

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS OPERACIONALES DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CRIBA HIDRÁULICA (JIG) A ESCALA DE LABORATORIO MEDIANTE UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Peña Z. César A.
Para optar al Título
de Ingeniero de Minas

Caracas noviembre, 2019

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS OPERACIONALES DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CRIBA HIDRÁULICA (JIG) A ESCALA DE LABORATORIO MEDIANTE UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Katherine Silva

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Carlos Utches

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Peña Z. César A.
Para optar al Título
de Ingeniero de Minas

Caracas noviembre , 2019

Caracas, noviembre, 2019

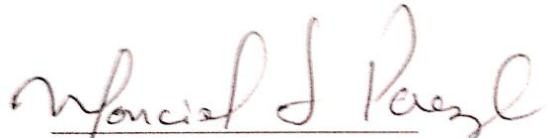
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería (especialidad), para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller César Augusto Peña Zapata, titulado:

“Evaluación de los parámetros óptimos operaciones de funcionamiento de una criba hidráulica (JIG) a escala de laboratorio mediante una herramienta estadística”

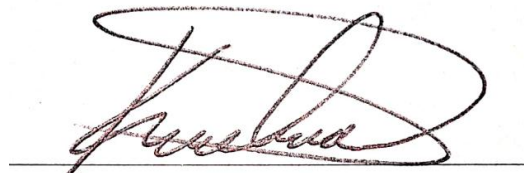
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Profesor Luis Araya.
Jurado.



Profesor Marcial Pérez.
Jurado.



Profesora. Katherine Silva
Jurado (Tutora Académica).

DEDICATORIA

Este trabajo especial de grado, está dedicado a:

A mis padres, Marta y Baltazar, que me apoyaron desde el inicio de mi carrera profesional.

A mis hermanos Manuel y Diego, ya que me aconsejaron, me enseñaron y me dieron aliento para terminar mi carrera.

A Dios, por darme salud y sabiduría para alcanzar otra meta importante en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Las siguientes líneas expresan mi total agradecimientos a:

A la Universidad Central de Venezuela, especialmente a la escuela de Geología, Minas y Geofísica por brindarme los espacios de estudios y esparcimientos.

A los profesores del Departamento de Geología, Minas y Geofísica, gracias por su dedicación y entrega en esta labor tan importante para el país.

A mi tutora Katherine Silva, por dedicación, paciencia y apoyo incondicional que me brindo.

Al tutor industrial, ingeniero Carlos Utches, quien me brindó su apoyo, logística e ideas para abordar este presente trabajo especial de grado, al igual que la profesora María Valeska Vivas, quien me ayudo abordar este presente trabajo desde la parte metodológica.

Al profesor Lenín González, por el apoyo prestado en la realización de ensayos de DRX.

Al profesor Marcial Pérez y a la Escuela Ingeniería de Metalúrgica y Ciencias de los Materiales, por darme acceso a sus laboratorios y sus espacios mientras estaba desarrollando este trabajo especial de grado.

A los técnicos Carlos Zapata, Romulo Millano y Rumualdo Cuello, quienes me brindando su espacio y herramientas para desarrollar este presente trabajo.

Al profesor José Gregorio Hernández, que también me prestó su apoyo en los últimos días para culminar este trabajo especial de grado.

A los compañeros Alexandra Tovar y José Daniel Marañón, por la ayuda prestada durante el trabajo especial de grado.

A los compañeros Gabriela Bolívar, Abraham Fernández, Robert Aguirre, Nigel Puerta, quienes fueron los primeros amigos y futuros colegas que conocí al inicio de mi carrera, gracias por su apoyo incondicional y sabiduría que me ayudaron a sortear los primeros obstáculos.

A mis amigos de la carrera, Andreina Ramírez, Hemily Ascanio, Bárbara Berroteran, María Fernanda Hernández, Idalys Ester, David Solórzano, David Puerta, Oscar Mistage, Robert Expósito, Franklim Nieto, quienes los conocí al formar parte del Departamento de Minas al igual Andreina Oberto, Gladys Medina, Bianca Sulbaran, Katheanny Lárez compañeras del Departamento de Geología.

Peña Z César A.

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS OPERACIONALES DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CRIBA HIDRÁULICA (JIG) A ESCALA DE LABORATORIO MEDIANTE UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA

Tutor académico: Prof. Katherine Silva. Tesis Caracas U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2019
Tutor Industrial: Ingeniero Carlos Utches. Trabajo especial de grado Caracas U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2019

Palabras claves: Separación gravimétrica, Criba hidráulica- Diseño experimental

El Laboratorio de Beneficio Mineral adscrito al Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, actualmente tiene una batería de equipos de separación gravimétrica entre los que destaca la criba hidráulica (JIG), marca Denver. Este trabajo de investigación se planteó como objetivo general evaluar los parámetros óptimos operacionales de funcionamiento del JIG a escala de laboratorio mediante herramientas estadísticas. Para abordar dicho objetivo, se realizaron corridas en frío con material de polímero esférico con diferentes densidades, también se calibró con mezclas de casiterita y calcita. El desarrollo de la investigación, inició con la revisión bibliográfica de los parámetros operacionales y valores utilizados normalmente. Mediante estos parámetros se fijaron los factores y niveles a estudiar mediante el diseño experimental central compuesto 3^3 , con una mezcla de casiterita (6,25 %) y el resto de calcita, con un criterio de concentración de 3,70. Los parámetros a estudiar fueron tiempo de ciclo (TC), caudal de la cámara (CC), granulometría de alimentación (GA) a diferentes niveles. Dando como resultado que los mejores tratamientos fueron las condiciones de 5 min de TC, 22 l/min de CC y GA (+1,4 -1,70) mm para una recuperación (R) de 96,5 %. Por otra parte, la otra condición que arrojó la mejor razón de enriquecimiento (RE= 15,5), es de 5 min de TC, 22 l/min y GA de (+2 - 3,36) mm. La herramienta estadística demostró que, de los factores estudiados, la granulometría de alimentación presentó la mayor significancia estadística durante la medición de las variables dependiente. La optimización del proceso, mediante el método gráfico reportó que, para 3 min, 16 l/min y un tamaño de partícula de 1,7 mm, fue la condición óptima estadística, reportando una recuperación de 88,4 % y una razón de enriquecimiento de 13.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1.- Planteamiento del problema.....	3
1.2.- Objetivos de la investigación.....	4
1.2.1.- Objetivo general.....	4
1.2.2.- Objetivos específicos	4
1.3.- Justificación.....	4
1.4.- Alcance y limitaciones.....	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1.-Bases Teóricas	6
2.1.2.-Concentración de minerales	6
2.1.3.- Separación gravimétrica	6
2.2.- Esquema de funcionamiento de una criba hidráulicas (JIG).....	17
2.2.1.- Factores que afectan en la separación gravimétrica.....	18
2.3.- Índices Metalúrgicos	20
2.4.- Estadísticas en la concentración gravimétrica de minerales.....	22
CAPÍTULO III	34
MARCO METODOLOGÍCO	34
3.1.- Tipo de investigación.....	34
3.2.- Diseño de la investigación.....	34
3.3.- Unidad de análisis.....	34
3.4.-Metodología de trabajo.....	35
3.4.1- Diagnostico del equipo.....	36
3.4.2-Diseño experimental	37
3.4.3- Análisis e interpretación de los datos.....	39
3.4.4- Ensayos de concentración	39
CAPITULO IV	42
ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
4.1 Identificación de los parámetros operaciones de la criba hidráulica	42
4.1.2- Ensayos exploratorios	44
4.2- Diseño experimental con Metodología de superficie de respuesta.....	45
4.3- Porcentaje de recuperación y de la razón de concentración	47

4.4-Optimización de las variables con mayor grado de incidencia en el proceso de concentración con respecto a las variables de respuestas	58
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla n° 1. Criterio de separación vs tamaño de separación Gupta <i>et al</i> (2006).	8
Tabla n° 2. Ley de Stoke y ley de Newton.	13
Tabla n° 3. Efecto sobre la separación e intervalos operativos. Gupta <i>et al</i> (2006).	19
Tabla n° 4. Parámetros involucrados en la separación gravimétrica consultados en la bibliografía.....	43
Tabla n° 5. ANOVA de ensayos exploratorios.	45
Tabla n° 6. Diseño de la matriz con los factores a estudiar con sus respectivos niveles.....	46
Tabla n° 7. Pesos reportados por cada tratamiento establecido por el diseño de la matriz experimental, utilizando fondo de granza.	47
Tabla n° 8. Porcentaje de recuperación y razón de enriquecimiento, utilizando fondo de granza.....	48
Tabla n° 9. ANOVA superficie de respuesta y gráficos de contornos para %R.....	53
Tabla n° 10. ANOVA. superficie de respuesta y gráficos de contornos para RE.....	55
Tabla n° 13. Nuevo ANOVA superficie de respuesta y gráficos de contornos para %R.	56
Tabla n° 14. Nuevo ANOVA para la variable de Respuesta RE.	58
Tabla n° 15. Valores de las variables de respuestas con los factores estudiados optimizados.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura n° 1. Criterio de concentración CC a diferentes diámetros de partículas Bustamante <i>et al.</i> (2008).	8
Figura n° 2 Criterio de concentración CC a diferentes diámetros de partículas Bustamante <i>et al.</i> (2008).	9
Figura n° 3. Morfología de la partículas Cho <i>et al.</i> (2007).	11
Figura n° 4. Estratificación mediante corrientes verticales de pulsaciones. Gupta <i>et al.</i> (2006).	12
Figura n° 5 . Velocidad del fluido a través del lecho mineral durante el ciclo de la pulsadora . Wills (1988).	16
Figura n° 6 . a) Sección transversal de un jig tipo industrial. Gupta <i>et al.</i> (2006). b) Sección transversal de un jig a escala de laboratorio. Ospina M (2014).	18
Figura n° 7. Gráfico de contorno. Gutierrez y De La Vera (2008).	24
Figura n° 8. Superficies de respuestas Gutierrez y De La Vera (2008). ..	25
Figura n° 9. Método gráfico para la optimización de de dos variables de respuesta. Gutierrez y De La Vera (2008).	26
Figura n° 10. a) Gráfico de Pareto. b) Gráfico de Daniel. Gutierrez y De La Vera (2008).	27
Figura n° 11 SM. a) Efecto del caudal (Ca) y altura del lecho(Al) sobre el porcentaje de recuperación (%R). b) Efecto Ca y Al sobre el % de cenizas. c) Efecto de Al y tiempo de ciclo(Tc) sobre %R. d) Efecto del Al y Tc sobre % R. e) grafico de contorno Tc y (Ca) sobre %R. f) grafico de contorno efecto (Tc) y Ca sobre el % de cenizas. Kumar <i>et al.</i> (2015). ...	30
Figura n° 12. Esquema de la metodología de trabajo.	36
Figura n° 13. Fotografía de criba hidráulica JIG marca Denver a escala de laboratorio ubicada en el laboratorio de beneficio mineral GMG-FI-UCV.	36
Figura n° 14. Esquema de proceso de separación por corrientes ascendentes pulsatorias.	37
Figura n° 15. Esquema para el cálculo del % recuperación y razón de concentración.	38
Figura n° 17 . Gráfico de contorno y de superficie para la variable de respuesta %R. a) Gráfico de contorno Caudal de la cámara(l /min) vs tiempo de ciclo(min). b) Superficie de respuesta. Caudal de la cámara(l/min) vs tiempo de ciclo(min). c) Granulometría de alimentación(mm) vs CC(l/min). d) SR. GA(mm) vs TC(min). e) GC. TC(min) vs GA(mm). f) SR. TC(min) vs GA(mm).	52
Figura n° 18. Gráfico de contorno y de superficie para la variable de respuesta RE. a) Gráfico de contorno. Caudal de la cámara(l/min) vs tiempo de ciclo(min). b) Superficie de respuesta. Caudal de la cámara(l/min) vs tiempo de ciclo (min). c) GC (mm) vs tc(min). d) SR. GA(mm) vs TC(min). e) GC CC (l/min). f) SR CC (l/min) vs GA(mm).	54

