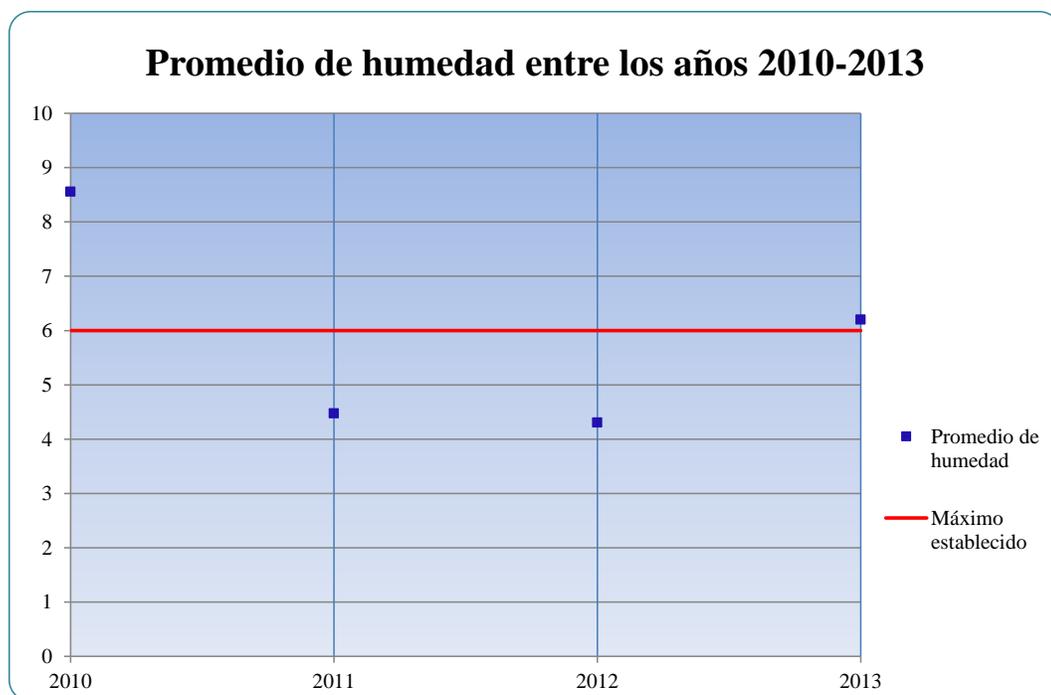


Figura 35. Porcentaje de humedad presentes en el carbón mineral de los Proveedores anteriores y el Proveedor actual, entre el período 2010-2013

Nota Fuente: Propia

Para el mes de mayo de 2013, presentó valores hasta 17,03% y 2,84%, sin embargo, obtuvo una media de 6,03% (Figura 36).

Para el mes de junio, la media de humedad del carbón estuvo en 6,00 %, lo que significa que se mantuvo dentro de lo establecido por la calidad del material en cuanto a la proporción de agua, sin embargo, alcanzó valores hasta un 23,78 %.

El comportamiento del carbón mineral para el mes de julio, presentó alteraciones hasta un 23,32 % y 20,16 %, pero sin embargo, el promedio de ese mes fue de 6,33 %, lo que significa que no está muy alejado de la realidad de las especificaciones granulométricas requeridas por la empresa.

Para el correspondiente mes de agosto, la recepción de carbón fue muy baja, por ende no se tienen muchas muestras representativas. No obstante, el comportamiento de este material estuvo en el orden del 7,07 %, lo que nos indica que el 1,07 % está por encima de lo establecido.

La Figura 36, abarca los meses de mayo hasta agosto de agua expresada en porcentaje presente en el carbón B.

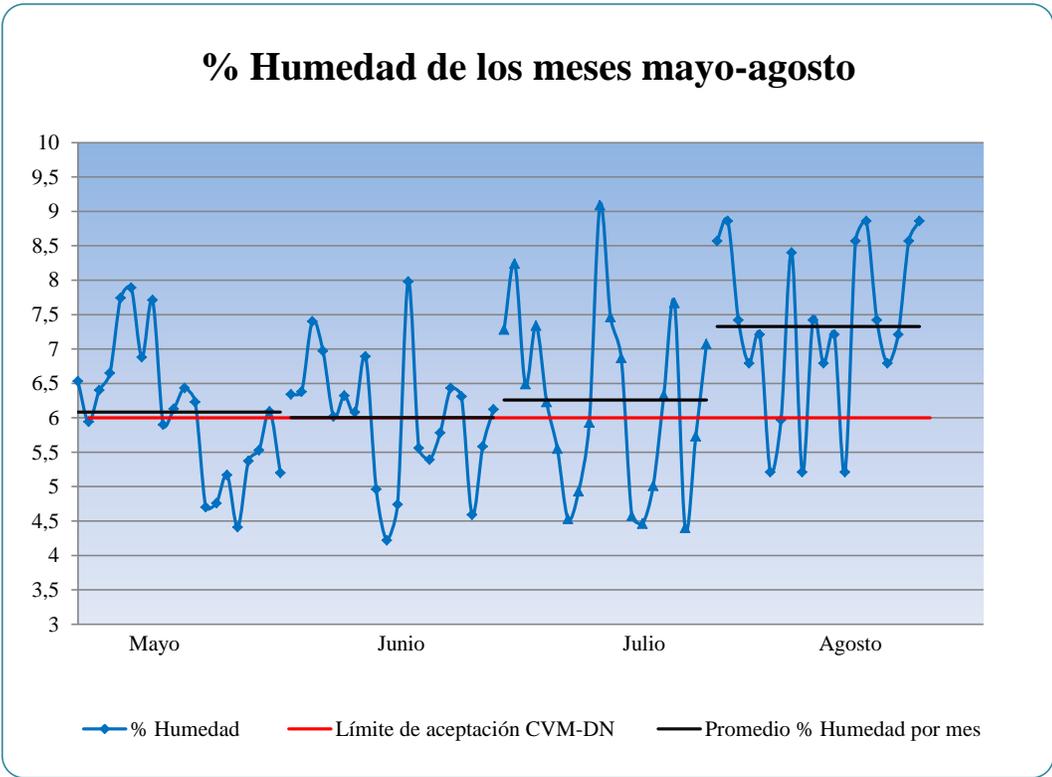


Figura 36. Porcentajes de agua presentes en el carbón mineral del Proveedor B entre el mes de mayo y agosto

**Nota.** Fuente propia

Para generar esta gráfica, se tomaron valores promedios del material recibido en los meses mayo-agosto del 2013. Donde se obtuvo altos niveles considerables que alcanzan hasta un

23,78% de agua, sin embargo, el promedio de humedad se encuentra en 6,36%.

Considerándose que para el mes de agosto, el carbón mineral presentó mayor cantidad de agua, encontrándose alrededor del 7,07 %.

### **5.1.3 Riesgo de incendio en el silo del carbón**

El carbón, es susceptible a la combustión espontánea debido al calentamiento durante la oxidación natural de superficies nuevas de carbón. Este calentamiento se le atribuye a varios factores como son: contenido de humedad, flujo de aire, granulometría, contenido de pirita y materia volátil (O & O, 1997).

Es muy importante tener en cuenta que el calentamiento espontáneo del carbón resulta de un aumento gradual de la temperatura debido a que la oxidación de este, es mucho más rápida comparada con la velocidad de disipación de calor por conducción o radiación con sus alrededores. La materia volátil es un indicador del rango del carbón y por tal razón un indicador de la tendencia de un carbón a auto calentarse. El carbón de estudio es bituminoso, por ende, presenta bajo material volátil, ya que a medida que el carbón mineral aumenta de rango, el componente volátil disminuye. Dicho esto, el promedio de material volátil del carbón en estudio, se encontró alrededor del 36%. Lo que significa que está dentro de las especificaciones de la empresa, sin embargo, se desconoce el porcentaje límite de material volátil que debería contener el carbón para que no haya riesgo de combustión.

Además, el contenido de pirita se ha señalado como uno de las principales causas del proceso de auto calentamiento de carbón (Márquez D. A, 1994). La oxidación de este mineral (sulfuro de hierro) a óxido de hierro es una reacción exotérmica y por tal razón, contribuyente al proceso. El contenido de azufre es básicamente un indicador del contenido de pirita en el carbón, donde el carbón actual, presenta un promedio de azufre del 0,81%, valor que se encuentra dentro de las especificaciones de diseño (Tabla 31), establecidas por la empresa Lomas de Níquel. Dicho esto, para el mes de julio del año 2011, se presentó un inconveniente en el silo y en la tolva de carbón mineral (Figura 37), donde se registraron temperaturas hasta casi 40°C en el mencionado silo y llamas leves en la tolva, debido al compactamiento de los finos, sumado al alto poder calorífico presente en ese material.

Tabla 31. Especificaciones del carbón cribado / ROM utilizado en Loma de Níquel

Especificaciones del Carbón Cribado / ROM	
H <sub>2</sub> O (% Humedad)	≤ 6%
Carbón Fijo	≤ 45%
Cenizas	≥ 15%
Azufre	≤ 1%
Material Volátil	≤ 40%
Granulometría Cribado	90% ≥ 5mm ≤ 50mm / 5% ≥ 5mm
Granulometría ROM	No Especificado

**Nota.** Fuente: Departamento, Gerencia de Optimización de Procesos, CVM-DN

En la Figura 37, se muestra una imagen termográfica tomada durante un calentamiento puntual dentro del silo de carbón.



Figura 37. Imagen termográfica del silo de carbón  
**Nota.** Fuente: Propia. Cortesía de Loma de Níquel



Figura 38. Tolva de carbón de la empresa Loma de Níquel  
**Nota.** Fuente: Propia. Cortesía de Loma de Níquel

Los finos de carbón de un tamaño de 3,35 mm o menos, y presentan humedad significativa, son la causa principal de obstrucciones, en particular cuando su contenido excede de 25% a 30% por masa del total de carbón, (Minera Catamutún S.A, s.f).

La distribución del tamaño de partículas o granulometría varía mucho según el tipo de carbón, método de extracción, limpieza del carbón, equipo para trituración y el grado de manejo y manipulación.

## 5.2 Ensayos mecánicos:

### 5.2.1 Ensayo de *Slake Durability*

Para la selección de una criba, se debe tomar en cuenta las propiedades físicas de la roca a clasificar, con respecto a su manipulación. En este caso, se le realizaron pruebas de durabilidad de la roca, en cuanto al transporte. Por lo que las tablas mostradas posteriormente, comprenden los resultados de la prueba de desgaste de las muestras ensayadas en medio húmedo y medio seco, a través del ensayo de *Slake Durability*. La mayor cantidad de pérdida de masa que presentaron las muestras de ambos escenarios fue en el primer evento (Tabla 32), presentando un desgaste del 0,99% de la muestra húmeda y un 0,90% en la muestra seca.

Tabla 32. Resultados de los ensayos de slake durability para la muestra húmeda

Ensayo de <i>Slake Durability</i>			
Evento húmedo	Peso (g)	Pérdida en la etapa (g)	Pérdida Acumulada (g)
0	468,60	-	-
1	446,90	4,63	4,63
2	440,90	1,34	5,91
3	440,30	0,14	6,04
4	437,40	0,66	6,66
5	436,30	0,25	6,89
6	434,90	0,32	7,19
7	433,90	0,23	7,41
8	432,80	0,25	7,64
9	432,50	0,07	7,70



<b>Inicio</b>	<b>Final</b>
---------------	--------------

**Nota.** Fuente: Propia. Cortesía del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV.

Se observó que al culminar las 9 (nueve) repeticiones o eventos del ensayo, las muestras arrojaron un desgaste del 1,68% para la muestra ensayada en medio húmedo y el 2,20% para la seca, de la muestra total. Además, las pérdidas oscilaron para la muestra húmeda entre 4,63% y 0,07% y para la muestra seca, estuvieron entre 4,16% y 0,12%. Por lo que se esperaba que la mayor pérdida de masa la presentaran los fragmentos ensayados en medio húmedo, ya que por las propiedades de la roca en estudio, tiende a absorber agua por medio de sus fracturas y estas tienden a debilitar su estructura y por ende a perder más masa por la manipulación.

Tabla 33. Resultados de los ensayos de slake durability para la muestra seca

Ensayo de <i>Slake Durability</i>			
Evento seco	Peso (g)	Pérdida en la etapa (g)	Pérdida Acumulada (g)
0	463,8		
1	444,5	4,16	4,16
2	436,9	1,71	5,80
3	432,6	0,98	6,73
4	428,6	0,92	7,59
5	424,8	0,89	8,41
6	422,6	0,52	8,88
7	420,9	0,40	9,25
8	418,8	0,50	9,70
9	418,3	0,12	9,81



**Inicio**



**Final**

**Nota.** Fuente: Propia. Cortesía del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV.

El siguiente gráfico (Figura 40), simplifica la información mostrada en las Tabla 35 y la Tabla 36, ilustrándonos las pérdidas acumuladas, y a su vez, las pérdidas por evento de ambas

muestras, observándose una diferencia notoria entre las dos (2) condiciones. La pérdida de masa inicial mayor la obtuvo la muestra ensayada en agua con un 4,63%.

En las pérdidas acumuladas, se puede ver una discrepancia evidente, ya que la muestra ensayada en seco presentó una pérdida total de 9,81%, mientras que la ensayada en agua, presentó una pérdida total de 7,70%.

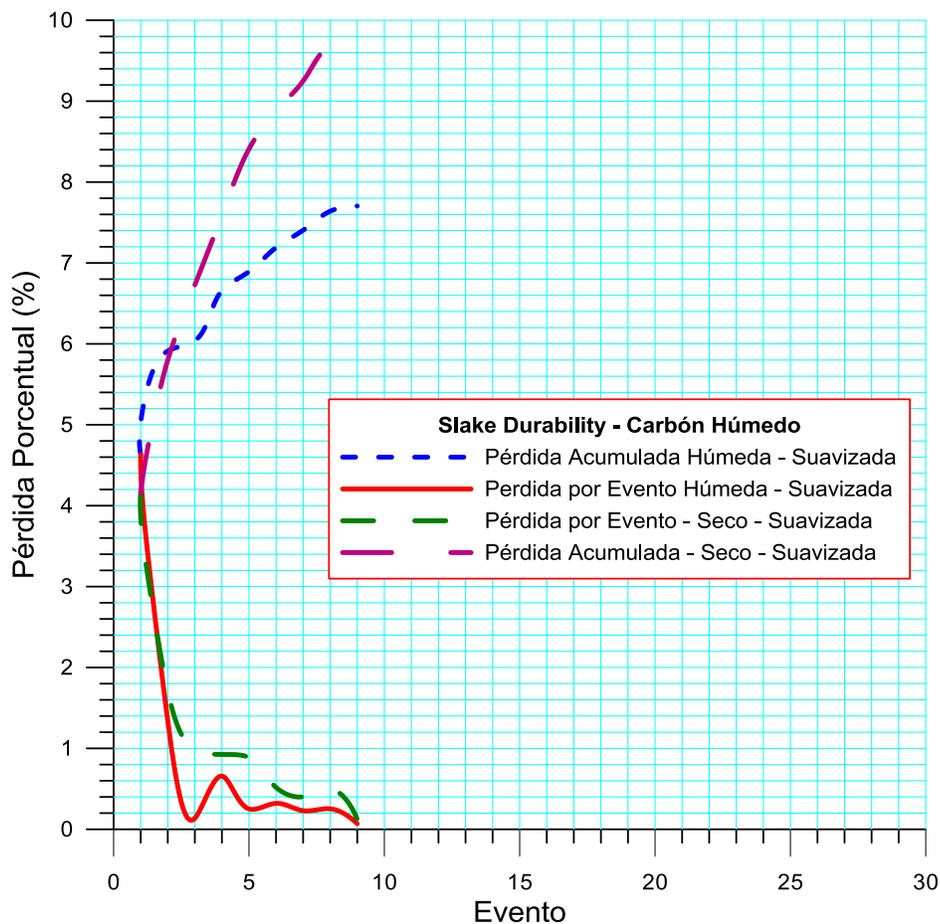


Figura 39. Pérdidas de masa de carbón de las muestras ensayadas en medio seco y en agua

**Nota.** Fuente: Propia

No se determinó el índice de durabilidad correspondiente con lo establecido en las normas ASTM, debido a que se realizaron eventos continuos hasta alcanzar una degradación constante del material, por lo que estos valores obtenidos reflejan solo el comportamiento frágil de la roca, más no lo que se pretendía conseguir por dicha norma.

De acuerdo a la pérdida de masa que se obtuvo en el ensayo, se debe seleccionar una abertura de malla mayor a 5 mm (tamaño mínimo de roca estipulado dentro de las especificaciones de diseño determinado por la empresa), ya que debido a la manipulación se generaran más finos y por ende, se debe considerar una luz mayor a dicha malla. Ya que si se pretende enviar el tonelaje de retenido al corte para la planta de carbón, la roca al ser fragmentada por la trituradora de rodillos, en teoría, la generación de finos debería ser menor al actual.

### **5.2.2 Resistencia a la compresión simple**

Para definir la altura que deben estar ubicadas las bandas transportadoras de descarga, se debe tomar en cuenta la resistencia de la roca a la rotura que estará expuesta la roca cuando ésta cae y se posiciona con respecto a los otros fragmentos, en la pila de almacenamiento una vez clasificada.