Figura n° 19 . Análisis estadístico. a) Gráfico de Daniel para la respuesta %R. b) Gráfico de Pareto para la respuesta %R con un α 0,05 para ambas gráficas.	56
Figura n° 20. Análisis estadístico. a) Gráfico de Daniel para la respuesta RE. b) Gráfico de Pareto para la respuesta RE con un α 0,05 para ambas gráficas.	57
Figura n° 21. Interfaz del software estadístico para optimizar la variable de respuesta %R y RE caudal da la cámara (l/min) vs granulometría de alimentación(mm).	58
Figura n° 22 .a) Gráfica de probabilidad normal vs residuos para %R. b) Gráfica de probabilidad normal vs residuos para RE.	61
Figura n° 23. a) Gráfica de residuos vs valor ajustado para %R. b) Gráfica de residuos vs valor ajustado para RE.	61
Figura n° 24 .a) Gráfica de residuos vs orden de observación para %R. b) Gráfica de residuos vs orden de observación para RE.	62

INTRODUCCIÓN

El concepto de concentración gravitacional, se define, como la separación de dos (2) o más especies de diferente peso específico (diferente densidad), causada por el movimiento relativo bien sea en un medio acuoso o en aire debido a la respuesta de los sólidos a las fuerzas: gravitacionales, de arrastre y empuje. En este tipo de separación intervienen la forma y densidad de las partículas, ya que las más densas y redondeadas, se van a separar de forma más rápida, que las ligeras, poco densas y planas. La separación gravimétrica emplea diferentes equipos, técnicas y métodos para lograr la clasificación del mineral útil. Uno de los equipos que se destina para este fin son las cribas hidráulicas (JIG) que utiliza el método de corrientes verticales a través de pulsaciones.

En los procesos mineros-metalúrgicos de recuperación de minerales, específicamente para minerales pesados, tanto vetas como material aluvional, el uso de los JIG sigue siendo eficiente frente a otros métodos de separación. Debido a su operatividad y alta calidad del producto, además, este método permite retirar del circuito de la planta aquellos minerales considerados como ganga y la materia orgánica; los cuales generan costo por su manejo, por ende, es pertinente el uso de estos equipos en los procesos de extracción de minerales. Bustamante *et al.* (2008).

Este proyecto tiene por objetivo evaluar los parámetros óptimos operacionales de funcionamiento de una criba hidráulica (JIG) a escala de laboratorio mediante una herramienta estadística. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Beneficio Mineral del Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Dicha evaluación de los parámetros permitirá definir las condiciones del equipo, así como determinar los rangos operativos que mejor se adapten al proceso de clasificación.

En virtud del objetivo general de este trabajo especial de grado, se planteó, llevar a cabo la determinación de los parámetros operacionales

de la criba hidráulica, de acuerdo con la revisión bibliográfica especializada, donde se especifican aquellos parámetros que se pueden variar y los que deben permanecer constantes. Luego se estableció el diseño experimental con los parámetros a modificar, con la finalidad de analizar el comportamiento del porcentaje de recuperación del material de interés y razón de enriquecimiento en función de las variables que lo afectan. Por último, se optimizaron los factores con mayor grado de incidencia mediante el uso de herramientas estadísticas, específicamente el gráfico de Daniel y el diagrama de Pareto. Con el objeto de establecer la interacción o correlación de las variables involucradas dentro del proceso de concentración de minerales, utilizando el método de separación por corrientes ascendentes pulsatorias.

La estructura de este trabajo especial de grado está definida por los siguientes puntos: En el capítulo I, se muestran las generalidades de la investigación que definen el problema, su justificación y objetivos a desarrollar. Seguidamente, en el capítulo II se presenta el marco teórico. El capítulo III se describe el tipo y diseño de investigación, objeto de estudio y metodología de trabajo. Por su parte el capítulo IV consta del análisis de los resultados. Para finalizar con las conclusiones, recomendaciones y fuentes bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.- Planteamiento del problema

Los especialistas indican que la concentración gravimétrica, es uno de los métodos más utilizados en el beneficio de minerales, por su facilidad de operación, bajo costo de mantenimiento, poco o ningún uso de reactivos químicos, diversidad de equipos e importantes porcentajes de recuperación del material de interés.

Entre los métodos que se destacan de la separación gravimétrica, se encuentra, la separación por medios densos dinámica y estática, la separación por vibración y la separación por pulsaciones.

Dado que las técnicas de separación por pulsaciones pueden ser utilizadas en: Minería aluvial de oro, extracción de diamantes, recuperación de metales pesados y en menas carboníferas; se presenta la necesidad de investigar el campo de aplicación de los equipos de separación por pulsación específicamente en la minería de minerales pesados en el país.

En tal sentido, se planteó la siguiente interrogante. ¿Será posible evaluar las condiciones de operación del equipo? Con el objetivo de conocer el rendimiento de la operación a través del porcentaje de recuperación y la razón de enriquecimiento, en función del criterio de separación y el tenor de minerales pesados, estudiando las variables, tales como: La apertura de la malla, la altura del lecho, la amplitud del pistón, frecuencia, tiempo de ciclo.

Actualmente, el Laboratorio de Beneficio Mineral de la Facultad de Ingeniería de la UCV, cuenta con varios equipos de concentración gravimétrica a escala laboratorio. Entre ellos se destaca una criba hidráulica (JIG) marca Denver, que fue recientemente rehabilitado, el cual emplea la técnica de separación por pulsaciones, dicho equipo puede dar respuestas desde el punto de vista académico a inquietudes sobre el beneficio de minerales pesados.

1.2.- Objetivos de la investigación

1.2.1.- Objetivo general

Evaluar los parámetros óptimos operacionales de funcionamiento de una criba hidráulica (JIG) a escala de laboratorio mediante una herramienta estadística.

1.2.2.- Objetivos específicos

1. Identificar los parámetros operacionales de la criba hidráulica de acuerdo con la revisión bibliográfica especializada, tanto los que pueden variar y los que deben permanecer constantes.
2. Establecer el diseño experimental con los parámetros a modificar aplicando una herramienta estadística.
3. Realizar el análisis estadístico del comportamiento del porcentaje de recuperación del material de interés y razón de enriquecimiento, en función de los parámetros que la afectan la concentración.
4. Optimizar las variables con mayor grado de incidencia en el proceso de concentración, en los intervalos probados para el rendimiento de concentración y el porcentaje de minerales pesados.

1.3.- Justificación

El desarrollo del presente trabajo especial de grado, pretende ampliar la línea de investigación en el área de concentración gravimétrica del Laboratorio de Beneficio Mineral de la UCV. Con dicho equipo activo, es posible desarrollar más trabajos de investigación variando parámetros intrínsecos de mineral y los parámetros operativos del equipo, para dar respuesta a proyectos en el beneficio de minerales pesados a nivel nacional, debido a que el país apunta a la extracción y procesamiento de minerales pesados en la región sur del país, específicamente en el desarrollo del arco minero del Orinoco.

1.4.- Alcance y limitaciones

Este estudio, se ve limitado al diseño del equipo, debido a que no se pueden modificar los siguientes parámetros operacionales: amplitud, frecuencia y revoluciones por minutos, estos parámetros serán considerados como constantes en la investigación.

Mediante el modelo experimental de superficie de respuesta se busca optimizar las variables que se pueden modificar, las cuales son: porcentaje de mezcla, factor de forma, granulometría, fondo de granza, apertura de malla, caudal del fluido de la cámara, altura del lecho y mediante el diseño de experimento, se plantea seleccionar 3 parámetros operacionales para ubicar estadísticamente el valor que permita optimizar el proceso de concentración gravimétrica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentarán varios conceptos que esta relacionados con la presente investigación.

2.1.-Bases Teóricas

2.1.2.-Concentración de minerales

Bustamante (2008), definió la concentración de minerales como la operación en la cual se eleva el tenor o concentración (en porcentaje) de una mena o mineral determinado, mediante el uso de equipos de separación sólido-sólido, produciéndose así la segregación de dos (2) o más especies mineralógicas y una corriente enriquecida en un mineral de interés. Para lograr la separación, se utilizan métodos que emplean propiedades físicas o volumétricas de los minerales. El grupo de tecnologías que asocia a estos métodos se caracterizan por ser fuertemente dependientes del tamaño de partícula y las propiedades diferenciales que generan la separación, una de estas propiedades son la diferencia de velocidad de sedimentación, a través de la diferencia de densidad de los sólidos (concentración gravimétrica o separación gravimétrica).

2.1.3.- Separación gravimétrica

Gupta *et al.* (2006), aseveró que la separación por diferencia de densidad es uno de los procesos más antiguos. La separación gravimétrica data al menos unos 3000 años antes de cristo, según escritos egipcios. El principal uso de la separación gravimétrica se remonta en el tiempo de la formación y erosión de las rocas y la liberación de los minerales, el transporte de estos por fuentes de agua, haciendo que se formen depósitos aluvionales de metales y gemas estratificadas, que al paso del tiempo fue más estudiado y tecnificado, especificando que el intervalo óptimo en cuanto a tamaño de partículas va desde un poco más de los 2 mm hasta las 70 μm .

Según Wills (1988), los métodos de separación por gravedad se usan para tratar una gran variedad de materiales, que van desde los sulfuros metálicos pesados como galena hasta el carbón, en algunos casos con tamaños de partícula menores de 5 µm. Este método utiliza la diferencia de densidades relativa en un fluido. El movimiento de las partículas responde a la gravedad y fuerzas hidrodinámicas.

Kelly (1990), propone, que en general, las impulsadoras (criba hidráulica) son más adecuadas para tratar tamaños de partículas relativamente grandes, comprendidas en el intervalo de 0,5 a 200 mm.

No todas las combinaciones de minerales son susceptibles a este tipo de técnica de separación. Gupta *et al* (2006), sugiere calcular el criterio de concentración para saber si es factible realizar la separación de los minerales en un medio denso, la cual se va a explicar en el inciso próximo a este párrafo.

- **Criterio de concentración (CC)**

Taggart (1966), define el criterio de concentración como la relación entre densidades de dos (2) minerales en particular y dicha relación establece si la separación será posible en un fluido. Además, Wills (1988) simplifica el concepto anterior mediante la ecuación (1) y considera que, para una separación efectiva, es indispensable que exista una marcada diferencia de densidad entre el mineral y la ganga. A partir del **criterio de concentración (CC)**, se tendrá idea sobre el tipo de separación posible, a continuación, se presenta la ecuación de criterio de concentración.

$$cc = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} \quad (ec\ 1)$$

Donde

D_h = densidad absoluta del mineral pesado

D_l = densidad absoluta del mineral ligero

D_f = densidad absoluta del medio fluido

En la Figura n° 1 Bustamante *et al.* (2008), reportaron diferentes criterios de concentración de minerales con distintas granulometrías, donde se aprecian los intervalos en los cuales es posible realizar la separación gravimétrica.