Por ende, se realizaron ensayos de carga puntual para conocer dicha resistencia que presenta el carbón en estudio, mediante diferentes tipos de posiciones de la muestra para la aplicación de la carga, bien sea, perpendicular a la estratificación de la roca, paralelo o diagonal a dichas estratificaciones.

Los resultados de este ensayo que determina la resistencia a la compresión simple, se presentan en las tres (3) Tablas posteriores, donde se exponen las condiciones como fueron ensayadas las muestras de roca y resultados obtenidos por el ensayo de carga puntual y su vez, los valores arrojados.

La tabla posterior, refleja los resultados del ensayo de carga puntual de las muestras ensayadas con la carga paralela a la estratificación de la roca.

Tabla 34. Resultados del ensayo de carga puntual, con tipo de carga paralela a la muestra

Nº Muestra	Tipo de Espécimen		Diámetro (mm)	Diámetro Equiv. (mm)	Ancho (mm)	Carga <sub>máx</sub> (kN)	I <sub>c</sub> (MPa)	I <sub>s50</sub> (MPa)	q <sub>u</sub> (MPa)
1-PA	I	//	62,20	55,29	38,60	2,92	0,96	1,00	24,00
3-PA	I	//	85,30	95,21	83,47	2,92	0,32	0,43	10,34
3-PA	I	//	75,27	84,93	75,27	0,49	0,07	0,09	2,06
4-PA	I	//	84,30	95,10	84,26	2,43	0,27	0,36	8,36
4-PA	I	//	81,13	91,54	81,13	0,49	0,06	0,08	1,83
4-PA	I	//	80,64	91,05	80,74	2,43	0,29	0,38	9,23
5-PA	I	//	66,09	74,63	66,18	1,95	0,35	0,42	10,05
6-PA	I	//	72,24	77,32	65,00	1,95	0,33	0,40	9,51
6-PA	I	//	72,14	77,27	65,00	1,95	0,33	0,40	9,52
8-PA	I	//	46,94	60,48	61,20	2,92	0,80	0,87	20,89
8-PA	I	//	42,25	47,95	42,74	0,49	0,21	0,21	4,99
9-PA	I	//	87,60	79,45	56,60	1,46	0,23	0,29	6,84
10-PA	I	//	46,90	54,65	50,00	0,49	0,16	0,17	4,07

**Nota.** Fuente Propia. Diseño de tabla suministrada por el personal del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV

Las muestras expuestas en la Tabla anterior, tienen un valor máximo de la resistencia de 24,00 Mpa, y un mínimo de 1,83Mpa, por lo tanto, obtuvo un promedio de 9,36 Mpa.

Los especímenes ensayados con un tipo de carga perpendicular a la muestra, se observa en la Tabla 35 anterior, que tuvieron valores máximos de resistencia, hasta 28,66 Mpa y un mínimo de 3,12 Mpa, teniendo como un promedio de resistencia de 14,83 Mpa.

Tabla 35. Resultados del ensayo de carga puntual, con tipo de carga perpendicular a la muestra

N° Muestra	Tipo de Espécimen		Diámetro (mm)	Diámetro Equiv. (mm)	Ancho (mm)	Carga <sub>máx</sub> (kN)	I <sub>s</sub> (MPa)	I <sub>s0</sub> (MPa)	q <sub>u</sub> (MPa)
1-PE	I	⊥	57,49	64,87	57,49	0,49	0,12	0,13	3,12
2-PE	I	⊥	38,40	49,89	50,90	1,46	0,59	0,59	14,07
2-PE	I	⊥	37,62	42,45	37,62	1,46	0,81	0,75	18,08
3-PER	I	⊥	41,20	52,28	52,10	1,46	0,53	0,55	13,09
3-PER	I	⊥	40,61	45,94	40,81	1,46	0,69	0,67	15,99
3-PER	I	⊥	30,06	39,38	40,52	1,95	1,29	1,13	27,07
4-PER	I	⊥	47,40	57,72	55,20	1,46	0,44	0,47	11,23
5-PER	I	⊥	46,50	59,40	59,60	1,46	0,41	0,45	10,74
5-PER	I	⊥	45,82	51,81	46,01	1,46	0,54	0,55	13,27
5-PER	I	⊥	45,33	51,42	45,82	1,46	0,55	0,56	13,43
5-PER	I	⊥	44,84	50,82	45,23	1,46	0,57	0,57	13,68
5-PER	I	⊥	42,69	49,31	44,74	2,92	1,20	1,19	28,66
5-PER	I	⊥	38,49	54,04	59,60	1,46	0,50	0,52	12,43
6-PER	I	⊥	35,50	47,21	49,30	2,43	1,09	1,06	25,55
7-PER	I	⊥	37,50	44,03	40,60	1,95	1,00	0,95	22,78
7-PER	I	⊥	37,50	44,03	40,60	1,95	1,00	0,95	22,78
7-PER	I	⊥	37,50	44,03	40,60	1,95	1,00	0,95	22,78
8-PER	I	⊥	40,20	52,91	54,70	1,46	0,52	0,54	12,85
8-PER	I	⊥	40,20	52,91	54,70	1,46	0,52	0,54	12,85
8-PER	I	⊥	40,20	52,91	54,70	1,46	0,52	0,54	12,85
8-PER	I	⊥	40,20	52,91	54,70	1,46	0,52	0,54	12,85
8-PER	I	⊥	51,18	57,75	51,18	0,49	0,15	0,16	3,74
8-PER	I	⊥	51,18	57,75	51,18	0,49	0,15	0,16	3,74
8-PER	I	⊥	51,18	57,75	51,18	0,49	0,15	0,16	3,74
8-PER	I	⊥	50,00	56,31	49,80	2,43	0,77	0,81	19,44

Nota. Fuente Propia. Diseño de tabla suministrada por el personal del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV.

En la siguiente Tabla 36, muestra los resultados de las muestras ensayada con un tipo de carga oblicua en dirección al espécimen.

Las muestras ensayadas obtuvieron como resultado, un promedio de resistencia a la compresión simple de 11,28 Mpa, estando como valor máximo en 28,84 Mpa.

Tabla 36. Resultados del ensayo de carga puntual, con tipo de carga diagonal a la muestra

N° Muestra	Tipo de Espécimen		Diámetro (mm)	Diámetro Equiv. (mm)	Ancho (mm)	Carga <sub>máx</sub> (kN)	I <sub>s</sub> (MPa)	I <sub>s50</sub> (MPa)	Q <sub>u</sub> (MPa)
1-OB	I	/	39,13	42,82	36,80	0,97	0,53	0,50	11,89
2-OB	I	/	51,73	63,90	62,00	3,41	0,83	0,93	22,37
2-OB	I	/	47,43	61,19	62,00	0,49	0,13	0,14	3,42
3-OB	I	/	52,80	54,88	44,80	2,92	0,97	1,01	24,28
4-OB	I	/	42,10	51,25	49,00	0,49	0,19	0,19	4,50
4-OB	I	/	42,10	51,25	49,00	1,46	0,56	0,56	13,50
5-OB	I	/	64,27	74,87	68,50	3,41	0,61	0,73	17,50
5-OB	I	/	53,29	71,91	68,50	0,49	0,09	0,11	2,66
6-OB	I	/	66,10	77,03	70,50	3,41	0,57	0,70	16,75
6-OB	I	/	60,46	73,67	70,50	0,49	0,09	0,11	2,56
7-OB	I	/	45,52	70,19	85,00	2,92	0,15	0,69	16,58
7-OB	I	/	39,66	65,51	85,00	0,49	0,98	0,13	3,08
7-OB	I	/	37,22	63,46	85,00	0,97	0,24	0,27	6,46
7-OB	I	/	36,83	63,13	85,00	0,97	0,24	0,27	6,51
7-OB	I	/	36,83	63,13	85,00	3,90	0,98	1,09	26,06
7-OB	I	/	30,18	57,15	85,00	0,49	0,15	0,16	3,80
8-OB	I	/	52,55	56,67	48,00	0,97	0,30	0,32	7,70
8-OB	I	/	47,28	53,75	48,00	0,49	0,17	0,17	4,18
8-OB	I	/	48,15	54,25	48,00	3,41	1,16	1,20	28,84
8-OB	I	/	42,69	51,08	48,00	0,49	0,19	0,19	4,52
9-OB	I	/	52,84	56,83	48,00	0,49	0,15	0,16	3,83
9-OB	I	/	52,84	66,43	65,60	1,95	0,44	0,50	12,04
9-OB	I	/	46,79	62,51	65,60	2,92	0,75	0,83	19,84
10-OB	I	/	61,05	71,41	65,60	2,92	0,57	0,67	16,14
10-OB	I	/	56,07	68,43	65,60	0,49	0,10	0,12	2,87

Nota. Fuente Propia. Diseño de tabla suministrada por el personal del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV

De manera general, las muestras que obtuvieron valores mayores de resistencia, fueron las ensayadas de forma paralela a las caras de estratificación del carbón, con un promedio de resistencia a la compresión simple de 14,83 Mpa y las que presentaron un valor promedio más bajo, fueron las ensayadas de forma paralela a la estratificación con 9,36 Mpa, debido a que fallaba más fácilmente por la estructura del carbón mineral.

De igual forma, se puede establecer que los valores de resistencia a la compresión simple del carbón en estudio está: en 12,29 Mpa como valor medio, de 1,83 Mpa como valor mínimo (Figura 41) y 28,84 Mpa como valor máximo (Figura 42).

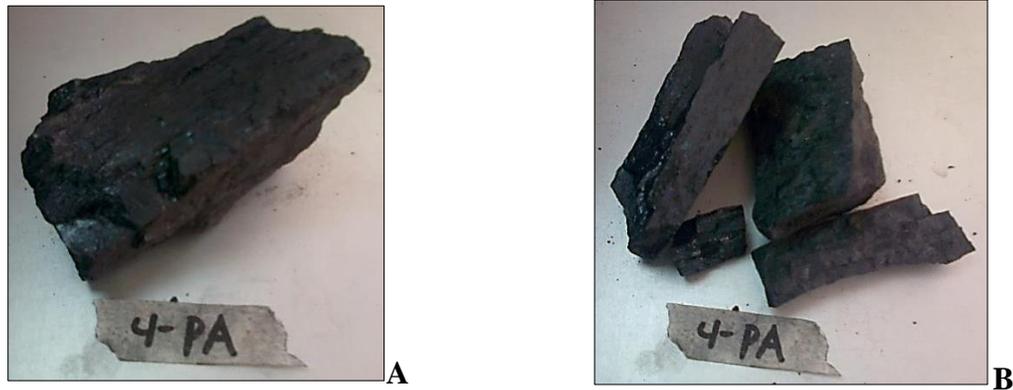


Figura 40. Muestra N° 4-PA, ensayada con tipo de carga paralela. A representa la muestra antes de ser fallada y la B, representa después de ensayada

**Nota.** Fuente: Propia



Figura 41. Muestra N° 8-OB, ensayada con tipo de carga diagonal. A representa la muestra antes de ser fallada y la B, representa la muestra después de ensayada

**Nota.** Fuente: Propia

De acuerdo a los valores arrojados a partir de los ensayos de carga puntual, se puede clasificar como roca de resistencia baja de acuerdo al UCS (*Unconfined Compressive Strength*) como se muestra en la Figura 43, que refleja un conjunto de clasificaciones de la roca de acuerdo a diferentes investigadores, que han realizado gran cantidad de estudios previos al macizo rocoso.

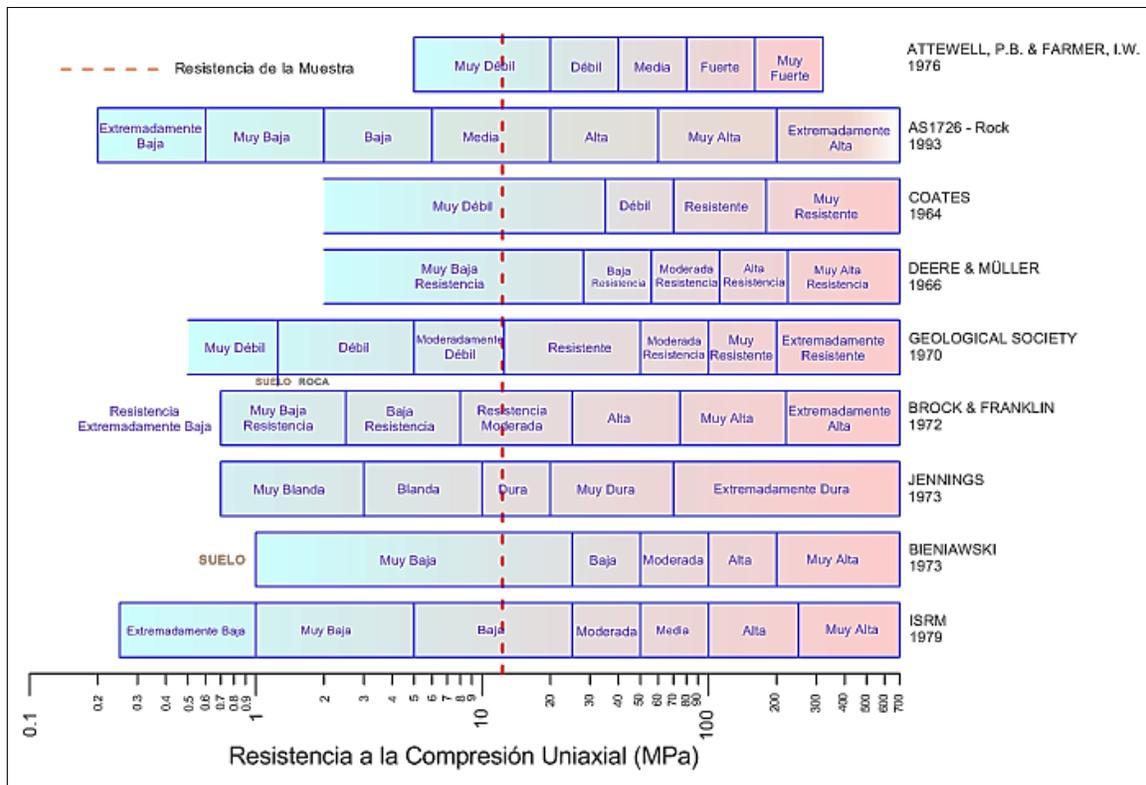


Figura 42. Clasificación de la roca de acuerdo al UCS (*Unconfined Compressive Strength*)

Nota. Fuente: Suministrada por el personal del Laboratorio de Mecánica de Rocas, FI-EGMG, UCV

Como se observa en la Figura anterior, la línea punteada roja, indica el valor de resistencia promedio que se logró como resultado en el ensayo, lo cual estuvo en 12,29 Mpa, indicando que la roca estudiada es de muy baja resistencia, de acuerdo con la clasificación geomecánica de (Bieniawski, 1973).

De acuerdo con el resultado obtenido, se debe establecer una altura relativamente baja para la bandas para las descargas, ya que a mayor altura de descarga de la roca, al caer esta tendería a debilitarse aún más, debido a que es clasificada como una roca de muy baja resistencia a la rotura.

### 5.3 Granulométrica del carbón en el período mayo-agosto de 2013

Como se ha mencionado anteriormente, la granulometría del carbón en estudio es irregular, ya que no cumple con los parámetros establecidos por la empresa (Tabla 30). Por lo tanto es

necesario analizar las curvas granulométricas del período de estudio (mayo-agosto), y así obtener una referencia del comportamiento que presenta dicho material.

En la Figura 44, que se muestra a continuación, representa la curva granulométrica del carbón en el mes de mayo. En él, se puede observar que el  $d_{90}$  pasa aproximadamente la abertura de 50 mm, y un 24,65 % del material pasante por la abertura de 4 mm.

Además, el 30% del material pasa por la malla de 5 mm. Conjuntamente, presenta el 67,70% del carbón mineral que pasa la malla de 50 mm hasta la de 4 mm.