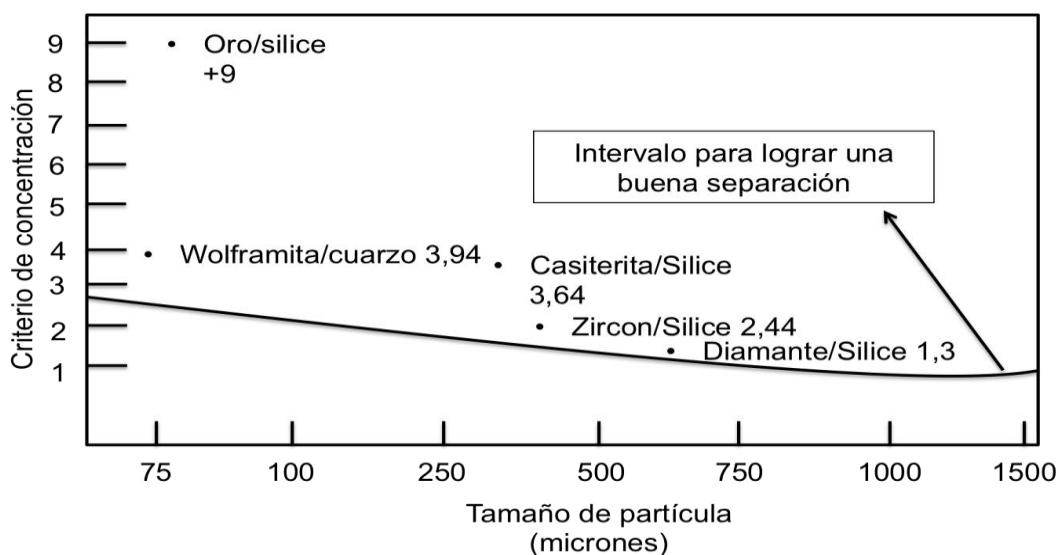


Figura n° 1. Criterio de concentración CC a diferentes diámetros de partículas Bustamante *et al.* (2008).

La Tabla n° 1, Gupta *et al.* (2003), indica varios valores de criterios de concentración a diferentes tamaños de partículas.

Tabla n° 1. Criterio de separación vs tamaño de separación Gupta *et al.* (2006).

Criterio de concentración	Tamaños de Separación
$cc > 2,5$	Pasante 75 μ m, malla n° 200 (0,075mm)
$1,75 < cc < 2,5$	Pasante 150 μ m, malla n° 100 (0,15mm)
$1,5 < cc < 1,75$	Pasante 1,7mm Malla n° 10
$1,25 < cc < 1,5$	Pasante 6,35mm
$cc < 1,25$	No es factible

Además del criterio de concentración, Bustamante *et al.* (2008) y Wills (1988), consideraron la liberación de partículas, morfología y granulometría de alimentación, como parámetros importantes en la concentración gravimétrica.

Influencia de la Liberación de partículas

Wills (1988). La liberación de partículas, se define, como el desprendimiento de los minerales valiosos para separarlos de los minerales de ganga asociados con el tamaño de partícula más grueso posible. Si se logra dicho propósito se ahorra energía por la reducción de la cantidad de finos que se producen, sino que cualquier etapa de separación subsecuente se facilita, resultando más económica la operación y más eficiente.

Bustamante *et al.* (2008) plantea que la forma de asociación de las partículas de interés con la ganga. Figura nº 2, se define una exitosa liberación, lo cual va a estar asociado a su hábito.

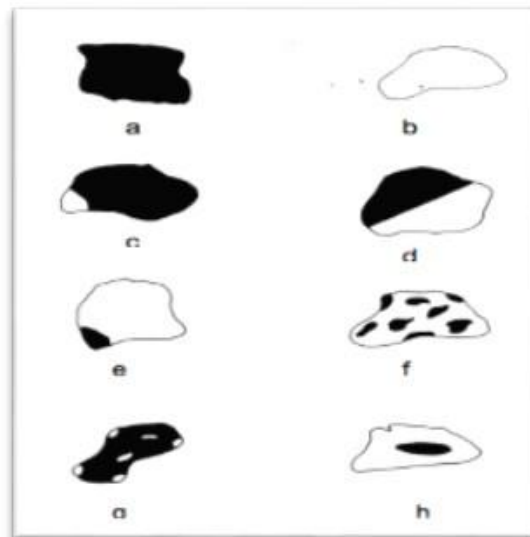


Figura nº 2 Criterio de concentración CC a diferentes diámetros de partículas Bustamante *et al.* (2008).

Influencia de la granulometría de alimentación y morfología

Wills (1988), sugiere que altas proporciones de arena fina y lamas interfieren en el funcionamiento, por lo que el contenido de finos se controla para proporcionar óptimas condiciones de lecho, debido a que las

partículas de forma laminar se comportan hidrodinámicamente diferente a partículas de forma esférica, aunque sean de igual densidad.

Pita (2015), recomienda que, en el caso de partículas con formas más regulares, la calidad de la separación de las mezclas de plástico de dos componentes mejoró con el aumento del tamaño de partícula. Para las partículas laminares, la influencia del tamaño de partícula es mínima. En general, el beneficio de plásticos con densidades similares no es efectivo. Sin embargo, las mezclas de plástico de dos componentes que unen un plástico de forma laminar de baja densidad con uno de alta densidad de forma esférica, la separación fue mejorada significativamente.

El CC está considerado como valor de referencia, algunos investigadores como Gupta *et al.* (2003), establecen que este criterio está influenciado por otro factor, como la forma de las partículas. Por otro lado, la morfología de la partícula se puede ser influenciada por un factor de forma definido como la relación de velocidad de asentamiento para los minerales pesados y ligeros. El factor de velocidad de asentamiento, es la relación de la velocidad terminal de dos partículas de la misma densidad, mismo tamaño pero diferente morfología. La ecuación 2 expresa la velocidad terminal en función de la morfología.

$$FV_m = \frac{vm(\text{partícula})}{vm(\text{partícula esférica})} \quad (\text{ec } 2)$$

Donde

Fvm= factor de velocidad terminal

Vm (partícula) = velocidad terminal de una partícula

Vm (partícula esférica) = velocidad terminal de una partícula esférica

En la Figura nº 3 se observan las diferentes morfologías propuestas por Cho *et al.* (2017), que son posibles manipular al realizar la separación. De izquierda a derecha, se aprecia que la redondez va aumentando y a

su vez incrementa la respuesta hidrodinámica de las partículas durante el proceso de separación.

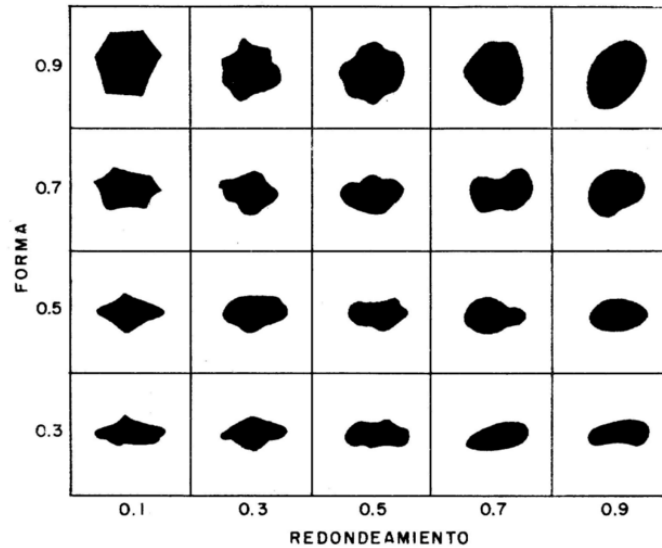


Figura n° 3. Morfología de la partícula Cho *et al.* (2007).

- **Separación en corrientes verticales a través de pulsaciones**

A pesar de que en estos métodos también están presentes las fuerzas de separación de corrientes longitudinales, los efectos causados por las corrientes verticales les confieren características propias y por eso son estudiados en forma separada. El JIG, es un equipo que utiliza corrientes verticales para la concentración de minerales, donde las corrientes verticales son generadas por el movimiento de pulsaciones en el agua.

Will (1988), menciona que el pulsado es uno de los métodos más viejos de concentración gravimétrica. En las pulsadoras, la separación de minerales de diferente densidad relativa se efectúa dentro de una capa o lecho de mineral que se vuelve fluida por la corriente generada por el flujo de agua para producir una estratificación. La separación de minerales de diferente densidad relativa, según, Wills (1988), se efectúa dentro de una cama o lecho fluidizado de mineral que por medio de una corriente pulsatoria, o corriente vertical ascendente de agua, produce una estratificación. El objetivo es extender la capa de material o mineral que

se está tratando y controlar su dilatación de manera que las partículas más pesadas y pequeñas penetren los intersticios de la capa y, las partículas más grandes de alta densidad relativa, caigan bajo una condición probablemente similar a la del asentamiento obstruido. Además, Gupta *et al.* (2006) sugiere que partículas más pesadas, requieren un tiempo para adquirir la velocidad de sedimentación más rápida que partículas menos densas.

Bustamante *et al.* (2008) propone que el movimiento en pulsos, implica estratificación, de lechos de partículas en un plano vertical. El fluido puede ser agua o aire; lo cual origina JIG hidráulicos o JIG neumáticos. Aunque en algunos casos el lecho se mueve respecto al fluido, en muchos casos es el fluido el que se mueve con respecto al lecho como se muestra en la Figura nº 4 .

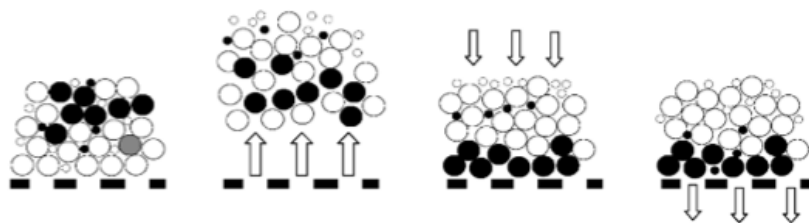


Figura nº 4. Estratificación mediante corrientes verticales de pulsaciones. Gupta *et al.* (2006).

En general las partículas yacen sobre una malla. Además expone que de diferentes maneras el fluido se encausa de tal forma que se mueva cíclicamente fluyendo a través del lecho, dilatándose y contrayéndose a medida que el flujo sube y baja respectivamente, con pulsaciones que oscilan entre frecuencias de 100-300 ciclos/min.

- **Mecánica de fluidos en la separación gravimétrica**

Fueyo (1999), expresa que, en la sedimentación, las partículas son arrastradas por la corriente hidráulica. Cuando ésta recorre en toda la longitud el recipiente de clasificación, se produce una clasificación por corriente horizontal, o también llamada corriente de superficie. Cuando la

corriente es dirigida de abajo hacia arriba para desbordada por la parte superior, la clasificación recibe el nombre de corriente vertical ascendente. Por último, en el caso de emplear corrientes de torbellinos, se trata de hacer una sedimentación acelerada y recibe el nombre de clasificación centrífuga o ciclónica. Por otra parte, dicho autor, formula que la velocidad de sedimentación o velocidad constante máxima, mide la rapidez con la cual cae una partícula a través de la pulpa. Esta velocidad alcanza rápidamente un valor límite que es función de la resistencia al movimiento opuesto por el medio acuoso. Finalmente, una partícula que se posa en un fluido bajo la influencia de la gravedad, experimenta una resistencia y alcanza una velocidad final de sedimentación, cuando la resistencia se hace igual al peso efectivo de la partícula.

Wills(1988), Kelly(1990), Fueyo(1999) y Bustamante *et al* .(2008), siguieron investigando sobre el movimiento de las partículas inversas en fluidos, a partir de estos estudios, se consideraciones la ley de Stokes y Newton. Ver Tabla nº 2.

Tabla nº 2. Ley de Stoke y ley de Newton.

Ecuación	
Ley de Stoke (ec 3)	$V_{ms} = \left(\frac{4\pi}{3k}\right) (\delta s - \delta f)(g) \left(\frac{d^2}{\mu}\right)$
Ley de Newton (ec 4)	$V_{mn} = \left(\frac{4\pi}{3k}\right) (\delta s - \delta f) \left(\left(\frac{d}{\delta f}\right)^{0,5}\right)$

Donde para la ecuación 3 y 4, se tienen los siguientes parámetros.

V_{ms} = Velocidad terminar para ley de Stokes (cm/seg)

V_{mn} = Velocidad terminar para ley de Newton (cm/seg)

μ = es la viscosidad del fluido (gr/ ((cm)(seg))

δs = densidad del solido (gr/cm³)

δf = densidad del fluido (gr/cm³)

g = aceleración de la gravedad (cm/seg)

d = el radio de la esfera (cm)

- **Mecanismo que afectan la estratificación**

Tanto Wills (1988), Kelly (1990), Fueyo (1999) y Bustamante *et al.* (2008), proponen 3 mecanismo principales que controlan la estratificación:

a) Aceleración diferencial al inicio de la caída: durante el ciclo de ascenso del pulso de JIG, el lecho se dilata y las partículas se levantan disminuyendo su velocidad hasta lograr alcanzar su máxima altura en un instante en que la velocidad es cero. Posteriormente, el lecho de partículas comienza a caer y justo al inicio de la caída, las aceleraciones son independiente del tamaño de la partícula. Tomando en cuenta la ecuación (7).

$$\sum F = F_{caída} = F_{peso} - F_{empuje} - F_{arrastre} \quad (ec\ 5)$$

$$(mp)(ap) = (mpg) - (mfg) - F_{arrastre} \quad (ec\ 6)$$

Donde

F = sumatoria de fuerza

mp = masa del sólido (g)

ap = aceleración del sólido (m/seg²)

g = aceleración de la gravedad (m/seg²)

mf = masa del fluido

Se considera que $a_p = dv/dt$ y se reemplaza en la ecuación (6), y asumiendo que la fuerza de arrastre es cero, se tiene:

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{1 - mf}{mp} \right) g \quad (ec\ 7)$$

Donde

m_f = masa del fluido (g)

m_p = masa de la particular (g)

se tiene que $\rho = m/v$, se sustituye en la ecuación (7), y queda en función de las densidades del sólido y del líquido.

$$\frac{dv}{dt} = 1 - \left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right) \quad (\text{ec } 8)$$

Donde

ρ_f = densidad del fluido (gr/cm^3)

ρ_s = densidad del sólido (gr/cm^3)

b) Sedimentación obstaculizada o asentamiento obstaculizado: la sedimentación de partículas depende de la forma, densidad y tamaño, para partículas gruesas ($> 2 \text{ mm}$), este tipo de mecanismo, obedece la ley de Newton (ec 4), mientras que para partículas finas ($< 0,04 \text{ mm}$), está sujeto a la ley de Stokes (ec 3).

c) Ecurrimiento intersticial: dado que las partículas de diferente tamaño y/o densidad, no recorren distancias iguales durante un período de sedimentación determinado, ellas pueden detenerse en diferentes instantes.

Lo anterior implica que las partículas gruesas permanecen en suspensión por un período mucho más corto de tiempo que las partículas finas. Como resultado de esto, las partículas gruesas se empaquetan, mientras que las partículas finas pueden escurrir a través de los intersticios de las partículas grandes.

Este efecto se denomina escurrimiento o percolación intersticial. Obviamente la sedimentación de los finos no es tan rápida durante el escurrimiento con respecto a las otras fases del ciclo, pero si esta fase

puede hacerse tan larga como sea posible, el efecto puede llegar a ser significativo durante la concentración.

El tamaño de partícula que escurre intersticialmente, va a depender de la compactación en la succión del lecho.

- **Ciclo de una pulsadora (criba hidráulica) o JIG**

Según Wills (1988), Bustamente *et al.* (2008), en las pulsadoras (criba hidráulica) se da un proceso de pulsado idealizado, donde las corrientes pulsatorias de agua son causadas por un pistón que tiene un movimiento en forma de onda armónica, y se describe en la Figura n° 5.

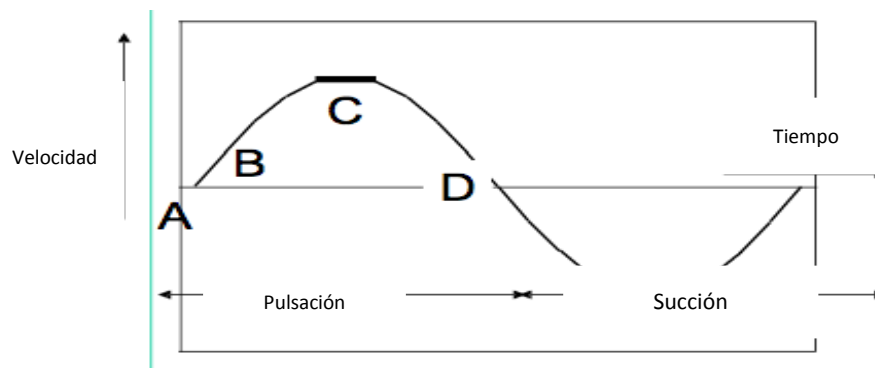


Figura n° 5 . Velocidad del fluido a través del lecho mineral durante el ciclo de la pulsadora . Wills (1988).

- a) En el comienzo del ciclo, la velocidad del flujo hacia arriba aumenta después del punto A hasta B. A medida que aumenta la velocidad los granos se sueltan y la cama(lecho) será forzada a abrirse o dilatarse.
- b) En el punto C, los granos están en la fase de asentamiento obstruido (sedimentación obstruida), en un flujo ascendente y como la velocidad del flujo de B a C todavía aumenta, los granos finos son empujados hacia arriba por el flujo. La posibilidad de que éstos sean transportados hacia arriba por el flujo alto hacia las colas (*overflow*) se incrementa.
- c) En la cercanía de D, primero retroceden los granos más gruesos y después los granos finos restantes. Debido a la combinación de la

aceleración diferencial, y sedimentación obstruida, los granos más gruesos serán principalmente los que se encuentran en el fondo del lecho.

- d) Al final de la carrera del pistón, el lecho estará completamente compactado. El escurrimiento intersticial o consolidación se presenta ahora en una extensión limitada.

2.2.- Esquema de funcionamiento de una criba hidráulicas (JIG)

Wills (1988), plantea que el principio la pulsadora es un tanque abierto lleno de agua con una criba horizontal en la parte superior y provista con grifo en el fondo o con un comportamiento de cuba para retirar el concentrado. El lecho de la pulsadora consiste de una capa de partículas gruesas, pesadas o fondo de granza, colocado sobre la criba de la pulsadora sobre la cual se alimenta la pulpa. La alimentación fluye a través del fondo de granza y la separación tiene lugar en la cama de la pulsadora de manera que los granos con alta densidad específica penetran a través del lecho artificial o fondo de granza y de la criba para ser sacados como concentrado, mientras que los granos ligeros son transportados por un flujo transversal para ser desechados como colas. El movimiento armónico producido por el impulsor excéntrico es suplementado por una gran cantidad de agua de la cuba que se suministra continuamente, la cual aumenta la velocidad del agua hacia arriba y la disminuye hacia abajo.

En la Figura nº 6-a, Gupta *et al.* (2006) observa una sección transversal de un jig tipo industrial, el autor propone que las dimensiones son mayores con respecto a un jig a escala de laboratorio, mientras que en la Figura nº6-b Ospina M (2014) propone otra sección transversal de un jig a escala de laboratorio, donde además identifica las fuerzas hidrodinámicas involucradas en el proceso de separación. Ambos tienen una alimentación, lecho artificial o fondo de granza, una salida de livianos o colas, la cámara donde va a ocurrir la succión y pulsación.

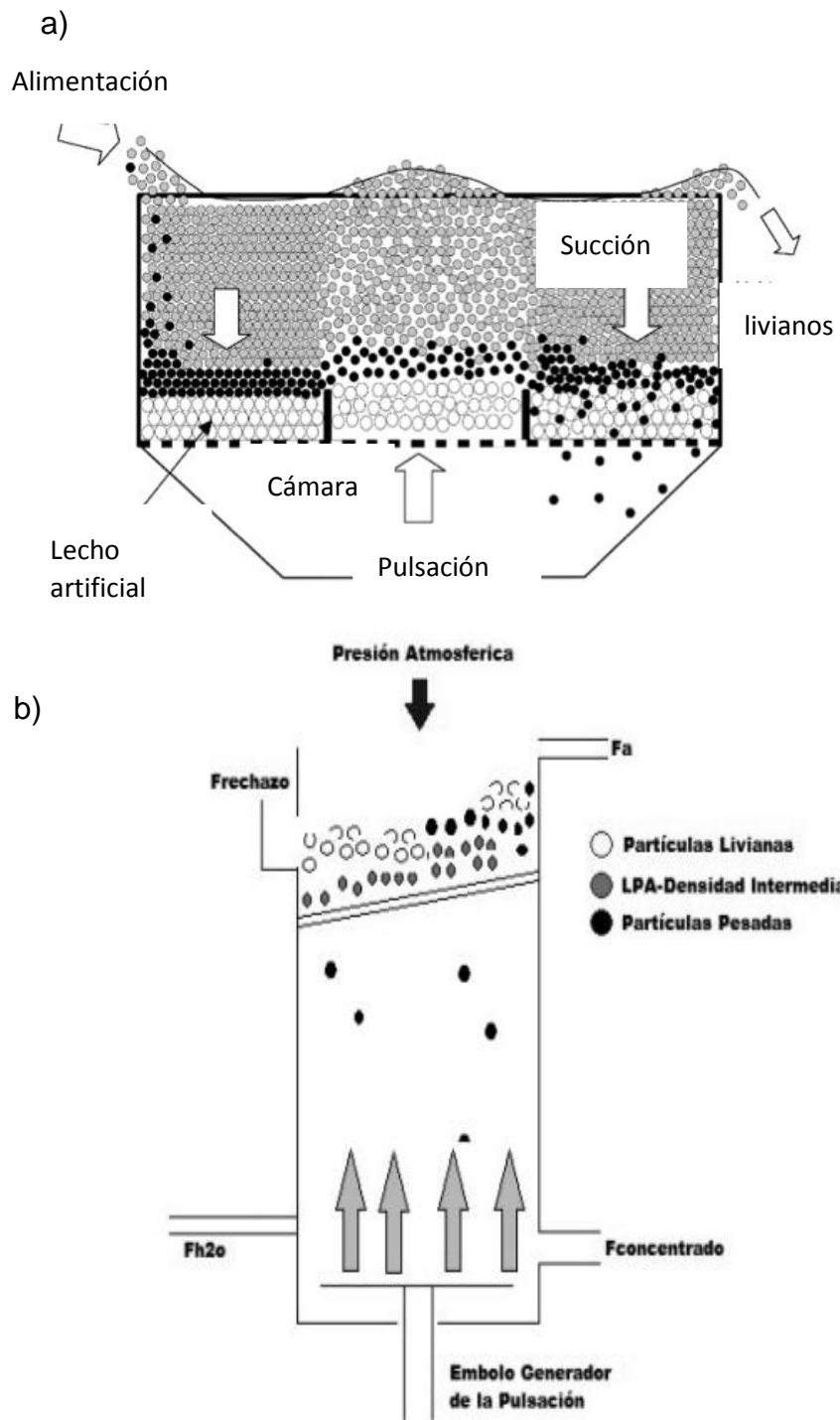


Figura nº 6 . a) Sección transversal de un jig tipo industrial. Gupta *et al.* (2006). b) Sección transversal de un jig a escala de laboratorio. Ospina M (2014).