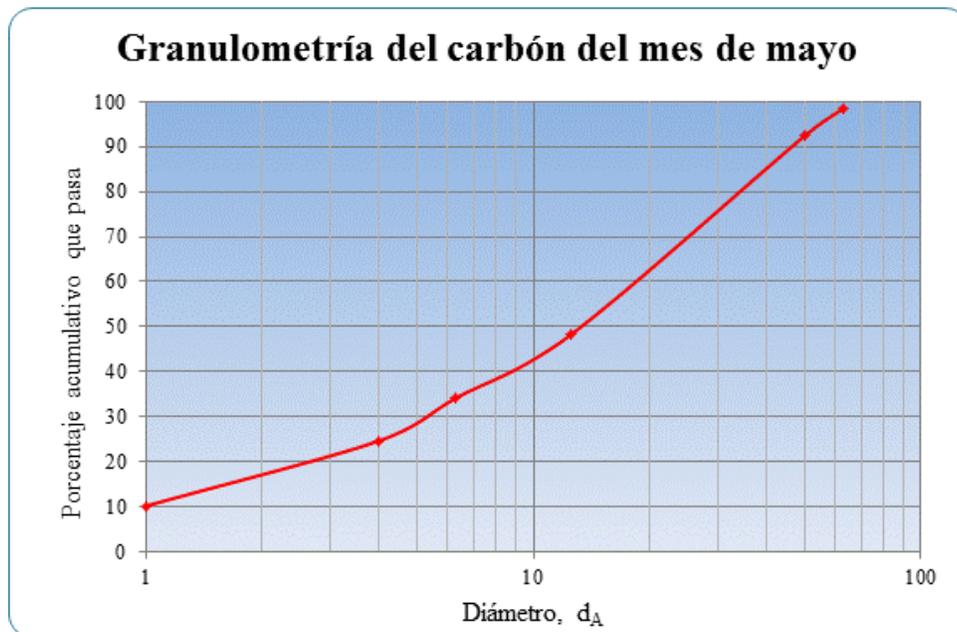


Figura 43. Granulometría del carbón del material B, del mes de mayo de 2013

**Nota.** Fuente: propia

La Figura siguiente, correspondiente al material del mes de junio, presenta un comportamiento muy similar a la curva anterior. Presentando el  $d_{90}$  está entre 40 mm y 50 mm aproximadamente. Sin embargo, presenta menos proporción de finos, de un 24,14 % de carbón mineral menor a 4 mm. Además, un 68,70 % de material menos a los 50 mm y superior a los 4 mm.

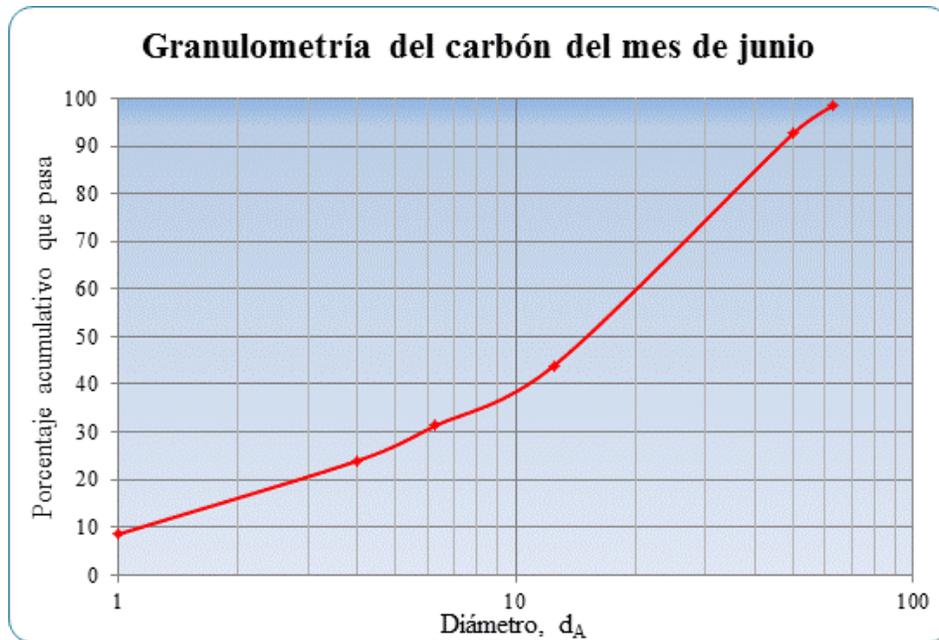


Figura 44. Granulometría del carbón del material B, del mes de junio de 2013

**Nota.** Fuente: propia

Para el mes de julio (Figura 46), el carbón mineral presentaba un comportamiento similar al de los dos (2) meses anteriores.

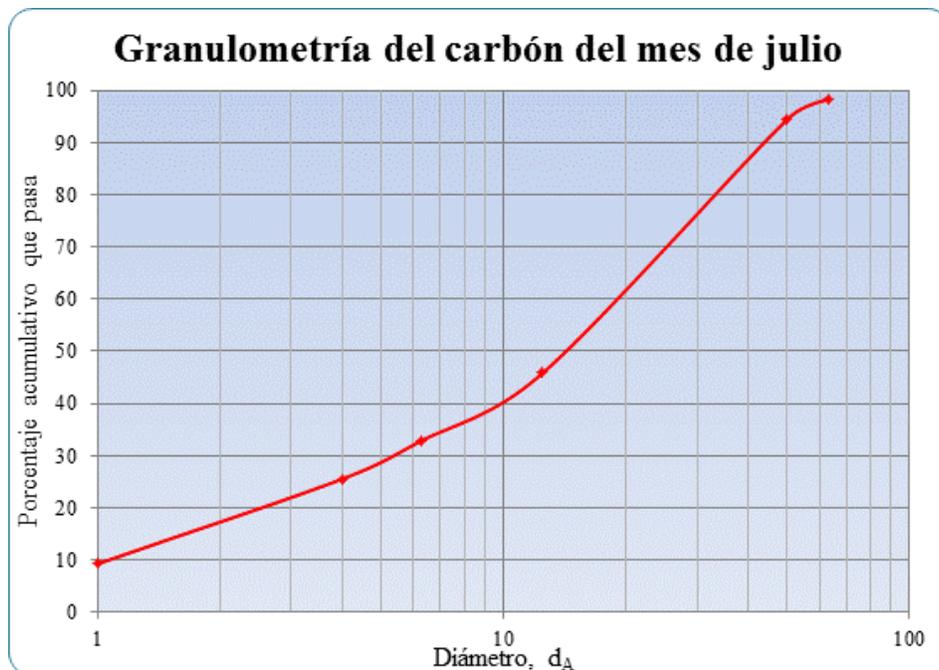


Figura 45. Granulometría del carbón del material B, del mes de julio de 2013

**Nota.** Fuente: propia

Presentó un 68,88 % de material menor a 50 mm y por encima de los 4 mm. Asimismo, se obtuvo un 9,32% de carbón menor a un 1 mm, es decir de finos. Y mostró un  $d_{90}$  ubicado entre las aberturas de 40 mm y 50 mm aproximadamente.

Ademas, presenta menos porcentaje de material por debajo de 1 mm, en comparación al mes de junio.

La siguiente Figura, refleja el comportamiento granulométrico que tuvo el carbón mineral para ese mes de agosto.

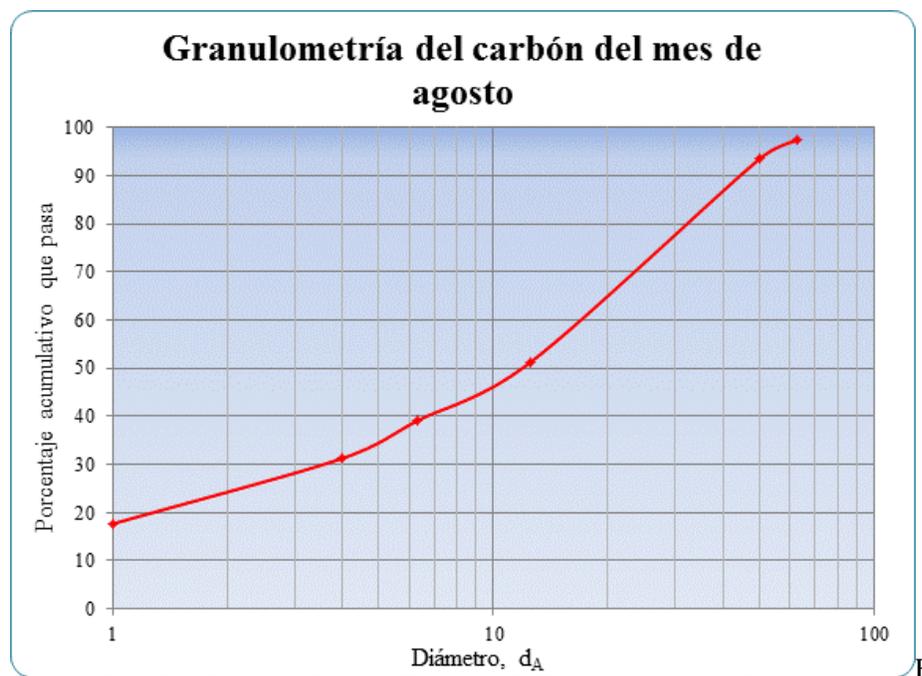


Figura 46. Granulometría del carbón del material B, del mes de agosto de 2013

**Nota.** Fuente: propia

Por el contrario, en el mes de agosto (Figura 47), el carbón presentó alto porcentaje por debajo de los cuatro (4) mm, con un 31,27%. Y un 93,51% de material menor de los 50 mm y mayor a los cuatro (4) mm. Además, continuó presentando un  $d_{90}$  parecido al comportamiento del gráfico anterior.

El próximo gráfico (Figura 48) muestra en conjunto, la granulometría del carbón mineral del mes de mayo hasta agosto, para una mejor visualización de su comportamiento.

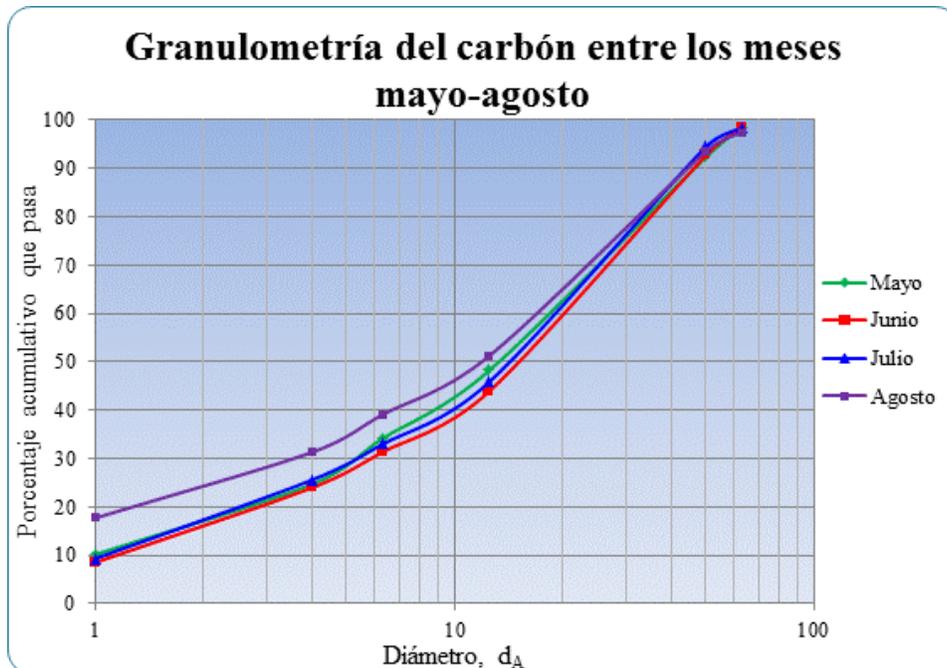


Figura 47. Granulometría del carbón del material B, desde el mes de mayo 2013, hasta el mes de agosto de 2013

Nota. Fuente: propia

Las cuatro (4) curvas presentan conductas similares, sin embargo, se puede ver notoriamente que el mes de agosto (curva violeta) presentó casi el 20% del carbón mineral, por debajo de 1 mm.

## 5.4 Cálculos pertinentes para el diseño del sistema de cribado

### 5.4.1 Tamaño del producto

En la Tabla 37, se presentan tabulados los datos de la distribución granulométrica de los ensayos realizados en el Laboratorio de Procesamiento mineral de la FI-UCV. En ella se observa el porcentaje pasante por cada una de las mallas, donde en este caso, los valores más importantes se encuentran en las aberturas de 50,80 y 4mm. Debido a que son aberturas cercanas a los tamaños de carbón que más se ajustan a los requerimientos establecidos por la empresa Loma de Níquel (Tabla 29). Sin embargo, la roca en estudio es clasificada como una roca de muy baja resistencia a la rotura, dando como consecuencia con el transporte del material se ve afectada las dimensiones del mismo. En consecuencia, las especificaciones granulométricas establecidas por la empresa deben ser otras, es decir, la granulometría debe ser mayor porque además, es una roca que por sus propiedades físicas, es de baja resistencia y

a su vez, tiende a perder su masa progresivamente por la manipulación, como indican los resultados obtenidos en los ensayos de *Slake Durability* y Carga Puntual.

Tabla 37. Porcentaje del carbón mineral. Resultado del ensayo de granulometría

<b>Malla</b>	<b>Tamaño mm</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumulado</b>	<b>% Pasante</b>
<b>2"</b>	50,8000	5,25	5,25	94,75
<b>1" 3/4</b>	44,4500	20,17	25,42	74,58
<b>1/2"</b>	12,7000	10,65	36,07	63,93
<b>1/4"</b>	6,3500	15,43	51,50	48,50
<b>4</b>	4,7568	5,97	57,47	42,53
<b>6</b>	3,3636	6,41	63,88	36,12
<b>10</b>	2,0000	8,80	72,68	27,32
<b>25</b>	0,7070	12,29	84,97	15,03
<b>100</b>	0,1490	10,07	95,04	4,96
<b>PAM</b>	NA	4,94	99,98	0,02

**Nota.** Fuente: Propia

En virtud de lo anteriormente expuesto, se propone que el tamaño del producto sea de 12,70 mm, es decir de 1", basado en la curva granulométrica generadas en este estudio y las proporcionadas por la empresa. Se observa que un promedio, aproximadamente del 50 % del carbón pasa dicha abertura de malla. Esta propuesta también se basa en el consumo del carbón mineral, el cual es, alrededor del 50% en la Planta de trituración y el restante a la Planta de carbón. Adicional a esto, al desgaste que sufre la roca mediante su exposición a la manipulación.

De acuerdo a las necesidades de la empresa, se propone un sistema que contenga una (1) tolva de alimentación para el carbón mineral, seguido de una (1) banda transportadora para que descargue sobre una (1) criba vibratoria, para que inmediatamente, el rechazo y el retenido resultante, sean trasladado por medio de dos (2) bandas a la zona de descarga, como se ilustra en el diagrama siguiente (Figura 49):

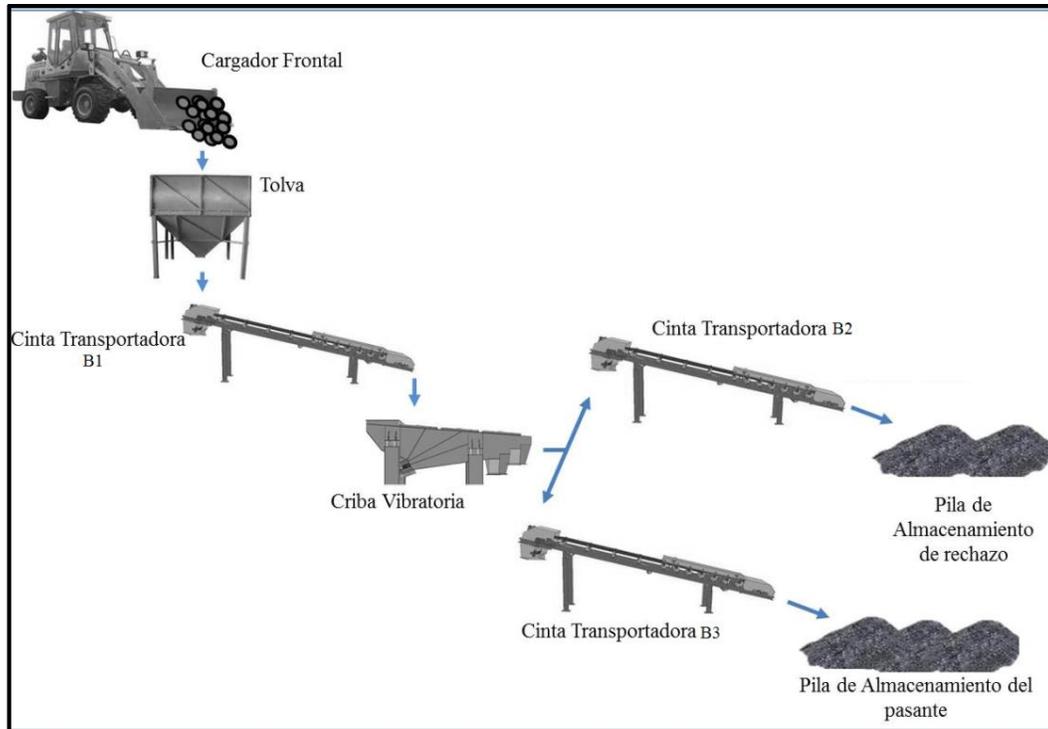


Figura 48. Diagrama del sistema de cribado para el carbón mineral, empleado en Loma de Níquel.  
**Nota.** Fuente: Propia

#### 5.4.2 Tasa de alimentación para la criba

En la Tabla 39, se observa que el mayor consumo de carbón mineral estuvo en el año 2011, de 137.891,638 t, obteniendo un promedio de consumo mensual de 11.490,970 t/mes, es decir, que para un turno diurno (establecido en la empresa Loma de Níquel) correspondiente a 12 horas, pero en este caso, se tomaran 10 horas operativas del sistema, para utilizar dos (2) horas necesarias para el llenado de las tolvas de almacenamiento del carbón.

De acuerdo a las horas activas del sistema, serian,

$$\text{Tonelaje de alimentación} = 38,30 \text{ t/h} \cong 40 \text{ t/h}$$

En el posterior balance de masa, se aproximó el porcentaje de material acumulado retenido del 40% y el 60% de material pasante en la abertura de 12,70 mm.