2.2.1.- Factores que afectan en la separación gravimétrica

Gupta *et al.* (2006) estudió algunos parámetros operativos y estos se reflejan en la Tabla n° 3. El autor observó que estos últimos se pueden modificar en una criba hidráulica tipo JIG a escala de planta piloto y la respuesta que se obtendría al variar los parámetros.

Tabla n° 3. Efecto sobre la separación e intervalos operativos. Gupta *et al.* (2006).

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>	<i>Efecto</i>
Densidad irregular	Incrementa	Decrece la fracción de pesado
Granulometría irregular	Incrementa	Decrece la fracción de pesado
% de sólidos	30-50%	Rango óptimo
Agua en la cámara	Incrementa	incrementa la recuperación al máximo.
Agua en la cámara	Incrementa	Incrementa la razón de enriquecimiento

Concha (2007) en su trabajo especial de grado define algunos parámetros operacionales. A continuación los define uno por uno:

- a) **Ciclo del JIG:** Un ciclo está compuesto por un pulso de subida y un pulso de bajada; también llamados etapas de expansión y de succión del lecho, las cuales se caracterizan por una amplitud o desplazamiento máximo que se desarrolla en el movimiento del lecho y una frecuencia o número de veces que se efectúa un ciclo completo por unidad de tiempo.
- b) **Amplitud del pistón y frecuencia del pulso:** Son dos parámetros que están interrelacionados. Para distribuciones granulométricas estrechas y relativamente gruesas y con una alta proporción de pesados la amplitud debe ser grande (de 40 mm a 60 mm). Para distribuciones amplias y relativamente finas (entre 100 μ m – 500 μ m) la amplitud requerida es pequeña (de 3 mm a 20 mm) con ciclos cortos (alta frecuencia, aproximadamente de 150 rpm a 400 rpm).

- a) **Lecho artificial poroso:** Se usa para mejorar las condiciones de separación, según sea el tipo de JIG, algunos no necesitan lecho. La densidad de las partículas que forman el lecho debe ser intermedia a la de los sólidos que se desea separar. Para separar minerales auríferos se usan aleaciones de metales pesados o simplemente acero, el diámetro debe ser adecuado para no atravesar la criba, pero que permita el paso de las partículas finas en el escurrimiento intersticial.
- b) **Característica de los sólidos:** Se debe tener en cuenta la distribución de tamaños en el alimento (para menas aluviales el tamaño puede variar entre 6.4 mm hasta 0,5 mm.)
- c) **Dilución de la pulpa de alimentación:** Generalmente está entre un 30 % a un 70 % de sólidos en peso, es decir de 30 Kg a 70 Kg. de mineral por 70 l a 30 l de agua.
- d) **Agua de caja (*hutch*) o caudal de cámara:** Debe ser lo más clara posible y con un nivel máximo de sólidos en suspensión de 5 g/l de agua. Un valor promedio oscila alrededor de 5.6 l H₂O / kg. de mena. Se usa para mantener el lecho dilatado por un tiempo más largo y evitar una obstaculización muy alta a partículas gruesas de mineral denso. Se pueden presentar pérdidas de finos densos, ya que la energía del pulso de ascenso aumenta y se reduce la etapa de escurrimiento intersticial.

2.3.- Índices Metalúrgicos

Bustamante *et al.* (2008) menciona que los índices metalúrgicos son números adimensionales que precisan la calidad de separación efectuada en una o varias etapas de concentración, y además suministran información para el escalamiento en el dimensionamiento de equipos y plantas de concentración.

Entre los índices metalúrgicos, según Bustamante *et al.* (2008) se encuentra la **recuperación**, el cual proporciona la calidad del producto obtenido, bien sea en la etapa de concentración o globalmente en la planta.

La recuperación se define como la relación que existe en una operación de concentrado entre el peso del material útil o de interés que hay en el concentrado con respecto a la cantidad de ese mismo mineral que hay en la alimentación. A continuación, se explicará la ecuación que permite calcular el índice antes mencionado.

$$R = \frac{C \cdot tc}{A \cdot ta} \quad (ec 9)$$

Donde

C= masa del concentrado (g)

tc= tenor del mineral de interés

A= masa del mineral en la alimentación (g)

ta= tenor del mineral de interés

Otro índice metalúrgico según Bustamante *et al.* (2008), es la **razón de enriquecimiento(RE)**, el cual es la relación que existe entre el tenor(o porcentaje) de mineral útil en el concentrado respecto al tenor(o porcentaje) del mismo mineral en la alimentación. A continuación, se explicará la ecuación que permite calcular el índice antes mencionado.

$$RE = \frac{tc}{ta} \quad (ec 10)$$

Donde

tc= porcentaje de mineral útil en el concentrado

ta= porcentaje de mineral útil en la alimentación

Bustamante *et al.* (2008) considera que, el valor de la razón de enriquecimiento, en una operación de concentración debe ser siempre mayor que la unidad. En el caso de que RE se iguale a la unidad, no se produce concentración, dado que el **tc** sería igual al **ta** e iría contra el objetivo de esta operación unitaria. Por otro lado, mientras más lejano esté de la unidad, mejor será la concentración; lo que quiere decir que se

está enriqueciendo aún más el concentrado con respecto al tenor de alimento.

De acuerdo con Bustamante *et al.* (2008), en una operación de concentración normalmente los índices de recuperación y razón de enriquecimiento, son completamente antagónicos, es decir, que sólo es posible alcanzar una recuperación alta y una razón de enriquecimiento también alta, siempre y cuando, la separación se efectúa por etapas.

2.4.- Estadísticas en la concentración gravimétrica de minerales

El uso de herramientas, permite evaluar el efecto individual de una variable en diferentes niveles sobre una variable de respuesta, además permite conocer la interacción con respecto a las otras variables que intervienen, obteniéndose resultados que permiten optimizar los procesos.

Las ventajas de usar herramientas estadísticas, es que permiten investigar sistemáticamente las interacciones entre los factores y las metodologías que más utilizadas son metodología de superficie de respuesta (MSR) y método de Taguchi (MT).

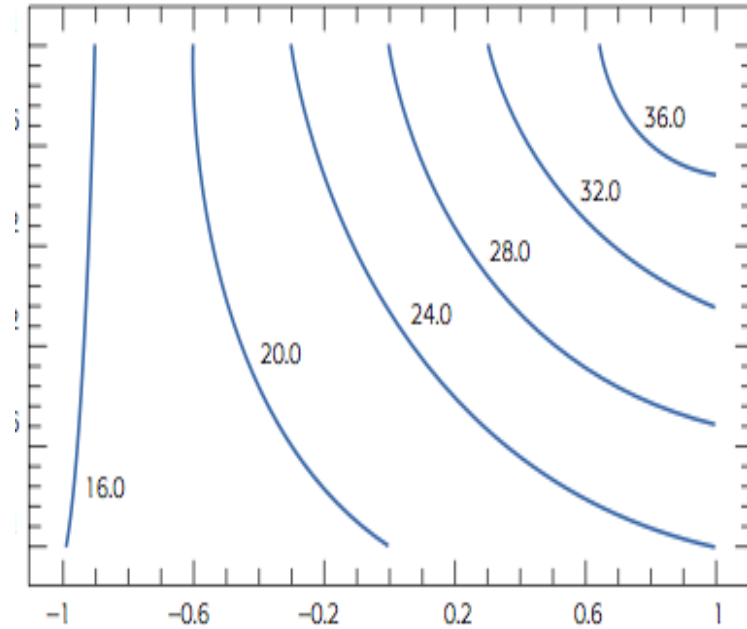
La estadística en la concentración gravimétrica de minerales permite aumentar la selectividad de minerales, diseñar, evaluar plantas de concentraciones mediante la descripción de proceso. Todo lo anterior se logra aplicando la estadística, específicamente mediante un diseño experimental. Este consiste en planificar y realizar un conjunto de ensayos experimentales variando los factores y niveles de forma aleatoria, de tal manera que los datos generados puedan analizarse estadísticamente para obtener conclusiones válidas y objetivas sobre el proceso.

A continuación, se van a introducir algunos conceptos básicos para comprender la estadística involucrada en estos procesos.

- **Definiciones según Gutierrez y De La Vera (2008):**
 - a) **Diseño de experimentos:** Consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos que datos

que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas por el experimentador sobre determinada situación.

- b) Experimento:** es un cambio de las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio en una o varias propiedades del producto o resultado.
- c) Variable de respuesta:** a través de esta(s) variable(s) se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental.
- d) Factores controlables:** son variables de proceso y/o características de los materiales y los métodos experimentales que se pueden fijar en un nivel dado.
- e) Factores no controlables:** son variables que no se puede controlar durante el experimento o la operación normal del proceso.
- f) Factores estudiados:** son las variables que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en la variable de respuesta.
- g) Efecto de un factor:** es el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en el factor.
- h) Efecto principal:** es igual a la respuesta promedio observada en el nivel alto de un factor, menos la respuesta promedio en el nivel bajo.
- i) Efecto de interacción:** dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta cuando el efecto de uno depende del nivel en que está el otro.
- j) Niveles:** son los diferentes valores que se le asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se llama **tratamiento** o **punto de diseño**.
- k) Matriz de diseño:** es el arreglo formado por los tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones.



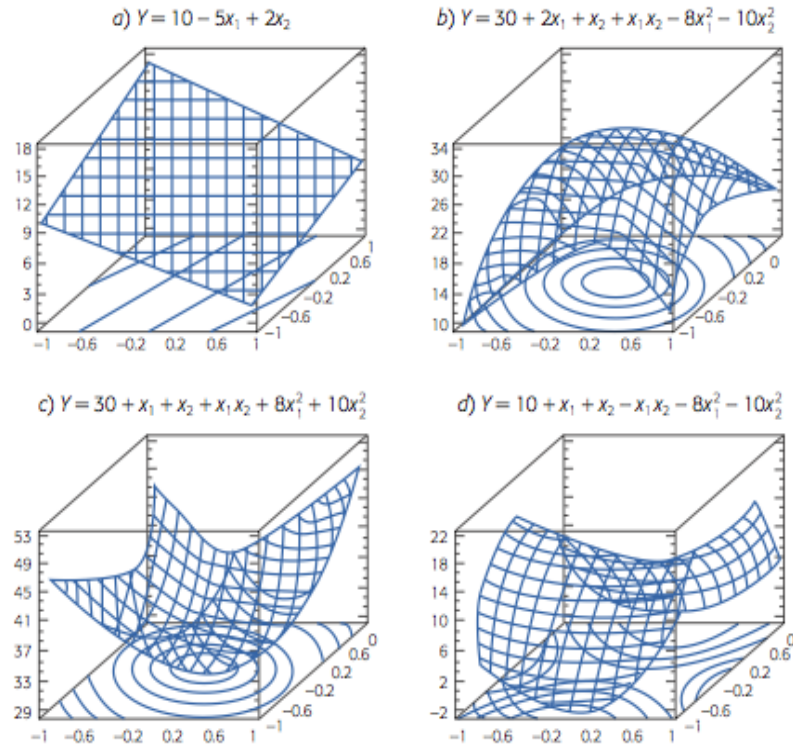
- l) Diseño factorial:** diseño experimental que sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o

Figura nº 7. Gráfico de contorno. Gutierrez y De La Vera (2008).

varias respuestas.