Tabla 38. Consumo de carbón en Loma de Níquel, desde el año 2010 hasta el 2013.

MES	AÑO			
	2010	2011	2012	2013
ENERO	7.817,804	12.150,118	11.576,687	0,000
FEBRERO	14.177,214	15.036,061	7.917,358	132,998
MARZO	9.630,567	11.202,110	10.816,242	3.932,209
ABRIL	10.229,746	18.335,098	12.668,073	5.522,688
MAYO	10.450,098	7.259,335	11.628,265	10.821,414
JUNIO	12.390,755	12.063,965	10.224,233	5.670,528
JULIO	10.208,869	7.888,244	9.737,212	4.582,918
AGOSTO	12.556,949	12.988,196	7.832,935	2.717,154
SEPTIEMBRE	13.431,188	9.601,098	3.080,259	490,302
OCTUBRE	11.815,755	9.806,118	662,551	0,000
NOVIEMBRE	10.577,917	9.490,302	0,000	0,000
DICIEMBRE	9.232,083	12.070,994	0,000	0,000
Promedio	11.043,245	11.490,970	7.178,651	2.822,518
Consumo total de carbón (t)	132.518,944	137.891,638	86.143,818	33.870,211

Nota. Fuente: Propia. Datos suministrados por la Gerencia de Procesos y Aseguramiento de Calidad, Loma de Níquel

En la Figura 50, se puede observar el esquema teórico de las t/h de carbón retenido y el pasante en función del tonelaje de alimentación.

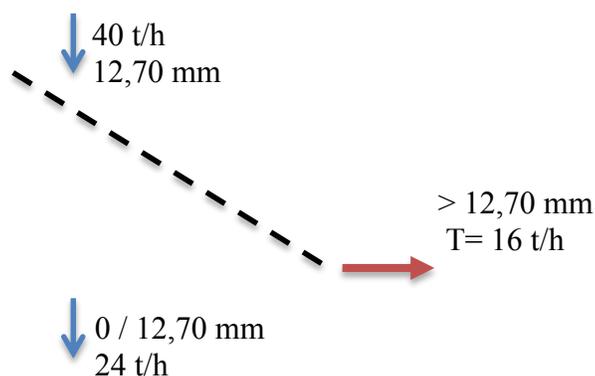


Figura 49. Esquema teórico del balance de masa del carbón mineral  
 Nota. Fuente: Propia

De acuerdo al balance de masa expuesto, se pretende almacenar alrededor de 160 toneladas de material clasificado por debajo de los 12,70 mm y 240 t de carbón mineral acumulado del rechazo.

### 5.4.3 Calculo de la capacidad de la tolva de almacenamiento para carbón mineral

Como se puede observar en el diagrama anterior, se colocó una tolva de almacenamiento para alimentar a la cinta (B1) que alimentaría a la criba. Por ello, se propone que tenga las siguientes dimensiones de acuerdo a la alimentación de la criba y de las dimensiones del balde de los equipos que se disponen en la empresa, por lo que las dimensiones de abertura superior sería de 3 m<sup>2</sup> y unas dimensiones de descarga inferior de 0,5 m<sup>2</sup> de acuerdo a las dimensiones máxima que presenta el carbón mineral que es utilizado en el proceso.

Además, se sugiere que dicha tolva tenga una altura de 4 m<sup>2</sup>, de acuerdo a la altura máxima de elevación de los cargadores que dispone la empresa.

Según (De Abreu, 2000), sugiere que la distancia de la boca de la tolva alimentadora a la banda debe de ser en función del diámetro máximo del material a cargar. Dicho esto, sería de 0,5 m de altura.

Conjuntamente, la tolva de carga debe estar ubicada siempre después de la "Distancia de Transición" del tambor de reenvío al primer trío abarquillado y respecto al sentido de marcha de la correa. (Tracsa, 2010)

Por lo tanto, se tienen las siguientes características:

- Abertura superior: 4 m
- Abertura inferior: 0,5 m
- Altura: 4 m

A partir de estos parámetros definidos, se calcula la capacidad que debería tener la tolva de almacenamiento del carbón mineral, haciendo uso de la Ecuación 13.

$$V_1 = L_1 * L_2 * L_3$$

Ecuación 11. Volumen de un cubo

En la Figura 51, se observan los valores de  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ , por lo tanto,

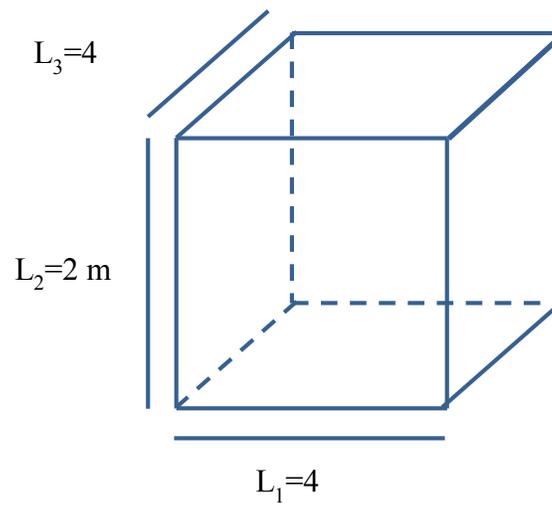


Figura 50. Valores de los  $L$ , que se sugiere que tenga la parte superior de la tolva.

**Nota.** Fuente: Propia

Sustituyendo los valores de  $L$ , se tiene,

$$V_1 = 4m * 2m * 4m$$

Entonces se tiene un volumen para la parte superior de la tolva de,

$$V_1 = 32\text{ m}^3$$

Para el cálculo del volumen de la parte inferior de la tolva, se tiene la Ecuación X siguiente,

$$V_2 = \text{Área de la base} * \frac{1}{3} h$$

Ecuación 12. Volumen de la parte inferior de la tolva

Por lo que el área de la base, viene dada por:

$$\text{Área de la base} = b_1 * b_2$$

Ecuación 13. Área de la base de la tolva

Unificando ambas fórmulas, se tiene,

$$V_2 = b_1 * b_2 * \frac{1}{3} h$$

Entonces, de acuerdo con los valores ilustrados en la Figura X, se tiene que,

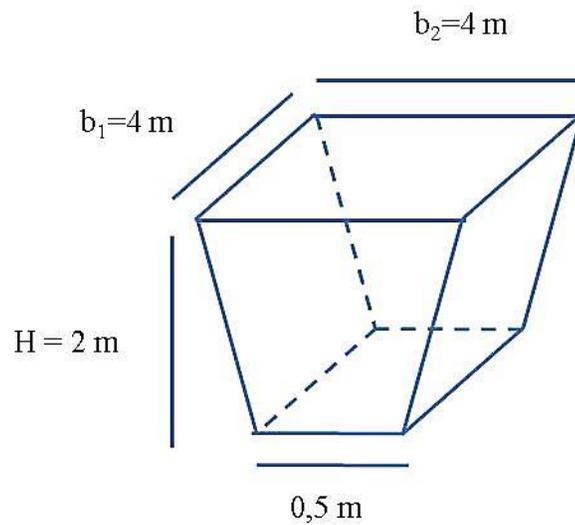


Figura 51. Valores de los lados, que se sugiere que tenga la parte inferior de la tolva

**Nota.** Fuente: Propia

$$V_2 = 4m * 4m * \frac{1}{3} 2m$$

Por lo que se tiene un volumen de,

$$V_2 = 10,67 \text{ m}^3$$

De acuerdo a los resultados obtenidos de los dos volúmenes,  $V_1$  y  $V_2$ , se procede a efectuar la sumatoria de ambos para obtener el volumen final. Lo que es,

$$V_T = V_1 * V_2$$

Entonces, se tiene un valor total del volumen de,

$$V_T = 32m^3 * 10,67 m^3 = 42,67 m^3 \cong 40 m^3$$

Como ya se tiene el volumen teórico que debería tener la tolva de almacenamiento, se procede a calcular el tonelaje que la misma debería almacenar. Y para esto, se debe conocer la densidad del material ( $\rho$ ), que en este caso es de  $0,98 t/m^3$ , entonces,

$$P = \rho * V$$

Ecuación 14. Volumen teórico de la tolva

El volumen a ser utilizado es el volumen total de la tolva, que ya fue calculado previamente, por lo que se tiene,

$$P = 0,98 t/m^3 * 40 m^3$$

Realizado los cálculos, se tiene que tonelaje teórico que debería almacenar la tolva, es de,

$$P = 39,2 t \cong 40 t$$

Como se planteó anteriormente, la alimentación teórica (t/h) de la criba es de 40 t/h, por lo que es necesario alimentar la tolva cada hora para que las operaciones del sistema no se vean afectadas.

#### 5.4.4 Calculo de la superficie de cribado

Para determinar la superficie de cribado, se tomaron cuatro (4) métodos, la cual se describen a continuación:

- **Método híbrido, planteado por** (Bouso, 2010)

Para realizar el cálculo de la superficie de cribado, se partió del método híbrido planteado por el autor. Donde el tonelaje teórico que debe atravesar la malla es de 21 t/h,

- ✓ Capacidad básica o específica,  $B$

Conforme a la Tabla 16, se parte a determinar la Capacidad Básica o específica ( $B$ ), a partir del tipo de material y la luz de la malla a la cual se quiere realizar la clasificación. Como en este caso el autor determinó la Capacidad utilizando carbón, para una abertura de 12,5 mm, lo que es una medida cercana a la abertura en estudio. Por lo que la Capacidad básica o específica es de:

$$B = 12,5 \text{ t/m}^2.\text{h}$$

- ✓ Densidad específica aparente,  $\rho_a$

Para determinar el factor de densidad específica aparente, se partió de la densidad del material en uso, lo que corresponde de  $0,98 \text{ t/m}^3$ . Valor calculado por el personal de la Gerencia de Procesos y Aseguramiento de Calidad de Loma de Níquel.

Utilizando la Ecuación 6, el factor a aplicar seria:

$$fd = \frac{0,98 \text{ t/m}^3}{1,6 \text{ t/m}^3}$$

$$fd = 0,61 \text{ t/m}^3$$

Evidentemente el factor de densidad ( $fd$ ) es bajo, debido a que por lo general, los carbones minerales son de bajo peso.

✓ Partículas superiores al tamaño de clasificación, rechazo R

Las partículas superiores al tamaño de clasificación, es decir, el porcentaje de rechazo sobre 12,70 mm es 40%, por lo cual el factor de corrección a emplear, sería de acuerdo con la Tabla 17:

$$fr= 0,94$$

✓ Partículas inferiores a la mitad del tamaño de clasificación, semitamaño

El porcentaje de partículas inferiores a la mitad de la luz de malla, o también llamado, semitamaño, 12,70 mm, es del 50%, por lo que, según la Tabla 18, el factor de corrección a sería de:

$$fs= 1,2..$$

✓ Eficiencia de clasificación, E

La eficiencia de cribado que se requiere para este método es del 96% de acuerdo a las características del material, y además, por las sugerencias que el autor Bouso (1999) presenta en la Tabla 19, por lo cual el factor a usar por eficiencia sería:

$$fe= 0,85.$$

Se toma una eficiencia del 96% ya que esto indica que teóricamente, el 4% de las partículas finas que debería haber pasado por la luz de la malla no pasaron, por lo que cualquier divergencia con la hipótesis planteada debe ser corregida por el factor de eficiencia  $fe$ . El valor seleccionado de la eficiencia es relativamente alta, ya que, en el presente estudio, uno de los factores importantes, son los finos. Por ello, es que se busca alcanzar una eficiencia máxima para que la clasificación sea la más eficaz posible. Además, según indica Bouso (1999),

Es muy frecuente que cuando el producto a cribar tiene un elevado contenido de partículas inferiores al tamaño de corte, aun con una elevada eficiencia, superior al 90 %, se obtengan

altos valores de desclasificados, y esto por pura matemática no por deficiencia del equipo de cribado. Recíprocamente alcanzar un bajo valor de desclasificados significaría operar con eficiencias por encima del 98 % lo cual es lógicamente imposible.

Bouso (1999), afirma que en el cálculo de la superficie de cribado basta con conocer la relación entre eficiencia y desclasificados en función del porcentaje de partículas finas inferiores al tamaño de corte, lo que se conoce como pasante, P.

En este caso, se puede calcular el porcentaje de desclasificados D, para la eficiencia planteada E= 96%, que es la que se desea obtener y se quiere conocer el porcentaje de desclasificados D en la fracción gruesa > 12,70 mm. Para esto con P= 60%.

Desarrollando la Ecuación 8, se puede obtener el porcentaje de desclasificados:

$$D = \frac{0,60 * (1 - 0,96)}{(1 - (0,60 * 0,96))}$$

Entonces, se tiene que,

$$D= 5,66\%$$

Es decir, que se tendría casi el 6% de desclasificados, lo que se puede considerar un valor normal y aceptable, ya que está por debajo del 10% (Bouso, 1999).

Y ahora, se quiere conocer con qué eficiencia E habría que trabajar para tener menos de 4 % de desclasificados, aplicando la Ecuación 9,

$$E = \frac{(0,60 - 0,04)}{0,60 * (1 - 0,04)}$$

Por lo tanto, se tiene que,

$$E= 97,22\%$$

Dicho valor generado, se puede decir que está por encima de la eficiencia deseada.

✓ Cribado en seco

Para un cribado que presenta un promedio de humedad de 6,36%, considerando las temporadas más críticas, que fue resultado de los meses mayo-agosto en estudio, que además presentó un porcentaje alto en los años de revisión (2010-2013).

Bouso (1999), confirma que a menudo los productos de alimentación no están exentos de humedad y a veces una humedad excesiva por encima de  $H = 9\%$  puede impedir el cribado, provocando el “cegado” de las mallas, siendo necesario realizar el cribado en vía húmeda. Es decir, que una  $H > 9\%$ , no se puede cribar en seco, por lo tanto, el cribado de este estudio debe ser por vía seca.

Por ende, la humedad del material en estudio está en el rango de  $\leq 9\% H > 3\%$ , por lo tanto, se tiene que el factor de humedad es de:

$$f_h = 0,75$$

✓ Tipo de abertura de malla

La malla a emplear es de abertura cuadrada, por lo que el factor sería,  $f_m = 1,00$ .

✓ Posición de la malla en la criba

En este caso, la malla es única, por ende se toma el factor del primer piso de la criba, por lo que el factor a emplear será,  $f_p = 1,00$ . En este caso solo se hará uso de un solo (1) paño, debido a que se pretenden dos (2) descargas, es decir, dos (2) tipos de clasificación.

✓ Ángulo de inclinación de la criba

De acuerdo con las diversas bibliografías consultadas, para el cribado del carbón mineral, se debe instalar una criba que presente un ángulo muy ligero, o por lo menos, que se encuentre entre 5 a 15°, ya que si el ángulo es muy alto, la eficiencia bajaría, ya que, al aumentar el ángulo de una criba, la abertura se reduce efectivamente por el coseno del ángulo de

inclinación (Kelly, 1990). Además, el carbón en estudio presenta alto porcentaje de humedad, lo que significa que si selecciona un ángulo alto, éste tiene más probabilidades de a colmatarse, por lo que para este caso se tomó el ángulo de 10°, por lo que el factor será:

$$f_i = 0,94.$$

✓ Área libre de paso

Para este trabajo se eligió la malla de poliuretano, porque evita el apelmazamiento y el acuñaamiento de materiales debido a la flexibilidad de la dicha malla. Por ende, de acuerdo con el material de la malla escogido y porcentaje de superficie libre sugerida por Bouso (1999), es de 46. Lo que el autor establece, que al momento de calcular la superficie de cribado necesaria, debería tenerse en cuenta la superficie libre considerada en el cálculo y la real a instalar en base al tipo y material de malla empleada, corrigiendo la superficie proporcionalmente a la diferencia entre las áreas libres, la “modelo” y la “real”. Por lo que la superficie libre considerada en el cálculo propuesto por el mencionado autor Bouso (1999), ha sido del 50%, por lo que implica dividir el porcentaje de área libre real, entre la modelo, es decir, la usada por el autor.

Por lo tanto, el factor a considerar sería,

$$f_o = \frac{46}{50}$$

Entonces,

$$f_o = 0,92.$$

Cabe destacar, que en el catálogo Rivet (s.f), señalan que empleando una malla de poliuretano, el cegamiento de las mallas se puede prevenir, ya que ha dado buenos resultados en la disminución del problema de cegamiento y asimismo, con ella se logra una gran eficiencia de clasificación debido a su gran área útil.

✓ Anchura de la criba

La criba debe tener una anchura mínima para que la capa de material no tenga un espesor elevado que impida la posibilidad de que las diferentes partículas tengan acceso a la malla. Para esto, se toma en cuenta la luz de la malla, siendo este normalmente de dos (2) a cuatro (4) veces la luz, (Bouso, 2010). Entonces, para el cálculo de la anchura mínima, se tiene:

$$Am = 116 * \frac{T * R}{Lm * fd}$$

Ecuación 15. Anchura teórica que debería tener una criba

Siendo:

*Am*, anchura mínima de la criba, expresada en mm

*T*, tonelaje de alimentación a la malla, expresado en t/h

*R*, porcentaje de rechazo, expresado en decimal

*Lm*, luz de malla, expresada en mm

*fd*, factor de densidad, sin unidades

$$Am = 116 * \frac{(40 \text{ t/h} * 0,40)}{(12,70 * 0,61)}$$

Entonces,

$$Am = 239,60 \text{ mm}$$

Los factores de corrección expuestos a continuación permitirán corregir la capacidad básica establecida en unas condiciones específicas que por supuesto difícilmente se ajustarán a la operación a estudiar.

Por lo tanto, se tiene un factor total de corrección a aplicar:

$$ft = fd * fr * fs * fe * fh * fm * fp * fi * fo$$

Por lo tanto se tiene que,

$$ft = 0,61 * 0,94 * 1,2 * 0,85 * 0,92 * 1,0 * 1,5 * 0,95 * 1,4$$

$$ft = 0,77$$

Por lo tanto la capacidad básica, multiplicada por los factores de corrección expuestos a anteriormente, permitirán corregir la capacidad básica establecida a las condiciones específicas que se pretenden ajustar a la operación en estudio. Entonces, la capacidad básica corregida será:

$$Bc = B * ft$$

Ecuación 16. Capacidad básica corregida

Entonces,

$$Bc = 12,50 \text{ t/m}^2 \cdot \text{h} * 0,77$$

Consecuentemente se tiene,

$$Bc = 9,63 \text{ t/m}^2 \cdot \text{h}$$

El tonelaje hipotético que recibe la criba es de 40 t/h y el material que debe pasar en teoría, es el 60%, es decir,  $T_p = 24 \text{ t/h}$  (tonelaje pasante), por lo que la superficie de cribado deberá ser:

$$S = \frac{T_p}{Bc}$$

Lo que es igual a:

$$S = \frac{24 \text{ t/h}}{9,63}$$

Entonces la superficie necesaria es,

$$S = 2,50 \text{ m}^2$$

(Bouso, 2010), recomienda en su artículo, incrementar la superficie de cribado “S” en un 20%, lo que resulta:

$$S = 2,50 \text{ m}^2 * 1,02$$

Entonces, el área final de la superficie va a ser de,

$$S = 2,55 \text{ m}^2$$

Este aumento de la superficie, es para evitar incertidumbres sobre el incremento de la capacidad de cribado, o la alimentación de la criba.

Teniendo en cuenta que la mayoría de las cribas comerciales guardan una proporción longitud/ancho del orden de 2,5 (Bouso, 2010), una criba de más de 2,33 m<sup>2</sup>, deberá tener unas dimensiones de ancho de:

$$\text{Ancho criba} = 1000 * \frac{S^{0,5}}{2,5}$$

Ecuación 17. Ancho de la criba

Por lo tanto, se tiene que,

$$\text{Ancho criba} = 1000 * \left( \frac{2,55 \text{ m}^2}{2,5} \right)^{0,5}$$

Entonces, el ancho de la criba es,

$$\text{Ancho criba} = 1.009,10 \text{ mm} \approx 1000 \text{ mm}$$

En cuanto a la longitud de la criba, viene dada por,

$$\text{Longitud criba} = 2,5 * A$$

Ecuación 18. Longitud de la criba

Entonces, se tiene,

$$\text{Longitud criba} = 2.524,88 \approx 2500 \text{ mm}$$

Con los datos obtenidos descritos anteriormente se tiene el tamaño nominal de la superficie que tendrá la criba, pero es importante destacar, que el tamaño final va a depender del tamaño comercial que tengan las mallas.

- **Método de “Alimentación total”, descrito por Fueyo (1999)**

Como fue detallado en el Capítulo III, la superficie de cribado en función de la alimentación viene dada por la Ecuación. 1. Para desarrollar esta fórmula, se determinaron los parámetros necesarios para dicho cálculo.

En primer lugar, la Capacidad específica como se ilustra en la Tabla 4, fue determinada a partir de la luz de malla, que es importante señalar, que en esta literatura, la abertura más próxima a la luz de malla en estudio (12,70 mm), es la de 12 mm y además, como el carbón mineral no es procesado, se considera que es del tipo natural.

Entonces,

$$\text{Capacidad específica} = 23 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$$

Los factores de corrección para este método son el de sobretamaño (B) y el tamaño mitad (C), ambos descritos en la Tabla 5.

Para este estudio, a partir del porcentaje de rechazo (R= 40%), se determina **B**, lo que se tiene que,

$$\mathbf{B} = 1,09$$

Y el tamaño mitad ( $T_m = 50\%$ ), que viene dado por,

$$C = 1,20$$

Por otro lado, y al igual que en el método anterior, por la estructuración del sistema, la criba llevará un solo paño, por lo tanto,

$$D = 1,00$$

Entonces, una vez definidos los datos y factores de corrección para la ejecución de la fórmula (Ecuación 1), se tiene:

$$\text{Superficie de cribado} = \frac{40 \text{ t/h}}{23 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} * 1,09 * 1,20 * 1,00}$$

Por lo tanto, la superficie de cribado calculada por el método planteado en el texto de Fueyo (1990), es,

$$\text{Superficie de cribado} = 1,33 \text{ m}^2$$

En esta bibliografía consultada, no sugieren modificar el resultado con otro factor, por ende, la Superficie se mantiene.

- **Método de “Capacidad de paso”, expuesto por Fueyo (1999)**

Como se ilustra en la Figura 50, en el esquema teórico de balance de masa, se describe el material pasante, lo cual es de  $P = 24 \text{ t/h}$ , y es el dato principal que se usará en este método.

De acuerdo con la Tabla 4, la Capacidad específica para este método, toma en consideración la forma del material, en este caso el carbón mineral corresponde a un material natural, ya que no es procesado, es decir, no es triturado. Además, en este método, la luz de malla más cercana a

la situación en estudio es la de 13,33 mm, por lo que se determinó la capacidad específica a partir de esa abertura.

Por lo tanto, la Capacidad específica es de,

$$\text{Capacidad específica} = 16,8 \text{ t/h}$$

En función del material de rechazo, se obtuvo el factor B, (Apéndice C),

$$B = 0,95$$

Además, el factor C (Tabla 6), que viene dado en función del porcentaje de partículas inferiores a la mitad de la dimensión de la luz en estudio, lo cual hay que aplicar un factor de,

$$C = 1,20$$

Asimismo, este método toma en cuenta la ubicación de la posición de la malla, el factor D (Tabla 7), el cual es,

$$D = 1,00$$

$$\text{Superficie de cribado} = \frac{24 \text{ t/h}}{16,8 \text{ t/m}^2 \cdot \text{h} * 0,95 * 1,20 * 1,00}$$

Por lo tanto, la Superficie de cribado=1,25 m<sup>2</sup>

#### - Método del “Factor empírico” descrito por Kelly (1990)

Este método está basado en función de la rapidez de flujo de masa de alimentación y se parte de la determinación de la Capacidad unitaria ( $I_u$ ) (Figura 17), que para este caso, se determina a partir de la luz de la malla, que es,

$$I_u = 70 \text{ m/h}$$

Para determinar el  $K_3$ , se utilizó la Figura 17, además del porcentaje de sobretamaño, así mismo, el factor  $K_2$ , se determina a partir de la misma Figura 17, utilizando el porcentaje de media abertura. Por lo tanto, de acuerdo a las gráficas, el valor de  $K_2$  viene dado por,

$$K_2 = 1,20$$

Además, teniendo en cuenta un área abierta de  $K_1 = 0,4160$  (Grupo Nuba, s.f).

y el factor  $K_3$ , es igual a,

$$K_3 = 1,10$$

Para este caso, se tomó un porcentaje de eficiencia del 95%, y haciendo uso de la Figura 19, lo cual arrojó un factor de,

$$K_4 = 0,60$$

Al igual que en los métodos anteriores empleados, se tomó la ubicación o número de la cubierta como superior, ya que la criba solo llevara un solo paño (Tabla 10).

Por lo tanto,

$$K_5 = 1,00$$

Por otra parte el factor de ángulo de la criba  $K_6$  dependerá de la inclinación que tenga dicha criba, en este caso tendrá un ángulo de  $10^\circ$ .

A partir de la Tabla 11, se tiene que,

$$K_6 = 1,05$$

Para determinar el  $K_{10}$ , que se refiere al factor humedad, se revisó la Tabla 15, que describe la tenacidad o condición de humedad de la superficie o ambas. Para esto, se determinó el factor que toma en cuenta el material que presenta humedad superficial, por lo tanto, se tiene que,

$$K_{10} = 0,85$$

Luego, se procede a multiplicar todos los factores de corrección, por lo tanto, el factor  $K_{\Sigma}$ , viene dado por,

$$K_{\Sigma} = 0,4160 * 1,2 * 1,1 * 0,60 * 1,05 * 0,85$$

Entonces,

$$K_{\Sigma} = 0.35$$

Por lo tanto, se procede al cálculo del área de superficie que es,

$$A = \frac{40 \text{ t/h}}{70 \text{ m/h} * 0,98 \text{ t/m}^3 * 0,35}$$

Entonces el área de superficie de cribado deberá ser,

$$A = 1,67 \text{ m}^2$$

En la literatura de (Kelly, 1990), se menciona, que a una mayor longitud, se proporciona mayor oportunidad al paso de partículas, aumentando primordialmente la eficiencia, pero aumentando ligeramente la capacidad. Es decir, que si la capacidad se eleva la eficiencia tendería a disminuir.

Ya que se obtuvieron cuatro (4) resultados del área o superficie de cribado, se generó la siguiente Tabla 39, comparativa, donde se observan las diferencias entre cada uno de los métodos.

Tabla 39. Comparación de los resultados obtenidos de los métodos empleados, para el cálculo del área o superficie de cribado

Método	Área o Superficie de cribado
Híbrido	$S = 2,55 \text{ m}^2$
Alimentación total	Superficie de cribado = $1,33 \text{ m}^2$
Capacidad de paso	Superficie de cribado = $1,25 \text{ m}^2$
Factor empírico	$A = 1,67 \text{ m}^2$

Nota. Fuente: Propia

De los resultados obtenidos, se ve que el método Híbrido fue el que generó mayor área, de  $2,23 \text{ m}^2$ , y en el método de Capacidad de paso, se obtuvo una superficie de  $1,10 \text{ m}^2$ , esto debido, a los factores de corrección que los autores recomiendan ser utilizados, infieren en los resultados del área que debe tener la criba para satisfacer las condiciones de cribado que se necesiten.

Las diferencias entre los resultados generados, tuvieron una desviación del 0,60, lo que se evidencia un desvío considerable entre los cuatro (4) metodologías empleadas para obtener dichos efectos.

En este caso se tomará como resultado definitivo, el empleado por el método de Bouso, que dio una superficie de  $2,55 \text{ m}^2$ , ya que se considera el más confiable porque se toman en cuenta, otros parámetros y condiciones que afectan a la capacidad del cribado, y por consiguientemente a la superficie necesaria, que el resto de los autores trabajados no lo hacen. Es por ellos, que los cálculos posteriores y decisiones a tomar, se realizaran en función del resultado generado por el método Híbrido.

En términos generales, el objetivo del cribado es brindarle la mayor cantidad de probabilidades a las partículas para pasar por las aberturas de la malla, logrando la mayor eficiencia de clasificación posible. Esto significa optimizar la eficiencia de la criba y maximizar el tonelaje procesado, para lo cual debe controlar los parámetros operacionales al máximo, teniendo siempre presente que para una misma malla la curva de eficiencia de clasificación y la curva de capacidad van normalmente en direcciones opuestas: cualquier

cambio que optimiza la eficiencia de cribado, muy posiblemente va a afectar la capacidad de proceso y viceversa.

#### - **Selección del tipo de criba**

Para este caso, la criba que más se ajusta al material que se necesita cribar, son las vibratorias, ya que estratifica dicho material que llega a la malla, acercando las partículas finas a la superficie de ésta, y transportan el material sobre la superficie de la malla para llevar hacia el punto de descarga a aquellas partículas que fueron rechazadas. Además, el consumo de energía por tonelada de capacidad, es inferior a las demás cribas, (Peláez, 1981).

#### - **Tipo de movimiento de la criba**

El propósito principal del movimiento de una criba, es presentar repetidas veces las partículas a las aberturas para que pasen. Para este caso, se sugiere una criba vibratoria, el cual la vibración debe ser de eje excéntrico, ya que el material avanza gracias a una combinación de la pendiente y del movimiento cinemático impartido por el propio mecanismo vibrante, (Kelly, 1990). A su vez, las cribas vibrantes de excentricidad fija, están formadas por un mecanismo capaz de forzar un movimiento circular de amplitud fija e independientemente de la carga circulante una estructura- soporte de las malla de clasificación anteriormente considerada.

A partir de las características del material a cribar y los resultados obtenidos por el método Híbrido, se tiene que la frecuencia sugerida para este tipo de criba y el tipo de material a cribar está comprendido entre 25-100 r.p.m y una amplitud de 2 a 15 mm, (Kelly, 1990).

A su vez la potencia sugerida por Bajzelj, 2006, debido a que es la que usualmente es utilizada para este tipo de maquinaria es de 5 HP.

Según catálogos Rivet (s.f), es importante tener presente que mientras menor sea la amplitud, más cerca de la malla va a estar el mineral y esto facilita el paso de las partículas a través de las aberturas.

La siguiente Tabla 40, da una referencia aproximada a la amplitud y la frecuencia para distintos tamaños de corte. De esta manera, se puede ajustar más a la criba que se encuentre en el mercado.

Tabla 40. Amplitud y frecuencias sugeridas para la criba en estudio

<b>Tamaño de corte mm</b>	<b>100</b>	<b>75</b>	<b>50</b>	<b>25</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Amplitud mm</b>	<b>6,5</b>	<b>5,5</b>	<b>4,5</b>	<b>3,5</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,5</b>	<b>1,0</b>
<b>Frecuencia mm</b>	<b>800</b>	<b>850</b>	<b>900</b>	<b>950</b>	<b>1000</b>	<b>1400</b>	<b>1500</b>	<b>1600</b>

**Nota.** Fuente: Catalogo Rivet, (s.f)

#### 5.4.5 Cálculos para la determinación de los parámetros de las cintas transportadoras

Cuando se implementa una criba, por lo general, ésta, está conectada con cintas transportadoras para la posterior descarga de mineral. Por lo tanto, en este estudio, se pretende calcular, tres (3) cintas; una para el material de rechazo (R) y una segunda para lo que corresponde al material pasante o clasificado (P). Para este caso, se tiene que las alimentaciones teóricas que tendrán las bandas serán las que se ilustran en la Tabla siguiente:

Tabla 41. Alimentaciones teóricas (t/h) de las bandas

<b>Banda</b>	<b>q<sub>h</sub></b>
<b>B1</b>	40
<b>B2</b>	16
<b>B3</b>	24

**Nota.** Fuente: Edición Propia

Para estos cálculos se tiene que tomar en cuenta la abrasión del material en estudio, como fue descrito anteriormente en los ensayos mecánicos, lo que indicó, que es un material con resistencia baja, es decir, que presenta baja resistencia a la abrasión.

Se parte definiendo los parámetros para el cálculo de la capacidad máxima, lo que se tiene que, en primer lugar se considera el factor de reducción por pendiente de banda (d) que fue determinado tomando en cuenta que, en función del ángulo de inclinación de las bandas asumidas para el carbón mineral es de 20°, y además el ángulo de reposo del carbón mineral es de 38° (Rulmecca S.A, 2000), por lo tanto, la pendiente de las bandas deben tener un ángulo por debajo del ángulo de reposo que presenta el material a transportar. Por lo tanto, de acuerdo a la Tabla 21, se tiene que,

$$d = 0,87$$

Siendo k, coeficiente del tipo de material, se define como material tipo tres (3), (Tabla 20) entonces se tiene:

$$k = 0,535$$

El carbón en estudio, presenta un peso específico<sup>1</sup> de:

$$p = 1,25 \text{ t/m}^3$$

En (De Abreu, 2000), sugieren que la velocidad máxima recomendada para el material en estudio debe estar entre 1 – 1,25 m/s, sin embargo, a pesar que es una sugerencia del autor, no se tomará, ya que en el sistema se está manejando poca capacidad de alimentación y es necesario utilizar una baja velocidad, porque además sobre alimentaria a la criba (B1) y para las bandas de descarga del material (B2 y B3).

Como referencia la velocidad será la sugerida por el estudio realizado por (Andrea, s.f), la cual, define la rapidez a partir de las características del carbón.

$$v = 0,5 \text{ m/s}$$

---

<sup>1</sup> Dato suministrado por la Gerencia de Procesos y Aseguramiento de Calidad de Loma de Níquel.

El tamaño máximo ( $l_m$ ) que se observó en el carbón en estudio es de aproximadamente 250 mm, por lo que se tiene una relación siguiente:

$$L \geq 2 * l_m + 0,2$$

Siendo,

$$l_m = 250 \text{ mm}$$

Entonces, se tiene que,

$$L = 502 \cong 500 \text{ mm} = 0.50 \text{ m}$$

Con estas consideraciones, la capacidad máxima teórica puede obtenerse, ejecutando la Ecuación 10, tal como,

$$Q = 3600 * d * k * p * v * L^2$$

$$Q = 261,8 \text{ t/h}$$

De acuerdo con el resultado, esta capacidad máxima que abarcan cada una (1) de las tres (3) bandas propuestas: B1, B2 y B3, por lo que abarca una alimentación considerable, tomando en cuenta un aumento en el consumo a futuro del carbón mineral.