- m) Gráfico de contorno:** superficie de respuesta con curvas de nivel o isolíneas Figura nº 7, que permite ubicar los niveles de los factores sobre los cuales la variable de interés toma el mismo valor.
- n) Metodología de la superficie de respuesta:** Estrategia experimental y de modelación que permite encontrar condiciones de operación óptima de un proceso, (Figura nº 8). La metodología de superficie de respuesta, específicamente **diseño central compuesto** es el más utilizado, debido a que se puede construir a partir de un diseño factorial completo 2^k o fraccionado 2^{k-p} . La flexibilidad del **diseño central compuesto**, es el sentido de que se puede construir a partir de un diseño experimental más simple. Una de las ventajas que presenta este tipo de diseño es que genera una distribución uniforme de la información sobre la región experimental, además con este diseño experimental se puede realizar un número mínimo de tratamiento debido a que se

construye a partir de diseños experimentales más simple. Esta propiedad es de suma importancia ya que permite optimizar el gasto de recursos experimentales, es decir, si ya se corrió un



factorial completo y un punto central, y se detectó la presencia de curvatura o punto de inflexión, ahora se realizan los puntos axiales para completar el diseño.

- o) Región experimental:** espacio delimitado por los rangos de experimentación utilizados con cada factor.
- p) Región de operatividad:** conjunto de condiciones donde el equipo o proceso puede ser operado.
- q) Mejor tratamiento:** Mejor combinación de niveles de los factores en la cual se consideran los niveles utilizados durante el estudio experimental.

- r) **Punto óptimo:** mejor combinación de valores de los factores estudiados en la cual se considera toda la región de operatividad.
- s) **Óptimo individuales y óptimo simultáneo:** es una combinación de factores o tratamiento donde se predice el mejor tratamiento de una respuesta dentro de la región experimental (figura nº 9), se toma en cuenta un óptimo simultáneo, el cual es, la combinación de los factores de control o factores a estudiar, donde todas las respuestas de interés toman valores aceptables, asumiendo una solución compromiso.

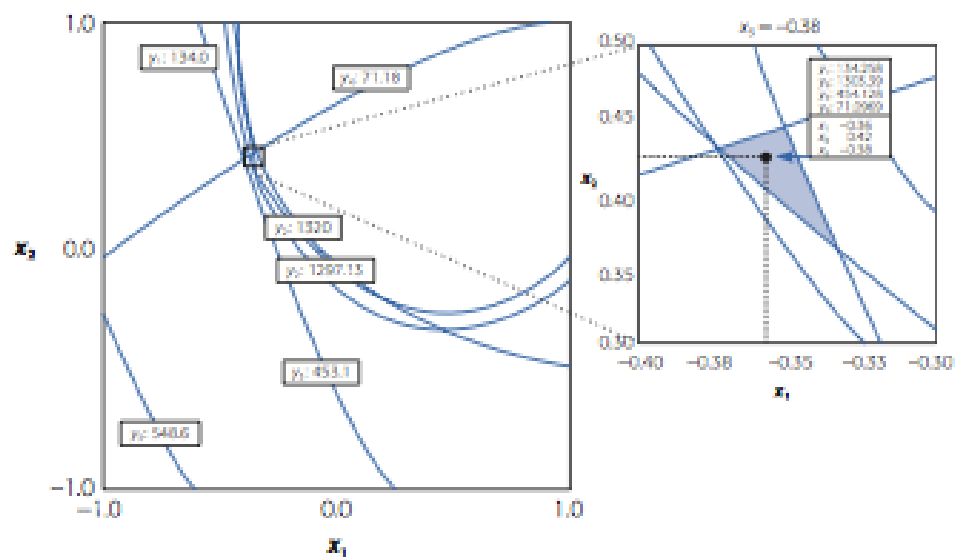


Figura nº 9 . Método gráfico para la optimización de dos variables de respuesta. Gutierrez y De La Vera (2008).

- t) **Análisis de varianza (ANOVA):** consiste en separar la variación total observada en cada una de las fuentes que contribuyen a la misma.
- u) **Coefficiente de determinación R^2 y R^2_{aj} :** miden la proporción o porcentaje de variabilidad en los datos experimentales que explicada por el modelo considerado.
- v) **Diagrama de Pareto, gráfico de Daniel:** el diagrama de Pareto o es un gráfico de barras que representa los efectos ordenados en forma descendente de acuerdo con su magnitud absoluta, mientras que el grafico de Daniel, permite visualizar cuáles efectos pueden

ser significativos: entre más se aleje un punto de la línea, más importante será el correspondiente efecto. Ver figura a-b.

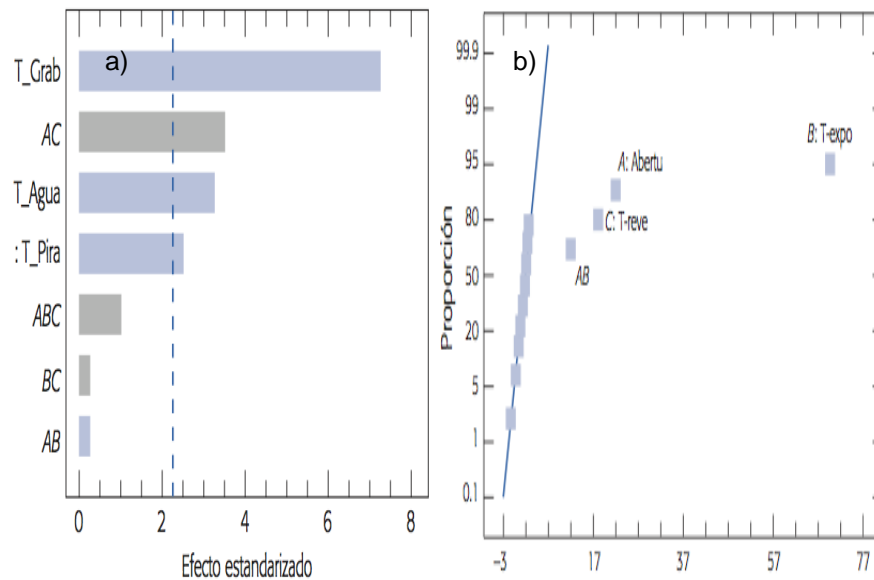


Figura n° 10. a) Gráfico de Pareto. b) Gráfico de Daniel. Gutierrez y De La Vera (2008).

A continuación, se procederá a dar ejemplos concretos, de cómo las herramientas estadísticas ayudan a mejorar y a optimar los procesos de concentración gravimétrica.

Diversos investigadores han realizado estudios en la separación gravimétrica utilizando diseños experimentales, como, por ejemplo; São Jose *et al.* (2017), realizaron una serie de pruebas en el laboratorio de procesamiento de minerales del Instituto Federal de Minas Gerais, cuyo objetivo fue determinar las variables operacionales de una criba hidráulica y su influencia, para lograr una óptima concentración de mineral de hierro proveniente del cuadrilátero Ferrifero en Brasil.

Para analizar la influencia de las variables operacionales y su interacción sobre la concentración, se planteó un diseño experimental **factorial completo 2³**, donde las variables de la criba hidráulica fueron:

- a) Fondo de granza (esferas de acero y pellas de hematita)
- b) Granulometría de alimentación

c) Masa del fondo de granza

Mientras que los factores controlables en la criba hidráulica, cuyas dimensiones son (203 x 305) mm, fueron:

d) Caudal de agua de la cámara 9,33 l/min

e) 150 r.p.m

f) Amplitud 260 mm

El grupo de investigación, observó la variación de la concentración en función de cada variable en función de los efectos de cada variable. Al grupo de investigadores, la herramienta estadística los ayudó a identificar la significancia de todas las variables durante la separación gravimétrica, Kumar *et al.* (2015), analizaron el porcentaje de cenizas sobre una fracción de carbón (+3 -4,76) mm para la separación de las mismas en una criba hidráulica a escala de laboratorio tipo Denver.

Las variables operacionales o factores estudiados, que se modificaron en la investigación fueron:

a) Altura del lecho

b) caudal de agua en la cámara

c) tiempo del ciclo

Se utilizó un **modelo de superficie de respuesta (MRS) Box Benhken 3^3** para optimizar las variables de respuesta. Los factores que no se modificaron fueron:

d) Apertura de la malla de la criba hidráulica (2 mm).

e) 150 r.p.m

Mediante el *software* estadístico versión prueba, se analizaron los efectos principales de los factores a sus diferentes niveles a su vez, el *software* arrojó las ecuaciones (11) y (12) que corresponde a la variable de respuestas como lo son el porcentaje de rendimiento y el porcentaje de cenizas.

$$\begin{aligned} \text{Recuperación} = & 12,28 + 0,90A + 1,48B + 0,16C - 2,75AB + 1,72AC - 0,064BC \\ & + 2,84A^2 + 0,02B^2 - 5,60C^2 \end{aligned} \quad (\text{ec 11})$$

$$\begin{aligned} \text{Cenizas} = & 14,61 - 0,15A + 1,48B + 0,05C - 0,009AB + 0,002AC - 0,01BC \\ & + 0,003A^2 - 0,14B^2 - 0,004C^2 \end{aligned} \quad (\text{ec 12})$$

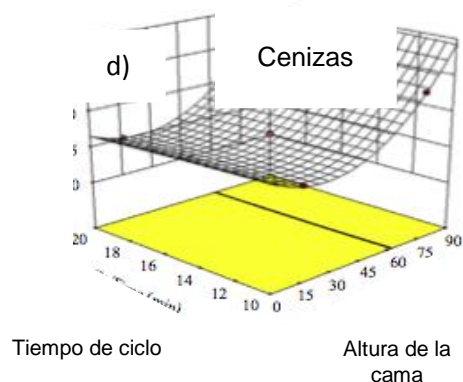
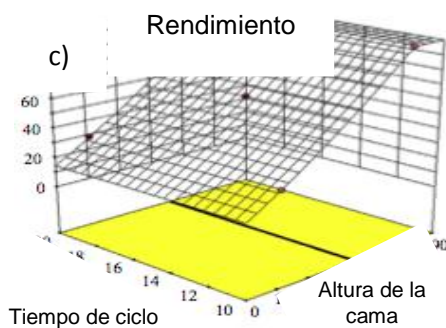
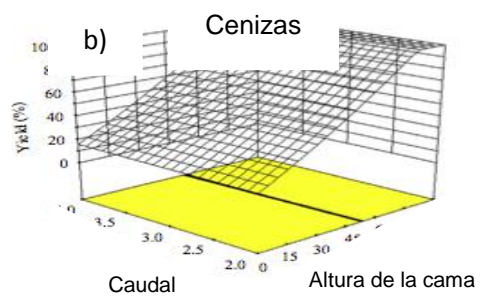
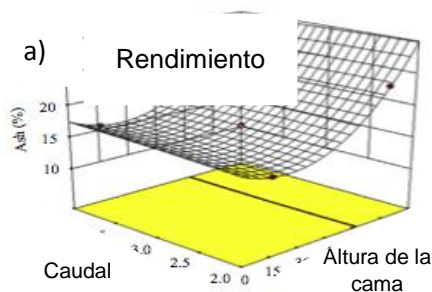
Donde

A= es la altura del lecho (mm)

B= caudal de agua en la cámara (l/min)

C= tiempo del ciclo (min)

Los valores reales y pronosticados de las variables de respuesta, se verificaron mediante las ecuaciones de regresión lineal. El modelo estadístico reportó un R^2 de 0,99 para valores predichos de rendimiento y para los valores predichos de cenizas, presentó un R^2 0,98 además en la Figura nº 11, observaron los óptimos estadísticos mediante los gráficos de contornos y superficie de respuesta, logrando concluir que el modelo estadístico utilizado, logró ajustarse a los valores reportados.