Para obtener la resistencia a la tensión máxima a soportar la banda (Ecuación 21), se tienen que definir el número de lonas ( $n$ ) que estas deben tener. Y estas se definen a partir del ancho de la correa y del tipo del material que pretenden acarrear las mismas. Por lo tanto, tomando en cuenta, que el carbón mineral no es un material pesado se asumen 3 lonas para el sistema (Coneau, 2012).

Además, en la bibliografía consultada (De Abreu, 2013), sugieren un rango de resistencia a la tensión, que es del orden 50 – 60 Kg/cm, por lo que se asumirá el valor promedio,

$$T_1 = 55 \text{ Kg/cm}$$

En toda instalación minera se debe tomar en cuenta el factor de seguridad, para evitar la pérdida de material, o rompimiento de la banda, o en su defecto, cualquier ocurrencia que se pueda generar en el sistema, es por ello, que el mismo se debe tomar en consideración, para evitar o prevenir dificultades a futuro. Por esto, De Abreu, 2013, sugiere un rango que está entre 1 – 1,2, por lo que para este estudio se tomará el máximo,

$$f = 1,2.$$

Entonces, de la Ecuación 21, se puede obtener la tensión máxima ( $T_m$ ) a soportar por la banda,

$$T_m = \frac{(L * n * T_l)}{f}$$

Ecuación 19. Tensión máxima

$$T_m = 6.875,00 \text{ Kg}$$

El resultado de la tensión máxima se traduce, en que es el esfuerzo que soporta la cinta transportadora para las deformaciones que se puedan generar durante el acarreo del material, es decir, si se sobre pasa este valor, podría generarse inconvenientes en el sistema de cribado.

Para obtener los números de rodillos teóricos a utilizar para tanto los portadores como los de retorno, se deben conocer las separaciones que deberían tener cada uno de ellos y las separaciones en los extremos en el inicio y del final de la banda.

- Calculo del número de rodillos portadores ( $N_{RP}^o$ )

De la Tabla 22, se definen B y C, que son datos tabulados a partir del ancho de la correa y consisten en las separaciones en los extremos de la correa.

Por lo tanto,

$$B = 0,75$$

$$C = 0,60$$

Asimismo, la separación entre los rodillos de retorno ( $S^R$ ), se determina a partir de la Tabla 22, y es en función del ancho de la correa. Por lo tanto las tres (3) bandas propuestas para el sistema, tendrán el mismo valor.

Es importante considerar, que los pesos específicos sugeridos que se encuentran en la Tabla empleada para la determinación de  $S^R$ , no coinciden con el del material en estudio, por lo que se tomó el valor más próximo a dicho peso específico, la cual es de  $1,2 \text{ t/m}^3$ .

Como se conoce que el ancho de la correa que se definió para el sistema es de 500 mm, por lo tanto de la Tabla 22, se tiene que,

$$S^R = 3 \text{ m}$$

Asimismo, para determinar la longitud de separación de los rodillos portadores ( $S^P$ ), se toma de la Tabla 22, la cual está en función del peso específico del material a trasladar y el ancho de la correa. Igualmente como en las tres bandas se va a utilizar el mismo material y el mismo ancho. De esta forma, la separación de los rodillos portadores es,

$$S^P = 1,5 \text{ m}$$

Como se ha dicho anteriormente, las tres (3) bandas propuestas presentan el mismo ancho teórico de las correas, pero no la longitud, por lo tanto, se definirán los números de rodillos a ser utilizados para cada una de las bandas.

Para B1, se propuso una longitud de,

$$L_{B1} = 8 \text{ m}$$

A partir de la Ecuación 22, se tiene que el número de rodillos portadores

$$N^{\circ}_{RP}(B1) = \frac{L_B - B - C}{S^P}$$

Ecuación 20. Número de rodillos portadores

$$N^{\circ}_{RP}(B1) = \frac{8 - 0,75 - 0,60}{1,5}$$

Lo que se tiene que el número de rodillos portadores necesarios para B1, son de:

$$N^{\circ}_{RP}(B1) = 4,43$$

Por lo que se definen como,

$$N^{\circ}_{RP}(B1) \cong 5$$

El número de rodillos se lleva a cinco (5), ya que a pesar que la fórmula para determinar dicho número, toma en cuenta las separaciones de ambos extremos, sin embargo sería necesario decir que es el número definido, ya que no cubriría la totalidad de la longitud de la banda, sabiendo que la separación entre los mismos es de 1,5 m.

Para B2 y B3, se propuso una longitud de,

$$L_{B2} = L_{B3} = 5 \text{ m}$$

A partir de la Ecuación 23, se tiene que el número de rodillos portadores para B2 y B3, es,

$$N^{\circ}_{RP}(B2) = \frac{L_B - B - C}{S^P}$$

$$N^{\circ}_{RP(B2)} = \frac{5 - 0,75 - 0,60}{1,5}$$

Lo que se tiene que el número de rodillos portadores necesarios para las bandas B2 y B3, son de:

$$N^{\circ}_{RP(B2)} = N^{\circ}_{RP(B3)} = 2,43$$

Por lo tanto,

$$N^{\circ}_{RP(B2)} = N^{\circ}_{RP(B3)} \cong 3 \text{ rodillos}$$

Se toman el número de tres (3) rodillos, ya que como en el caso anterior, con la B1, se define ese valor para que abarque la longitud teórica definida, tomando en cuenta la separación entre dichos rodillos.

- Cálculo del número de rodillos de retorno ( $N^{\circ}_{RR}$ )

Una vez calculados los números de rodillos portadores, se procede a calcular los de retornos para las tres (3) bandas.

Para B1,

$$N^{\circ}_{RR(B1)} = \frac{L_B - B - C}{S_R}$$

Ya expuestas anteriormente los valores de las variables, se tiene,

$$N^{\circ}_{RR(B1)} = \frac{8 - 0,75 - 0,60}{3,00}$$

Entonces el número de rodillos para el retorno de la cinta, es de,

$$N^{\circ}_{RR(B1)} = 2,22 \cong 2 \text{ rodillos}$$

Y para las bandas B2 y B3, se proceden a calcular de la misma manera pero con las longitudes de las cintas diferentes a B1, por lo tanto,

Lo que se puede definir que debido a que presentan la misma longitud de correa, se asume lo siguiente,

$$N^{\circ}_{RR(B2)} = N^{\circ}_{RP(B3)} = N^{\circ}_{RP(B)}$$

Por lo que el número de rodillos de retorno, viene dado por,

$$N^{\circ}_{RR(B)} = \frac{5,00 - 0,75 - 0,60}{3,00}$$

Entonces se tiene que,

$$N^{\circ}_{RR(B2)} = N^{\circ}_{RR(B3)} = 1,22 \cong 1 \text{ rodillo}$$

Como la longitud de las bandas B2 y B3 son más pequeñas que la B1, por ello, que de acuerdo a su longitud se obtiene un solo rodillo, tomando en cuenta las consideraciones de los extremos de la cinta.

La potencia teórica, necesaria para el funcionamiento de la banda transportadora, será la suma de tres elementos:

$$W_T = W_1 + W_2 + W_3$$

Ecuación 22. Potencia teórica que deberían tener las bandas

Para cada cinta transportadora se deben calcular las potencias.

$$W_1: \text{potencia para la marcha en vacío} = P * (L_B - B - C) * 0,036 * \frac{v}{75}$$

$$W_2: \text{potencia para transporte horizontal material} = \frac{q_h * (L_B - B - C) * 0,036}{270}$$

Ecuación 23. Potencia para transporte horizontal material

$$W_3: \text{potencia para la elevación del material} = \frac{q_h * H}{270} \text{ (negativa para banda en la que el material descienda)}$$

Ecuación 24. Potencia para la elevación del material

La potencia del motor se obtendrá dividiendo la suma de las potencias necesarias para mover la banda en las condiciones actuales de la instalación por el rendimiento del motor-reducción acoplamiento, que, en general es de 0,80 a 0,85. Lo que es igual a,

$$P_m = (W_1 + W_2 + W_3) / 0,8$$

Para calcular  $W_1$ , se tiene que,

$$W_1 = p * D * f * \frac{v}{75}$$

Donde,

Siendo,

f: coeficiente de fricción de la instalación, que depende del tipo y diámetro de los rodillos (varía de 0,025 a 0,05. Para instalaciones subterráneas con rodillos de rodamientos a bolas, se puede tomar 0,03).

D: longitud de la banda entre los rodillos extremos, corregida por la fricción en los rodillos.

P: peso por metro lineal de los elementos en movimiento y rotación de la transportadora: bandas superior e inferior; rodillos superiores e inferiores; tambores motores y de colas. Esta ecuación viene dada por,

$$P = \text{peso aprox. de la cinta} + \left( \frac{\text{peso aprox. de los rodillos portadores}}{N^{\circ} \text{ de rodillos portadores}} \right) + \left( \frac{\text{peso aprox. de los rodillos retorno}}{N^{\circ} \text{ de rodillos retorno}} \right)$$

Ecuación 25. Peso total de la banda y los rodillos involucrados

- **B1**

A partir de la Tabla 23, se determina el peso aproximado de la correa en función del ancho de la misma, que es, de  $L = 500$  mm. Como las tres (3) bandas presentan el mismo ancho se tiene entonces,

$$\text{peso aprox. de la cinta B1} = 5 \text{ Kg/m}$$

El diámetro de los rodillos portadores, se definen a partir del peso de los mismo y del ancho de la banda (500 mm), de acuerdo (Tracsa, 2010), el diámetro recomendado para el material en estudio, es de 125 mm, por lo tanto, según la Tabla 24, es de,

$$\text{peso aprox. de los rodillos portadores} = 14 \text{ Kg}$$

Según la Tabla 25 y al igual que los rodillos portadores, el diámetro de los rodillos de retorno, vienen dado por,

$$\text{peso aprox. de los rodillos retorno} = 10 \text{ Kg}$$

Una vez definido los pesos, se procede al cálculo del peso de los elementos en movimiento y rotación de la banda transportadora, a partir de la Ecuación 27,

$$P = 5 + \left(\frac{14}{5}\right) + \left(\frac{10}{2}\right) = 12,8 \text{ Kg}$$

Entonces la potencia para la marcha en vacío de la B1,

$$W_{1-B1} = P * (L_B - B - C) * 0,036 * \frac{v}{75}$$

Sustituyendo los valores, se tiene que,

$$W_{1-B1} = 12,8 \text{ K} * (8 - 0,75 - 0,60) * 0,036 * \frac{0,5 \text{ m/s}}{75}$$

Entonces,

$$W_{1-B1} = 0,02 \text{ HP}$$

Para determinar la potencia para transporte horizontal el material ( $W_2$ ), viene dado por, (Ver  $q_h$  en la Tabla X)

$$W_{2-B1} = \frac{40 \text{ t/h} * (8 \text{ m} - 0,75 - 0,60) * 0,036}{270}$$

Sustituyendo se tiene,

$$W_{2-B1} = 0,04 \text{ HP}$$

Y para la potencia para la elevación del material, se tomó en cuenta la altura a la que debería estar la banda, que en este caso para B1,  $H= 1 \text{ m}$ , y viene dada por

$$W_{3-B1} = \frac{40 \text{ t/h} * 1 \text{ m}}{270} = 0,15 \text{ HP}$$

Por lo tanto, la potencia teórica que debería tener el motor para la banda 1, sería,

$$P_{mB1} = 0,26 \text{ HP}$$

- **B2**

A partir de la Tabla 23, se determina el peso aproximado de la correa en función del ancho de la misma, que es, de  $L = 500 \text{ mm}$ , entonces,

$$\text{peso aprox. de la cinta} = 5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}$$

Aplicando la Ecuación 27, y como se mencionó anteriormente los rodillos portadores tienen un peso aproximado de  $14 \text{ Kg}$  y los de retorno de  $10 \text{ Kg}$ , lo que varía es la cantidad de rodillos de acuerdo a la longitud de la banda, por lo que se tiene que,

Para B2,

$$N^{\circ}_{RP(B2)} = N^{\circ}_{RP(B3)} \cong 3 \text{ rodillos}$$

$$N^{\circ}_{RR(B2)} = N^{\circ}_{RR(B3)} = 1 \text{ rodillo}$$

Por lo tanto,  $P = 5 \text{ Kg}$  porque las tres (3) bandas presentan el mismo ancho.

$$P = 5 \text{ Kg} + \left(\frac{14}{3}\right) + \left(\frac{10}{1}\right) = 19,67 \text{ Kg}$$

El diámetro de los rodillos portadores, se definen a partir del peso de los mismo y del ancho de la banda ( $500 \text{ mm}$ ), de acuerdo (Trasca, 2010), el peso recomendado para el material en estudio, es de  $125 \text{ mm}$ , por lo tanto, según la Tabla 24, es de,

Para determinar potencia para la marcha en vacío de la B2, se tiene que,

$$W_{1-B2} = 19,67 \text{ Kg} * (5 - 0,75 - 0,60) * 0,036 * \frac{0,5^m}{75} = 0,02 \text{ HP}$$

Por lo tanto, definiendo a f y a D, se tiene que,

$$W_{2-B2} = \frac{16 \text{ t/h} * (5 \text{ m} - 0,75 - 0,60) * 0,036}{270} = 0,008 \text{ HP}$$

Para el cálculo de  $W_3$  se asumió tener una altura de 3 m tomando en cuenta las dimensiones de la superficie de cribado y a su vez en la alimentación. Por lo que se tiene dado por,

$$W_{3-B2} = \frac{16 \text{ t/h} * 3 \text{ m}}{270} = 0,18 \text{ HP}$$

$$P_{mB2} = (W_1 + W_2 + W_3)/0,8$$

$$P_{mB2} = (W_{1-B2} + W_{2-B2} + W_{3-B3})/0,8$$

$$P_{mB2} = 0,21 \text{ HP}$$

- **B3**

$$W_{1-B2} = W_{1-B3} = 0,02 \text{ HP}$$

Para el cálculo de  $W_2$  se tiene una capacidad de 24 t/h, establecidas anteriormente.

$$W_{2-B3} = \frac{24 \text{ t/h} * (5 \text{ m} - 0,75 - 0,60) * 0,036}{270} = 0,01 \text{ HP}$$

Y consiguiente,  $W_3$  viene dado por:

$$W_3 = \frac{24 \text{ t/h} * 3 \text{ m}}{270} = 0,3 \text{ HP}$$

Por lo que se tiene una potencia teórica total de,

$$P_{m-B3} = \frac{0,02 + 0,01 + 0,3}{0,8} = 0,1 \text{ HP}$$

$$P_{m-B3} = 0,30 \text{ HP}$$

Por lo tanto, ya que las operaciones serán con poca alimentación se trabajara con baja potencia.

La que obtuvo mayor potencia fue B3, debido a que presenta la misma longitud y que B2, transporta más material, y a su vez, porque presenta inclinación, como es en el caso contrario de B1, que transporta más material que las bandas B2 y B3, pero no necesita tanta fuerza para su operación.

Asimismo, la altura de descarga del material de las cintas, se estima que no sobrepase los 3 m de altura, esto debido a que el carbón es una roca frágil y además, por las propiedades del carbón se debe apilar en un lugar donde el suelo debe estar bien nivelado, firme, sin grietas y bien drenado, a su vez, la pila no debe ser muy elevada.

El almacenamiento de carbón debe ser durante el menor tiempo posible. El carbón debe apilarse en capas, compactándose para reducir el aire dentro de la pila y así evitar calentamiento espontáneo. (Geométrica, 2008).

## 5.5 Estimación de costos del sistema de cribado

Cuando se pretende instalar un sistema, se deben consultar los componentes del mismo, para obtener de esta manera, una estimación general del costo.

La misma, nos ayuda a establecer las expectativas con respecto a los precios del mercado que se manejan en la actualidad.

Para desarrollar este método, es necesario el requerimiento de diferentes casas fabricantes con equipos que presenten características similares a las definidas en este trabajo.

### 5.5.1 Costo de la Tolva

- ✓ Características:
  - Capacidad: 40 m<sup>3</sup>
  - Abertura superior: 4 m<sup>2</sup>
  - Abertura inferior: 0,5 m<sup>2</sup>
  - Altura: 4 m<sup>2</sup>

En la Tabla 42, se muestra el costo estimado de una tolva, del proveedor Sistemas de criba.

Tabla 42. Costo estimado para una tolva

Proveedor	Costo
Sistemas de criba	10.700 \$

**Nota.** Fuente: (Sistemas de cribado, s.f)

### 5.5.2 Costo de la Criba propuesta

- ✓ Características:
  - Ancho: 1000 mm
  - Largo: 2500 mm
  - Superficie de cribado: 2,5 m<sup>2</sup>
  - Niveles: 1

De acuerdo a las características de la criba calculada, se obtuvieron algunos de los fabricantes características similares a las definidas de la criba de estudio.