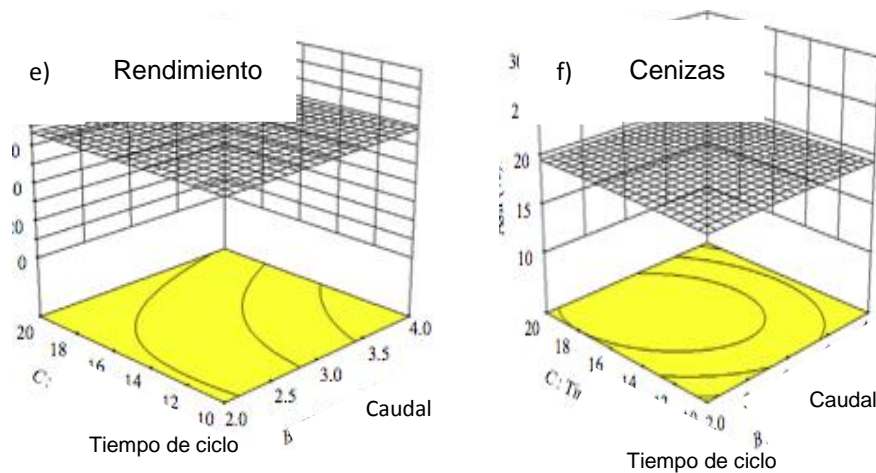


Figura n °11 SM. a) Efecto del caudal (Ca) y altura del lecho(AI) sobre el porcentaje de recuperación (%R). b) Efecto Ca y AI sobre él % de cenizas. c) Efecto de AI y tiempo de ciclo(Tc) sobre %R. d) Efecto del AI y Tc sobre % R. e) grafico de contorno Tc y (Ca) sobre %R. f) grafico de contorno efecto (Tc) y Ca sobre él % de cenizas. Kumar *et al.* (2015).

Tripathy *et al.* (2016), realizaron el estudio estadístico para la optimización del proceso de separación gravimétrica sobre el beneficio del carbón no coquizable de gran tamaño con alto contenido de cenizas, en fracciones de de (+ 2 -3) mm y (+ 1 -2) mm de carbón

Usaron una criba hidráulica JIG Denver a escala de laboratorio, cuyos factores controlables son:

- Amplitud 9/16 "
- Fondo de granza elaborado por cuarzo (+10 -15) mm

Mientras que los factores a estudiar fueron:

- Tamaño de alimentación (granulometría)
- Ritmo de alimentación
- Caudal de agua en la cámara

Se utilizó un diseño experimental **factorial completo 2³** para estudiar el rendimiento de la operación, donde el factor A representó el tamaño de alimentación, su nivel inferior (-1) fue de 1,5 mm, mientras que el nivel alto (+1) fue 2,5 mm. El factor B es el ritmo de alimentación, los niveles que se

utilizaron fueron 0,1 kg/min (-1) y 0,2 kg/min (1), por último, el caudal de la cámara los niveles fueron 1 l/min (-1) y 3,5 l/min (1). El rendimiento de fue determinado mediante análisis estadístico; donde el contenido de cenizas y la recuperación concentrada se consideraron respuestas.

Los tres factores A, B y C con sus interacciones AB, AC, BC y ABC, solo A, B,C y AB presentaron significancia en las variables de respuesta para la ecuación (13), mientras que para la ecuación (14), se mantienen las interacciones de los factores a estudiar y además se incluye la interacción de AC.

Las ecuaciones (13) y (14), representaron el modelo de regresión lineal

$$\text{Cenizas} = -6,4125 + 12,02 A - 29,45 B + 1,15 C + 26,8AB \quad (\text{ec } 13)$$

$$\begin{aligned} \text{Concentración} = & -151,712 + 91,552A + 85,9 B + 32,632C - 2,75AB \\ & + 12,572 AC \quad (\text{ec } 14) \end{aligned}$$

El estudio del ANOVA (análisis de varianza), ayudo a calcular el estadístico p con un porcentaje del 95% de confiabilidad, a su vez el estadístico p dio menor al 5% para todos los factores y su interacción entre ellos. A su vez, las ecuaciones 13 y 14 representaron las ecuaciones de las gráficas de superficie de respuesta, donde se aprecian las variables de respuesta con los factores a estudiar. Los investigadores utilizaron los indicadores estadísticos R^2 para el caso donde se analizó el % de cenizas, el cual fue de 0,99, mientras que para el caso de % concentración fue de 0,99. Esto quiere decir que los valores se ajustan al modelo.

En los diseños experimentales, se pueden hacer tantas combinaciones como quiera el experimentador, y estas combinaciones va estar sujeta a tiempo, y capacidad de análisis que presenten los experimentadores. Por ejemplo, Mahmoud *et al.* (2010). Optimizó del proceso de separación y concentración en una criba hidráulica a escala de laboratorio, usando herramientas estadísticas. Mahmoud et al, realizó la separación de una mezcla de cuarzo y carbón mediante un JIG tipo Harz. Las variables estudiadas fueron el tamaño de partícula, espesor del lecho, rpm, nivel de

agua en la cámara. El diseño experimental fue un **diseño factorial de 2⁴**. Se estudió el efecto principal y su interacción de las variables sobre la recuperación de cuarzo. En promedio se recuperó el 81,81% de cuarzo en los livianos con las siguientes condiciones; tamaño de partícula 3,907 mm, espesor del lecho 1,87 cm, nivel de agua 4,41 cm y 243,3 r.p.m.

A su vez, las herramientas estadísticas son aplicables a diferentes modelos de Jig, como lo fue el caso anterior, otra evidencia de esto es la investigación de Kumar *et al.* (2012), estudió la concentración en el equipo de separación Kelsey, para el procesamiento de carbón fino. El equipo Kelsey es un separador que utiliza los principios de separación gravimétrica, pero este utiliza la fuerza centrífuga para realizar la separación. Se estudiaron varios factores de proceso, mientras que otras se mantuvieron constantes utilizando un **diseño experimental Box-Behnken 3³**. Se usó arena de sílice de tamaño (+ 0,85 -1,68) mm como fondo de granza. Se estableció que el grosor del fondo de granza era el más crucial para controlar la separación. La velocidad de rotación afectó significativamente la porosidad del lecho artificial o fondo granza, lo que tuvo una influencia contrastante en el rendimiento del proceso. La tasa de pulsación determina la dilatación del lecho y la colocación incorrecta de partículas más pesadas. En un solo ensayo a través de la del equipo Kelsey, se logró una reducción absoluta del 7 % en el contenido de cenizas con un rendimiento superior al 55 %. Se encontró que el lecho más grueso facilita el rechazo de materiales con alto contenido de cenizas. Se desarrollaron modelos para los parámetros de respuesta y optimización realizados. Se identificaron los regímenes operativos para la aplicación de desbaste o limpieza en el equipo Kelsey para un rendimiento óptimo. Se estableció que el equipo antes mencionado, podría ser efectiva en la limpieza del carbón fino si se opera de manera controlada. Y el investigador Hori *et al.* (2006). Estudio la óptima pulsación de agua de la separación en partículas de plástico trituradas para la separación gravimétrica de pequeñas partículas de plástico. Específicamente dos (2) tipos de polietileno (PE) resistente a las

quemaduras y cloruro de polivinilo (PVC)- utilizando una criba neumática JIG tipo TACUB, el cual es otro modelo de criba hidráulica. El tamaño de las partículas fue de (0,5 a 3) mm y la gravedad específica de los dos (2), PE y PVC, fue de aproximadamente 1,1, 1,3 y 1,4, respectivamente. Los experimentos de separación se realizaron variando pulsaciones de agua, en las que se modificaron: la amplitud, la frecuencia y el patrón de pulsación. Sobre la base de la observación de la separación y la pulsación del agua, se encontró que la velocidad ascendente de la pulsación es un factor muy importante para formar capas de productos de PE y PVC de alto grado, con alta eficiencia. La fluidización moderada del lecho de partículas causó un alto rendimiento de separación. Los productos de PE y PVC presentaron un 99,8 % de recuperación en pulsaciones de pequeña frecuencia y amplitud. La condición de separación óptima se determinó fácilmente midiendo la fluidez de los lechos de plástico en la cámara de separación.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLOGICO

3.1.- Tipo de investigación

El tipo de investigación es del tipo explicativa, porque se modifican una serie de parámetros que influye en la recuperación y razón de enriquecimiento del proceso y además se estudian la relación de estos parámetros en la separación gravimétrica de la criba hidráulica JIG tipo Denver a escala de laboratorio, mediante el uso de herramientas estadísticas.

3.2.- Diseño de la investigación

Esta investigación es experimental debido a que se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes a diferentes niveles. Las variables o factores a modificar son: tiempo de ciclo, caudal de cámara y granulometría de alimentación.

3.3.- Unidad de análisis

El proyecto se centra en un equipo de concentración gravimétrica, conocido como criba hidráulica **JIG** a escala de laboratorio, marca Denver. Con las siguientes dimensiones: 283 mm largo x 531 mm ancho x 360 mm altura. Con una capacidad de procesamiento de 1 kg/ h. Esta criba está ubicada en el Laboratorio de Beneficio Mineral del Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela.

3.4.-Metodología de trabajo

A continuación, en la Figura nº12 se observa el esquema de la metodología de trabajo, donde se presentan las pautas, herramientas e instrumentos que se van a utilizar para llevar a cabo la presente investigación.

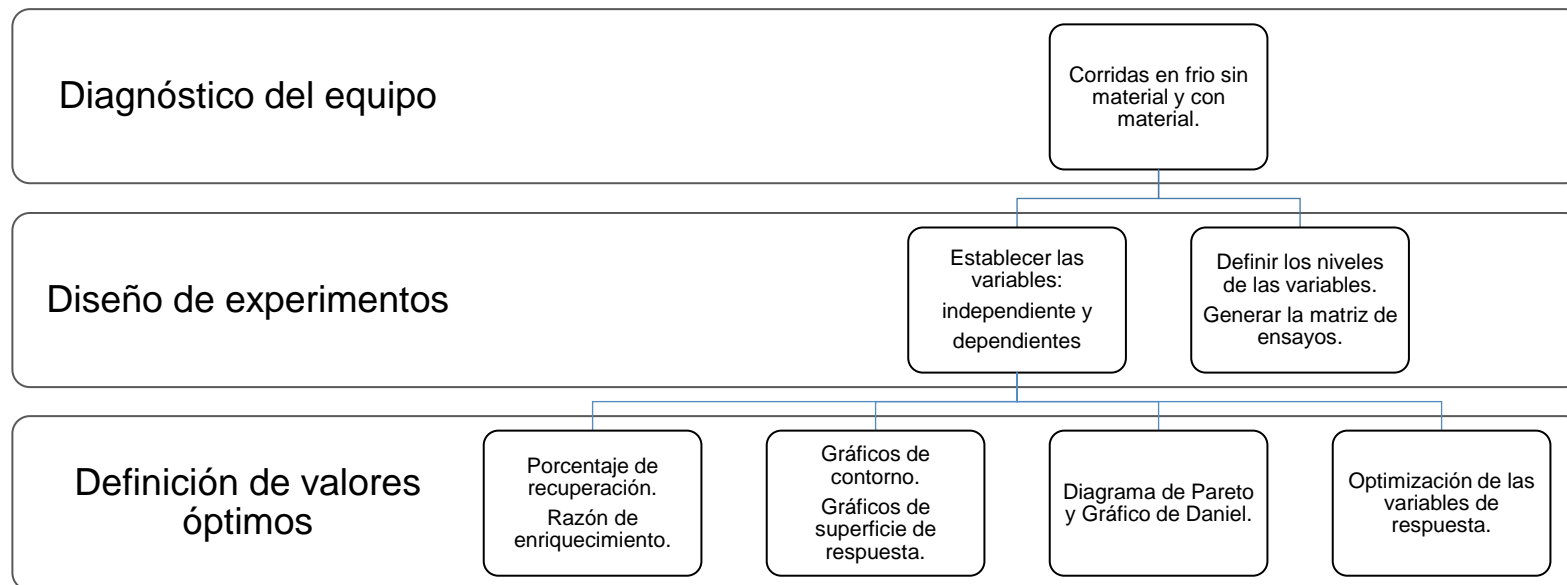


Figura nº12 . Esquema de la metodología de trabajo.