- Proveedor:

## Tusa

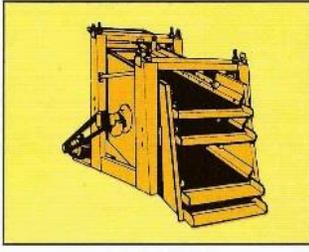
	SUSPENDIDAS QC			
	Modelos	Malla		Dimensiones mm.
		Superficie m <sup>2</sup>	Número máximo de pisos	
	QC 12	1,20	4	600 x 2.000
	→ QC 23	2,30	4	900 x 2.500
	QC 36	3,60	4	1.200 x 3.000
	QC 45	4,50	3	1.500 x 3.000
QC 60	6	3	1.500 x 4.000	

Figura 52. Modelo QC Tusa

Nota. Fuente: (Tusa, s.f)

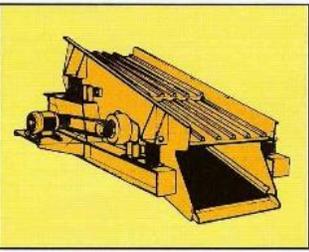
	PRIMARIAS CS			
	Modelos	Malla		Dimensiones mm.
		Superficie m <sup>2</sup>	Número de pisos	
	18	1,8	1-2	900 x 2.000
	→ 30	3	1-2	1.200 x 2.500
	45	4,5	1-2	1.500 x 3.000
	60	6	1-2	1.500 x 4.000
72	7,2	1-2	1.800 x 4.000	

Figura 53. Modelo CS Tusa

Nota. Fuente: (Tusa, s.f)

## Simplex

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS - CRIBAS VIBRATORIAS INCLINADAS - SXPI										
Modelo	Nº de Pisos	Dimensiones del cuadro (mm)	CV	Rotación del Mecanismo (rpm)**	Carga Dinámica *		Peso (kg)			
					Régimen	Parada	1 Piso	2 Pisos	3 Pisos	4 Pisos
SXPI - 2010	1-2-3-4	2000 x 1000	5,0	800 a 1100	100	800	720	840	980	1130
SXPI - 2510	1-2-3-4	2500 x 1000	5,0	800 a 1100	100	800	870	1030	1200	1360
SXPI - 3010	1-2-3-4	3000 x 1000	7,5	750 a 1000	100	800	1380	1610	1870	2120
SXPI - 3012	1-2-3-4	3000 x 1200	10	750 a 900	130	1000	1780	2090	2280	2640
SXPI - 3013	1-2-3-4	3000 x 1300	10	750 a 900	150	1200	1920	2270	2660	3080
SXPI - 4013	1-2-3-4	4000 x 1300	12	750 a 900	200	1600	2430	2860	3350	3880
SXPI - 4015	1-2-3-4	4000 x 1500	15/20	750 a 900	250	1800	3040	3580	4180	4850
SXPI - 4518	1-2-3-4	4500 x 1800	20/25	750 a 900	280	2000	3450	4060	4680	5420
SXPI - 4522	1-2-3-4	4500 x 2200	25	750 a 900	350	2000	3180	4850	6520	8190
SXPI - 5020	1-2-3-4	5000 x 2000	25	750 a 900	350	2000	4130	4620	6210	7800
SXPI - 5522	1-2-3-4	5500 x 2200	30	750 a 900	500	2500	6890	8115	9430	10745
SXPI - 6020	1-2-3	6000 x 2000	40	750 a 900	500	2500	9135	9663	11191	
SXPI - 6024	1-2-3	6000 x 2400	40	750 a 900	500	2500	9760	10300	11700	
SXPI - 7024	1-2-3	7000 X 2400	60	750 a 900	500	2500	12030	14015	16000	
SXPI - 8026	1-2	8000 X 2600	60	750 a 900	500	2500	14300	16300	18300	

\*Cargas verticales por apoyo. Como carga horizontal considerar 25% de la carga vertical \*\*Conforme la granulometría del material que esta siendo procesado.

Figura 54. Especificaciones técnicas de cribas vibratorias inclinadas Simplex

Nota. Fuente: (Equipamento e sistemas Simplex, s.f)

## **-Urbar Ingenieros S.A**

Con respecto a la criba de este proveedor (Figura 55), las dimensiones de la superficie de cribado son parecidas a las definidas en este trabajo, sin embargo soporta una tasa de alimentación muy por encima de lo determinado.

<b>Características técnicas</b>	
Caudal:	hasta 800 t / h
Granulometría:	hasta 80 mm (densidad > 1,5 t / m <sup>3</sup> ) hasta 200 mm (densidad < 1,5 t / m <sup>3</sup> )
Corte:	entre 0,5 y 150 mm
Anchura útil:	entre 800 y 2700 mm
Longitud útil:	entre 3 y 12 m
Peso:	entre 1 y 17 t
Motor de accionamiento:	entre 2 y 45 kW
Inclinación:	entre 0° y 18°



Las cribas bivi-TEC pueden ser suministradas con uno o dos pisos, o bien con un piso y un piso superior de protección.

Figura 55. Modelo bivi.TEC

**Nota.** Fuente: (URBAR, 2010)

Los modelos mostrados en las figuras anteriores, respectivas a las cribas, son los más cercanos a la criba propuesta, sin embargo, los mismos poseen diferencias, como lo son, la cantidad de niveles y las dimensiones, por lo que la sugerencia sería la construcción o el ensamblaje de la máquina cribadora para obtener una mayor eficiencia, de acuerdo a los cálculos realizados anteriormente, y un ahorro económico, se podría estudiar la posibilidad de la construcción de parte de ella en las instalaciones de la empresa Loma de Níquel.

Cabe destacar que para el cálculo de la estimación de costos, se tomará como referencia la marca Simplex, modelo SXPI-2510 (Figura 54), ya que es la que más se asemeja a las calculadas en este trabajo y además, fue donde se pudo obtener el costo del equipo en dicha casa fabricante. La tabla posterior muestra el costo estimado de una criba vibratorio con características parecidas a la de este trabajo.

Tabla 43. Características de la criba vibratoria del proveedor Simplex

Proveedor	Modelo	Costo (\$)
Simplex	SXPI-2510	11.021

Nota. Fuente: (Equipamento e sistemas Simplex, s,f)

### 5.5.3 Costos de las bandas transportadoras

- Bandas transportadoras:
  - ✓ Características:
    - Ancho: 500 mm
    - Largo total de las tres (3) cintas: 18 m

Tabla 44. Características de las bandas del proveedor Simplex

Proveedor	Modelo	Ancho (")	Ancho (mm)	Longitud (m)	Costo (\$)
Simplex	SXTC	24"	610	19,5	45.263
		20"	508	16	22.863
		20"	508	15	22.211
		24"	610	29	44.737

Nota. Fuente: (Equipamento e sistemas Simplex, s,f)

Como se observa en la Tabla anterior, ninguno de los modelos sugeridos por el proveedor se ajustan a las características de las bandas calculadas en este trabajo, no obstante, se tomara como referencia la banda de ancho de 24" y de longitud de 19,5 m, para calcular la estimación del costo, debido a que la longitud que exponen, es la que más concuerda a las necesidades del sistema propuesto. Teniendo en cuenta que estos valores son sugeridos por la problemática de las limitantes para obtener información con respecto a los costos y especificaciones de las bandas transportadoras que se encuentran actualmente en el mercado.

Por lo tanto, se tiene que costo total (Ct) de los equipos es la sumatoria de los equipos sugeridos para el sistema de cribado, por lo que se tiene que,

$$Ct = Ct + Cc + Cb$$

Ecuación 26

Lo que da una sumatoria total del costo de los equipos de,

$$Ct = (10.700 + 11.021 + 45.263)\$$$

Se tiene como costo total estimado del proyecto,

$$Ct = 66.984 \$$$

Es importante destacar que estos costos son de planta, es decir, no se agregaron los costos adicionales de traslado e impuestos de los equipos a la empresa Loma de Níquel.

## CONCLUSIONES

---

Una vez realizados los análisis correspondientes a los resultados y planteado el sistema de clasificación granulométrico, se generaron las siguientes conclusiones:

- Las especificaciones granulométricas de los carbones de los proveedores anteriores y el actual no cumple con las establecidas por la empresa Loma de Níquel. Además el porcentaje de finos presentes en el material B, es mayor que el material A1.
- En el período estudiado (mayo-agosto 2013), se obtuvieron niveles considerablemente altos de humedad, que alcanzaron hasta un 23,78 %, sin embargo, el promedio de humedad en ese intervalo de tiempo se encuentra en 6,36%.
- El carbón mineral utilizado en la empresa tiende a desgastarse progresivamente con la manipulación y la exposición al calor y al agua, dado que se obtuvieron valores de pérdida de masa mayor al 9,81%, en seco, y en húmedo presentó un desgaste total de 7,70%.
- La resistencia a la compresión simple del carbón, fue en 12,29 Mpa, de acuerdo con la literatura se clasifica como roca de resistencia baja.
- El análisis de los resultados granulométricos existentes del carbón en el período mayo-agosto del 2013, presentaron conductas similares en las curvas granulométricas.
- La propuesta diseñada del sistema de clasificación estará constituido por:
  - ✓ Tolva de alimentación de capacidad para 40 t.
  - ✓ Criba vibratoria, de un solo paño de luz de 12,70 mm, con una capacidad de alimentación de 40 t/h, para un turno de 10 horas. Además, con una frecuencia comprendida entre 25-500 r.p.m y una amplitud de 2 a 15 mm. Y una potencia de 5 HP.
  - ✓ Tres (3) banda transportadora, una (1) de alimentación a la criba, de longitud de 8 m, y dos (2) de transporte a la zona de descarga, cada una de 5 m. Las bandas tendrán un ancho de 500 mm y un total de 18 m de longitud, de velocidad de 0,5 m/s y potencia para B1= 0,26 HP, B2= 0,21 HP y B3= 0,30 HP.

- La situación que presenta la empresa Loma de Níquel con el carbón mineral se puede resolver implementando un sistema de clasificación, que garantice la granulometría adecuada en la Planta de trituración y en Planta de carbón.
- La estimación de la inversión considerando los precios de los equipos involucrados en el sistema, dio como resultado total de 66.984 \$.

## RECOMENDACIONES

---

En función de todo lo antes expuesto se presentan las siguientes propuestas para establecer el sistema de clasificación granulométrico de carbón:

### *Criba*

- Debido a que en las principales casas comerciales de cribas no se encuentra el equipo con las dimensiones calculadas en este trabajo, se proponen dos alternativas: fabricar una criba con los parámetros indicados en este trabajo o seleccionar un equipo sobredimensionado con dimensiones cercanas a las calculadas que cumpla con los requerimientos de eficiencia.
- Se debe consultar al fabricante de mallas para conocer los valores exactos del área libre de paso, pues esta varía con la calidad de la malla, diámetro del hilo, espesor de la malla, etc., y el tipo de malla depende del trabajo en particular, tamaño máximo de partícula, número de horas de trabajo, abrasión del producto, etc.

### *Instalación del sistema de clasificación*

- Se sugiere instalar el sistema de cribado en el área de Patio externo A o bien sea, en el área de Planta de carbón, debido a que en esas áreas se disponen de espacios abiertos para el manejo del carbón mineral hacia las instalaciones para ser utilizado.

### *Almacenamiento*

- El carbón mineral se debe mantener bajo techo para evitar que se moje y no aumente el porcentaje de humedad en el material.

### *Ambiental*

- Realizarle estudios químicos al material retenido en los electrofiltros para cuantificar el carbón mineral retenido.

## BIBLIOGRAFÍA

---

(s.f.).

.a-venezuela.com. (2002). Recuperado el 10 de 08 de 2013, de <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/viales/araguav.html>

Ampla. (3 de diciembre de 2006). *Contrato Modelo de Servicios Mineros de AMPLA – de Carbón y Hierro*. Recuperado el 16 de agosto de 2013, de <http://www.ampla.org.au/documents/item/458>

Andrea, E. (s.f). *Cintas transportadoras*. Cantabria.

a-venezuela.com. (s.f.). Recuperado el 10 de 08 de 2013, de <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/viales/araguav.html>

Bajzelj, F. (2006). *Diseño de una máquina cribadora de material petreo, modular, con una capacidad de carga de 300m<sup>3</sup>/día*. Salgolqui.

Berau of mines. (1976). *Ringelmann smoke chart*. Recuperado el 13 de enero de 2014

Bieniawski, Z. (1973). En *Rock Mas Classifications*. New York.

Bouso, L. (2010). Cálculo de la superficie de cribado. *Eral, Equipos y Procesos, S.A*, 18.

Coneau. (agosto de 2012). *Coneau*. Recuperado el 10 de marzo de 2014, de Ingeniería de Minas: <http://www.coneau.gov.ar/archivos/374.pdf>

Dankhe. (1986). *Diferentes diseños. Tipos de investigación*. Recuperado el 13 de octubre de 2013, de [www.revistaespacios.com/volumen17](http://www.revistaespacios.com/volumen17)

De Abreu, J. (2000). Transportadora de banda. En s.n, *Recompilación de los temas de la materia: Infraestructura para minería*. UCV (págs. 12-28). Caracas.

Equipamento e sistemas Simplex. (s,f). *Cribas Vibratorias Simplex*. Brasil: Lagoa Santa.

Farmer, A. &. (1976). *Principles of Engineering Geology*. London: CHAPMAN AND HALL.

Fueyo, L. (1999). *Equipos de trituración, molienda y clasificación*. Madris: Rocas y minerales.

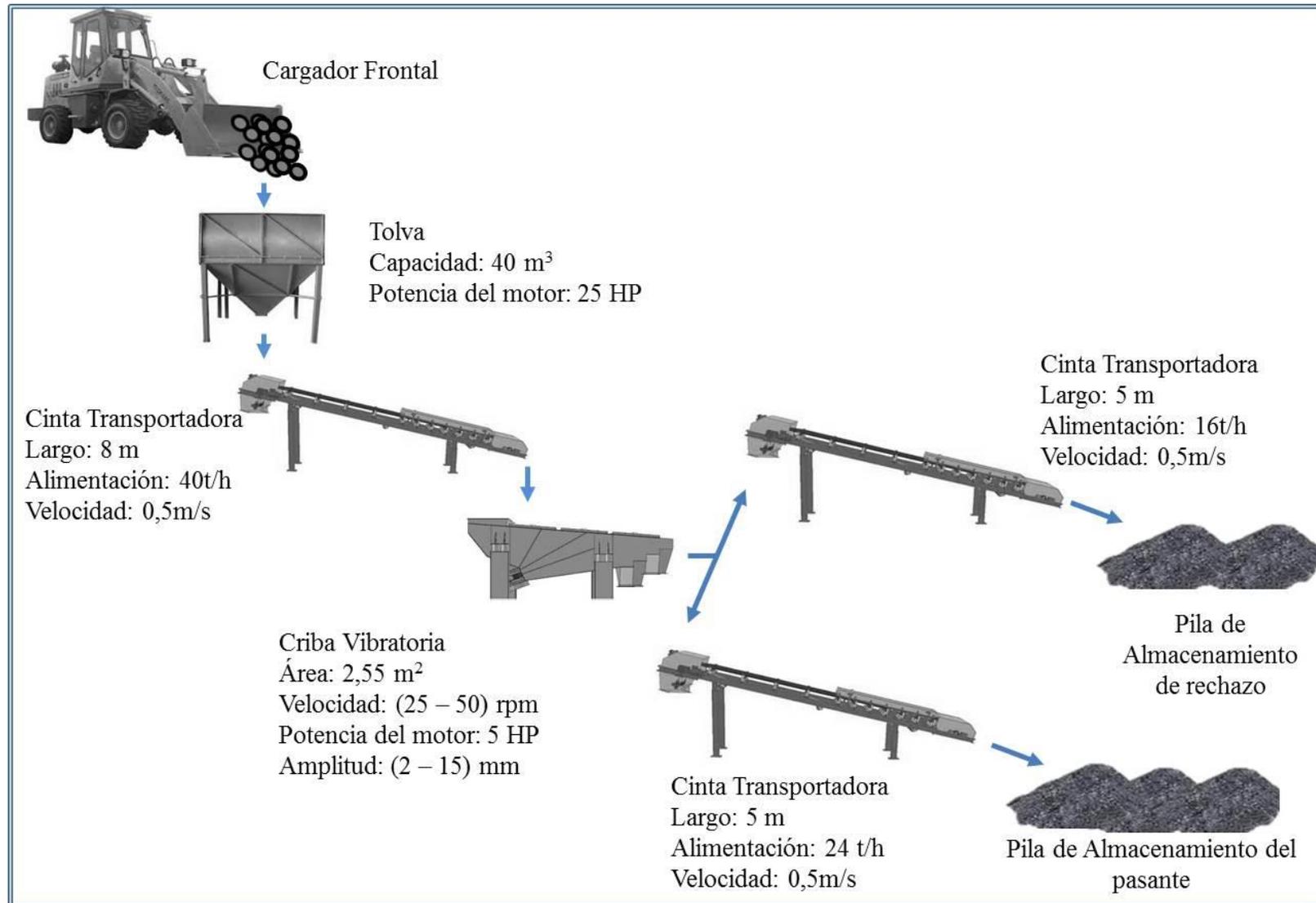
Geométrica. (28 de septiembre de 2008). *Geométrica*. Recuperado el 01 de marzo de 2014, de [www.geometrica.com/es/coal](http://www.geometrica.com/es/coal)

Grupo Nuba. (s.f). Talleres Nuñez. *Superficies cribantes para la clasificaciòn*, 36.

- Guzmán, L. (2004). *Ajuste, implementación y evaluación de la metodología Ringelmann para el control de fuentes móviles de emisión tipo diesel, en la ciudad de Bogotá D.C.* Bogotá D.C: Universidad del Bosque. Facultad de Ingeniería ambiental.
- Hernández, S. (2003). *Metodología de la Investigación*, 3 edición. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Instituto mundial del carbón. (Mayo 2005). (s.f.). *El carbón como recurso: una visión.*
- Kelly, E. (1990). *Introducción al procesamiento de minerales.* México: Limusa.
- Korol, B. (1965). *Estratigrafía de la Serie Pastora en la región Guasipati-El Dorado.* Caracas: Bol. Geol.
- Ley Orgánica del Ambiente. (23 de enero de 1995). *Decreto 638. Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica.* Caracas, Venezuela.
- Loma de Níquel. (2000). *Geología local.* Miranda.
- Lozano, F. (2014). *ARITEMA, MAQUINARIA TECNICA PARA ARIDOS S.A.L.* Recuperado el 10 de febrero de 2014, de <http://www.aritema.es/maquinaria.htm>
- Márquez D. A, & Z. (1994). *Control de autocalentamiento de carbón durante el apilamiento y el manejo de grandes volúmenes.* Universidad Nacional de Colombi. Medellin.
- Miban. (s.f). *El carbón. Paréntesis*, 26.
- Minera Catamutún S.A. (s.f). Recuperado el 1 de febrero de 2014, de Catatumutum: [http://www.catamutun.com/produccion/carbon/m\\_pro.html](http://www.catamutun.com/produccion/carbon/m_pro.html)
- Núñez, C. E. (s.f.). *En Relación a los Tamices Normalizados.* Recuperado el 16 de 02 de 2014, de [cenunez.com.ar](http://cenunez.com.ar)
- PDVSA-Intevep. (2001). *Código geológico de Venezuela.* Recuperado el 02 de septiembre de 2013, de [www.pdv.com/lexico/](http://www.pdv.com/lexico/)
- Pineda, E., & Rojas, E. (2004). *Sistema vibratorio para transporte y clasificación granular.* Bucaramanga.
- Rulmeca S.A. (2000). *Rodillos y estaciones para transporte de materiales a granel.* Industrias Rumelca, 63.
- Sabino C. (1992). *El Proceso de Investigación.* Caracas: Panapo.
- Salsamendi, L. y. (1977). *El carbón mineral.*

- Sistemas de cribado. (s.f). *Sistemas de cribado*. Recuperado el 15 de noviembre de 2013, de <http://www.sistemasdecribado.com/cribas.htm>
- Tamayo, M. y. (2003). *Metodología de la Investigación*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Tracsa. (2010). *Correas Transportadoras*. Recuperado el 26 de abril de 2014, de <http://www.tracsa.com.ar/Productos/correastransfunc06.html>)
- Tusa. (s.f). *Equipos complementarios: Mallas, castilletes, canales de recogida*. Recuperado el 20 de febrero de 2014, de [http://www.tusa.es/images/catalogos/tusa\\_cribas.pdf](http://www.tusa.es/images/catalogos/tusa_cribas.pdf)
- URBAR. (2010). *URBAR Ingenieros S.A*. Recuperado el 19 de diciembre de 2013, de [www.urbar.com](http://www.urbar.com)
- Walters, A. (s.f). Enciclopedia de salud y seguridad. En A. Walters, *Minas y Canteras* (págs. 28-30).
- Wills, B. (s.f). *Tecnología de procesamiento de minerales*. México: Limusa.
- World coal institute. (2005). El carbón como recurso. 2-8.

**ANEXO 1. Diagrama del sistema de clasificación granulométrico propuesto. Figura 49**



## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Abrasión:** Es la propiedad del carbón, que describe su propensión y capacidad para desgastar materiales.

**Amplitud:** Se entiende por amplitud, a la distancia que se desplaza el paño cada vez que el generador de movimiento causa una pulsación.

**Ángulo de reposo:** Pendiente máxima de una porción de terreno granular sin que se produzca un deslizamiento. También llamado ángulo de talud natural.

**Área libre de tamizado:** Cantidad porcentual de todas las aberturas de malla (luces) de una superficie, y se da en función del cuadrado de la luz de malla y de malla, redondeando el porcentaje sin decimales.

**Cama de cribado o lecho:** Se sabe que este factor también influye en la velocidad de cribado óptima, existiendo un espesor óptimo que garantiza la máxima rapidez de la operación y una elevada eficacia. El espesor óptimo influye de la siguiente manera: se favorece el fenómeno de estratificación de las partículas (cribas vibratorias), disminución de los rebotes sobre los hilos, aprovechamiento de la superficie de cribado y aumento de la capacidad de cribado.

**Capacidad básica o específica:** Se expresa en  $t/m^2.h$  de producto que pasa por una malla determinada.

**Carbón Cannel:** o carbón vela, es un tipo de carbón bituminoso Emite la materia orgánica volátil cuando se calienta, y es más bajo en carbono fijo que el carbón típico bituminoso.

**Carbón fijo:** Residuo que se quema a alta temperatura después que las sustancias volátiles han sido extraídas.

**Carbón tipo ROM:** Es el carbón directamente extraído del suelo.

**Cohesión:** Es la atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia. La cohesión es diferente de la adhesión; la cohesión es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo, mientras que la adhesión es la interacción entre las superficies de distintos cuerpos.

**Coquificación:** Utilizar el calor para descomponer hidrocarburos de alto peso molecular, provenientes de los residuos del petróleo, para obtener un material quebradizo y poroso de alto valor comercial, llamado coque de petróleo.

**CVM-DN:** Corporación Venezolana de Minería, S.A - División Níquel.

**d<sub>80</sub>:** indica el 80% de material que pasa en la malla o abertura que coincide con ese porcentaje.

**Deck:** Término que se utiliza para denominar el número de paños.

**Densidad aparente:** Relación entre la masa y el volumen que ocupa (incluyendo los huecos dentro y entre las partículas), para el apilamiento y transporte en cintas.

**Desclasificados:** Porcentaje o masa de partículas finas que no atraviesan la criba y se van con la fracción gruesa (rechazo).

**Dosificadores:** Un dosificador es un equipo que por lo general forma parte integral de una línea de producción. La función del dosificador es entregar o suministrar de forma ágil la cantidad de material o insumo necesario para la realización de un sistema.

**Elasticidad:** Es la propiedad de los cuerpos de recuperar su forma y estado iniciales, tras experimentar una deformación causada por una fuerza exterior, una vez que ésta cesa.

**Espesor de alambre:** Es el diámetro del alambre de la malla ?medido antes de tejer.

**Estratificación:** Es la propiedad que tienen las rocas sedimentarias de disponerse en capas o estratos, uno sobre otros en una secuencia vertical. Un estrato es un cuerpo tabular de roca sedimentaria, de composición esencialmente homogénea, limitado por sus superficies planas denominados planos de estratificación, que representan cambios en las condiciones de sedimentación.

**Factor de corrección:** Valor de la capacidad que se ajuste a nuestras condiciones de operación (distintas de las teóricas), dicha capacidad obtenida se la conoce con el nombre de capacidad corregida

**FENI:** Abreviación que se le da al ferroníquel dentro de la empresa Loma de Níquel.

**Frecuencia:** La frecuencia es el número de pulsaciones producidas por el generador de movimiento en un determinado lapso.

**Gravedad específica:** Es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad del agua. De la sustancia /Del agua La gravedad específica es adimensional y numéricamente coincide con la densidad. Gravedad Específica: La gravedad específica está definida como el peso unitario del material dividido por el peso unitario del agua destilada a 4 grados centígrados. Se representa la Gravedad Especifica por Gs, y también se puede calcular utilizando cualquier relación de peso de la sustancia a peso del agua siempre y cuando se consideren volúmenes iguales de material y agua.

**Harnero:** Es otra forma de llamar a una criba.

**Has:** Hectáreas.

**Humedad del carbón:** Es el contenido de agua presente en los carbones.

**Ignición:** Ocurre cuando el calor que emite una reacción llega a ser suficiente como para sostener la reacción química.

**Termografía:** Es un método de inspección de equipos eléctricos y mecánicos mediante la obtención de imágenes de su distribución de temperatura. Este método de inspección se basa en que la mayoría de los componentes de un sistema muestran un incremento de temperatura en mal funcionamiento.

**Impurezas minerales:** Determinadas como cenizas, o sea, residuo del material inerte que queda después que el carbón es completamente quemado.

**Km:** Kilómetro.

**LDN:** Loma de Níquel.

**Luz de malla:** Es el espacio que queda entre los distintos alambres que es el que da la medida de paso a la hora de realizar la clasificación.

**Malla:** Es la distancia de eje a eje de dos alambres contiguos o bien la suma de la luz de malla y un diámetro de alambre.

**Mesh:** El número de alambres o mallas medidas en una longitud de 25,4 mm se denomina mesh.

**Numero de alambres longitudinales:** Es la cantidad total de alambres contados sucesivamente en línea recta. Como unidad de medida se pueden tomar pulgadas o milímetros.

**Opacidad:** Grado de interferencia en la tramitación de la luz, a su paso a través de una emisión proveniente de una fuente fija o móvil.

**Pam:** El rechazo sale luego de viajar por toda la criba y el cernido cae al fondo del aparato conocido como pam y se recoge en el extremo opuesto empujado por un tornillo sinfín.

**Paño o malla:** Están formadas por un conjunto de alambres tejidos de forma que las aberturas que proporcionan son cuadradas o rectangulares.

**Peso específico:** A la relación entre el peso de una sustancia y su volumen.

**Poliuretano:** Es un polímero que se obtiene mediante condensación de bases hidroxílicas combinadas con isocianatos. Los poliuretanos se clasifican en dos grupos, definidos por su estructura química, diferenciados por su comportamiento frente a la temperatura.

**PPM:** Primer proceso de mineral.

**Punto o temperatura de ignición:**

**Rango:** Es el porcentaje (%) de poder calorífico del carbón mineral.

**Resistencia:** Es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones.

**Ripabilidad:** Representa una medida del grado de dificultad de la misma para ser excavada con equipos de convencionales; mediante la rotura del terreno con un tractor o bulldozer que permite su excavación o carga directa.

**ROM:** Por sus siglas en ingles run of mine.

**RPM:** Revoluciones por minuto.

**SI:** Sistema internacional.

**Sobretamaño o sobremedida:** Material retenido sobre la superficie del tamiz. Kelly

**Subtamaño o infratamaño:** Es el material que pasa por la tela del tamiz. Kelly

**Superficie de cribado:** Para determinar la superficie de cribado necesaria en una clasificación concreta, son absolutamente empíricos basados en experiencias de los fabricantes de cribas, por lo que deberán ser acertados cuanto mayor experiencia tenga dicho fabricante y por supuesto cuanto mayor sea su conocimiento sobre el tema.

**Sustancias volátiles:** Consiste en los gases y vapor de agua que expele la muestra a cierta temperatura.

**t:** toneladas.

**TGA:** Siglas en inglés de Análisis gravimétrico.

**TMS:** toneladas métricas secas.

**Valores empíricos:** Es aquel resultado inmediato de la experiencia, que solo se funda en la observación de los hechos.

**Vernier:** Instrumento de mediana precisión.

**Zaranda:** Término que se le da a las cribas giratorias.

# APÉNDICE A

TYLER ESTÁNDAR SCREEN 1910				US BUREAU OF STANDARDS A.S.T.M. E 11-87			INTERNACIONAL ISO 565 APERTURA mm	DIÁMETRO HILO mm
MESH		APERTURA		Pulgadas	APERTURA			
Básica	Secundaria	inches	mm		inches	mm		
				5	5,0000	127,0000	128.00	8,000
				4 1/4	4,2500	107,9500		6,400
				4	4,0000	101,6000	107.63	6,300
				3 1/2	3,5000	88,9000	90.51	6,080
				3	3,0000	76,2000	76.11	5,800
				2 1/2	2,5000	63,5000	64.00	5,500
				2 1/4	2,2500	57,1500	53.82	5,150
				2	2,0000	50,8000		5,050
				1 3/4	1,7500	44,4500	45.25	4,850
				1 1/2	1,5000	38,1000	38.05	4,590
				1 1/4	1,2500	31,7500	32.00	4,230
					1,0600	26,9240	36.91	3,900
				1	1,0000	25,4000		3,800
				7/8	0,8750	22,2250	22.63	3,500
				3/4	0,7500	19,0500	19.03	3,300
				5/8	0,6250	15,8750	16.00	3,000
					0,5300	13,4620	13.45	2,750
				1/2	0,5000	12,7000		2,670
				7/16	0,4375	11,1125	11.31	2,450
				3/8	0,3750	9,2500	9.51	2,270
				5/16	0,3125	7,9375	8.00	2,070
					0,2650	6,7310	6.73	1,870
				1/4	0,2500	6,3500	6.30	1,820
				MESH				
	2 1/2	0,3121	7,9284	2 1/2	0,3150	8,0000	8.00	2,070
<b>3</b>		0,2625	6,6669	3	0,2648	6,7272	6.73	1,870
	3 1/2	0,2207	5,6062	3 1/2	0,2227	5,6569	5.06	1,680
<b>4</b>		0,1856	4,7142	4	0,1873	4,7568	4.76	1,540
	5	0,1561	3,9642	5	0,1575	4,0000	4.00	1,370
<b>6</b>		0,1312	3,3335	6	0,1324	3,3636	3.36	1,230
	7	0,1104	2,6031	7	0,1114	2,8284	2.83	1,100
<b>8</b>		0,0928	2,3571	8	0,0936	2,3784	2.38	1,000
	9	0,0780	1,9821	10	0,0787	2,0000	2.00	0,900
<b>10</b>		0,0658	1,6687	12	0,0662	1,6818	1.68	0,810
	12	0,0552	1,4016	14	0,0557	1,4142	1.41	0,725
<b>14</b>		0,0464	1,1786	16	0,0468	1,1892	1.19	0,650
	16	0,0390	991	**16	0,0394	1000	1000	0,580
<b>20</b>		0,0328	833	20	0,0331	841	841	0,510
	24	0,0276	701	25	0,0278	707	707	0,450
<b>28</b>		0,0232	589	30	0,0234	595	595	0,390
	32	0,0195	496	35	0,0197	500	500	0,340
<b>35</b>		0,0164	417	40	0,0166	420	420	0,290
	42	0,0138	350	45	0,0139	354	354	0,247
<b>48</b>		0,0116	295	50	0,0117	297	297	0,215
	60	0,0098	248	60	0,0098	250	250	0,180
<b>65</b>		0,0082	208	70	0,0083	210	210	0,152
	80	0,0069	175	80	0,0070	177	177	0,131
<b>100</b>		0,0058	147	100	0,0059	149	149	0,110
	115	0,0049	124	120	0,0049	125	125	0,091
<b>150</b>		0,0041	104	140	0,0041	105	105	0,076
	170	0,0034	88	170	0,0035	88	88	0,064
<b>*200</b>		0,0029	74	200	0,0029	74	74	0,053
	250	0,0024	62	230	0,0025	63	63	0,044
<b>270</b>		0,0021	52	270	0,0021	53	53	0,037

Nota. Fuente: Fuego (1999). \*Tamiz básico 200 mallas. Relación básica 2<sup>0,5</sup> y secundaria 2<sup>0,25</sup>. \*\*Tamiz básico 18 mallas.

## APÉNDICE B

---

Capacidad específica (t/m<sup>3</sup>.h)

<b>Luz del hueco cuadrado en mm</b>	<b>1,68</b>	<b>2,38</b>	<b>2,94</b>	<b>3,36</b>	<b>4,76</b>	<b>6,68</b>	<b>9,42</b>	<b>13,33</b>	<b>15,85</b>	<b>18,85</b>	<b>22,43</b>	<b>26,64</b>	<b>32,0</b>	<b>38,1</b>	<b>50,8</b>	<b>64,0</b>	<b>76,1</b>
<b>Piedra natural</b>	4,5	5,7	6,9	7,3	9,0	10,8	14,0	16,8	19,4	21,6	23,6	25,6	29,0	32,0	37,0	40,5	43,0
<b>Piedra triturada</b>	3,7	4,7	5,6	5,9	7,5	8,8	11,9	14,0	16,0	18,0	19,6	21,2	24,0	26,8	31,0	33,8	36,0

Nota. Fuente: Fueyo (1999)

## APÉNDICE C

---

En función de la cantidad de rechazo

<b>Rechazo en %</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>92</b>	<b>94</b>	<b>96</b>	<b>98</b>	<b>100</b>
<b>Factor B</b>	1,05	1,01	0,98	0,95	0,90	0,86	0,80	0,70	0,64	0,55	0,50	0,44	0,35	0,20	0,00

**Nota.** Fuente: Fueyo (1999)