3.4.1- Diagnóstico del equipo

a. Corridas con material y mineral para ensayos exploratorios

Para la realización de los ensayos, se efectuaron corridas con material esférico poliméricos y mezcla de minerales, específicamente casiterita (SnO_2) y calcita (CaCO_3). Para este segundo caso, se usaron relaciones (1:1). Las especificaciones de ambas corridas están descritas en el anexo I.

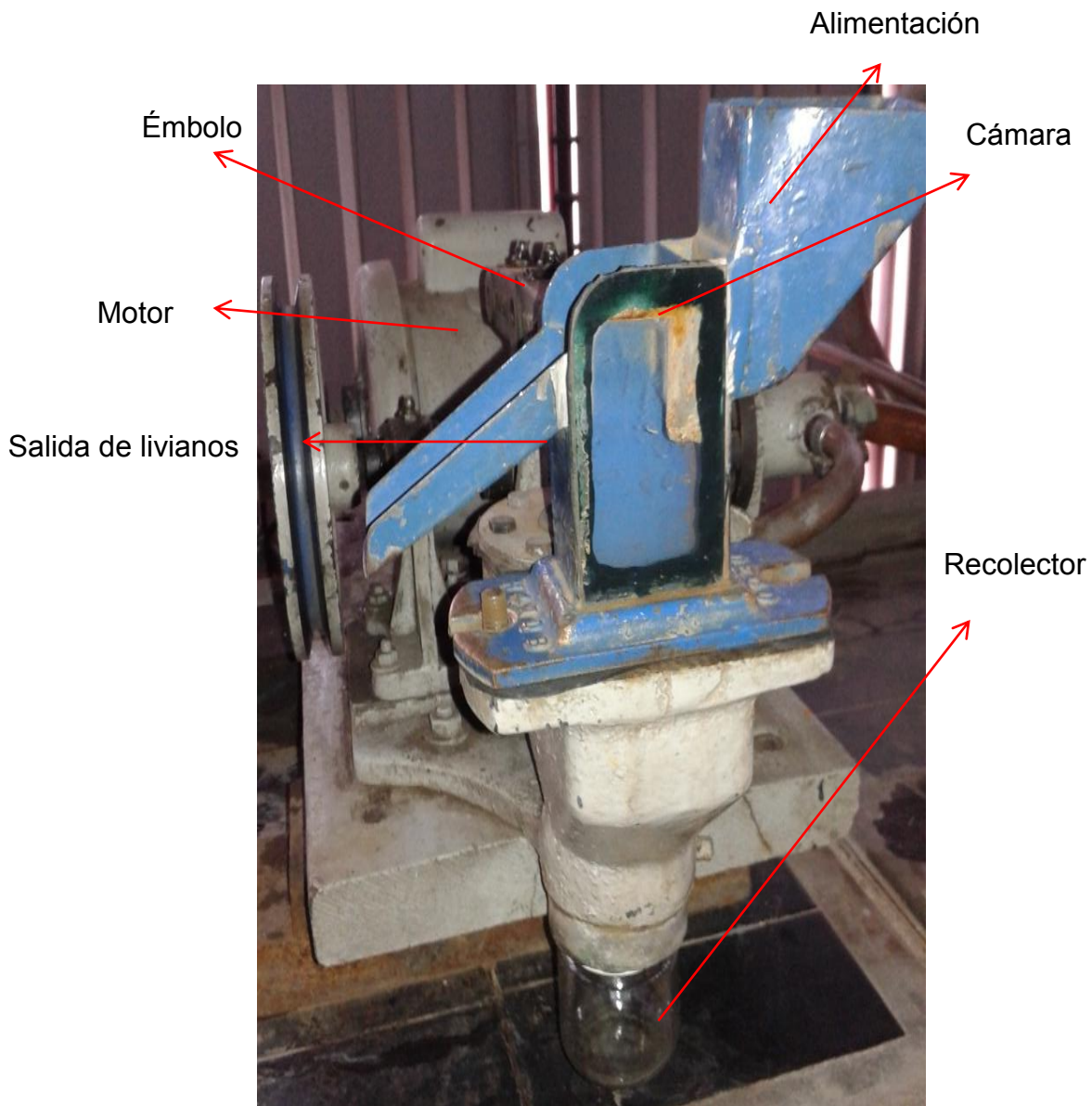


Figura nº13. Fotografía de criba hidráulica JIG marca Denver a escala de laboratorio ubicada en el laboratorio de beneficio mineral GMG-FI-UCV.

3.4.2-Diseño experimental

Se planteó un **diseño experimental central compuesto 3^3** , utilizando el software estadístico **Minitab** 18 versión libre. En la Figura nº 11, se muestra el esquema general de operatividad de las variables involucradas en la separación gravimétrica por corrientes ascendentes pulsatorias (criba hidráulica).

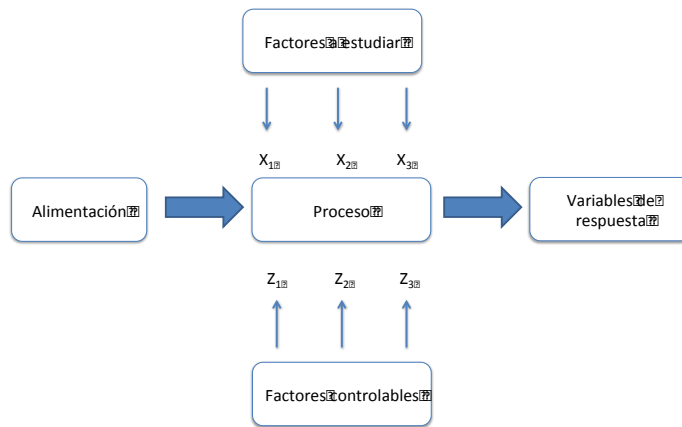


Figura nº14. Esquema de proceso de separación por corrientes ascendentes pulsatorias.

A continuación, se nombran cuáles son los factores a estudiar y las variables de respuesta.

Factores a estudiar: variables que van a modificar.

- a) **Factores controlables:** son las variables que no se modifican, las cuales están estandarizada al equipo.
- b) **Variable de respuesta:** corresponde al porcentaje de recuperación y a la razón de enriquecimiento, definidas en el capítulo II, sección 2.3.
- c) **Establecimiento de los niveles de los factores a estudiar:**

A continuación, se describe como se establecieron los niveles de los factores más importantes a considerar en este trabajo especial de grado:

- Tiempo de ciclo: se estableció mediante una revisión de la bibliografía especializada.
- Caudal de la cámara: este parámetro se determinó a través de ensayos exploratorios. Para ello, se realizó un barrido de caudales con el objetivo de ubicar el caudal máximo, intermedio y el mínimo; tomando como referencia los valores encontrados en la revisión bibliográfica, específicamente para cribas hidráulicas a escala de laboratorio y metales pesados.
- Granulometría de alimentación: los cortes granulométricos se seleccionaron de la misma forma que para el tiempo de ciclo.

e) Cálculo del % de recuperación y razón de enriquecimiento

Después de realizar los ensayos de concentración, las corrientes de livianos, mixtos y pesados del mineral se secaron. Seguidamente, cada una de ellas se pesaron en una balanza de platillo, marca Mettler, modelo P2010. Finalmente se registró el peso de cada corriente. y se procedió a calcular el porcentaje de recuperación y la razón de enriquecimiento, según las ecuaciones 15 y 16 respectivamente. En la Figura n° 18, se describe el esquemáticamente el procedimiento descrito previamente.

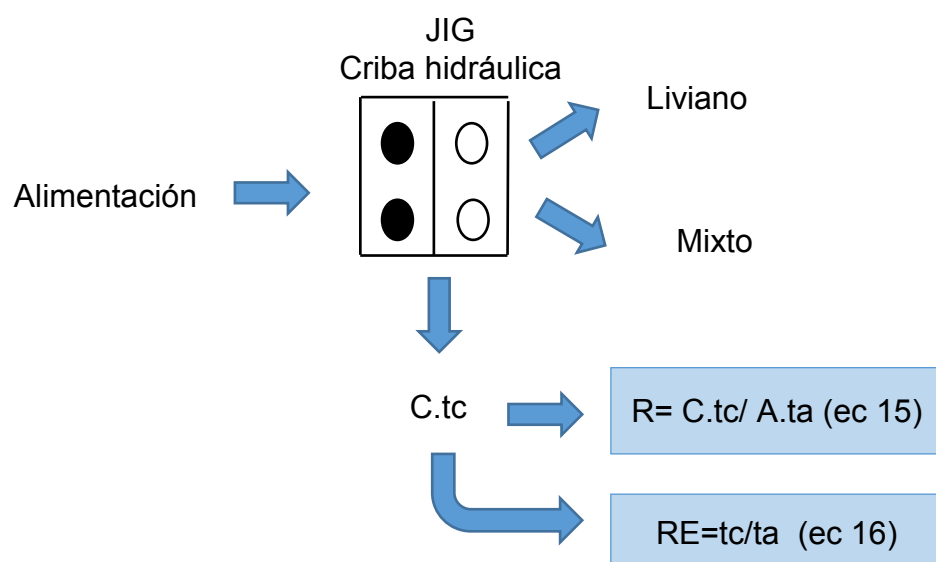


Figura n° 15. Esquema para el cálculo del % recuperación y razón de concentración.

3.4.3- Análisis e interpretación de los datos

a) Definición de valores óptimos para las variables de respuesta

La definición de valores óptimos para las variables de respuesta se realizará mediante el empleo de los gráficos de contornos y superficies de respuesta, mediante el *software* estadístico.

b) Definición de los efectos e interacción de las variables

El estudio de efectos entre las variables, se analizará mediante el gráfico de Daniel y diagrama de Pareto, a través del software estadístico.

La definición de gráficos de contornos, superficies de respuesta, gráfico de Daniel y diagrama de Pareto, se ubican en el capítulo II, en la sección 2.4.

3.4.4- Ensayos de concentración

El equipo utilizado en el laboratorio para los ensayos fue la criba hidráulica JIG marca Denver.

Materiales y equipos

- a. Balanza de platillo Mettler P2010.
- b. Vernier.
- c. Cinta métrica.
- d. Materiales de tipo polímeros de morfología esférica y granulometría variada.
- e. Minerales A y B.
- f. Lecho artificial o fondo de granza

A continuación, en la Figura nº 16, se aprecia el diagrama del procedimiento que se elaboró para realizar los ensayos.

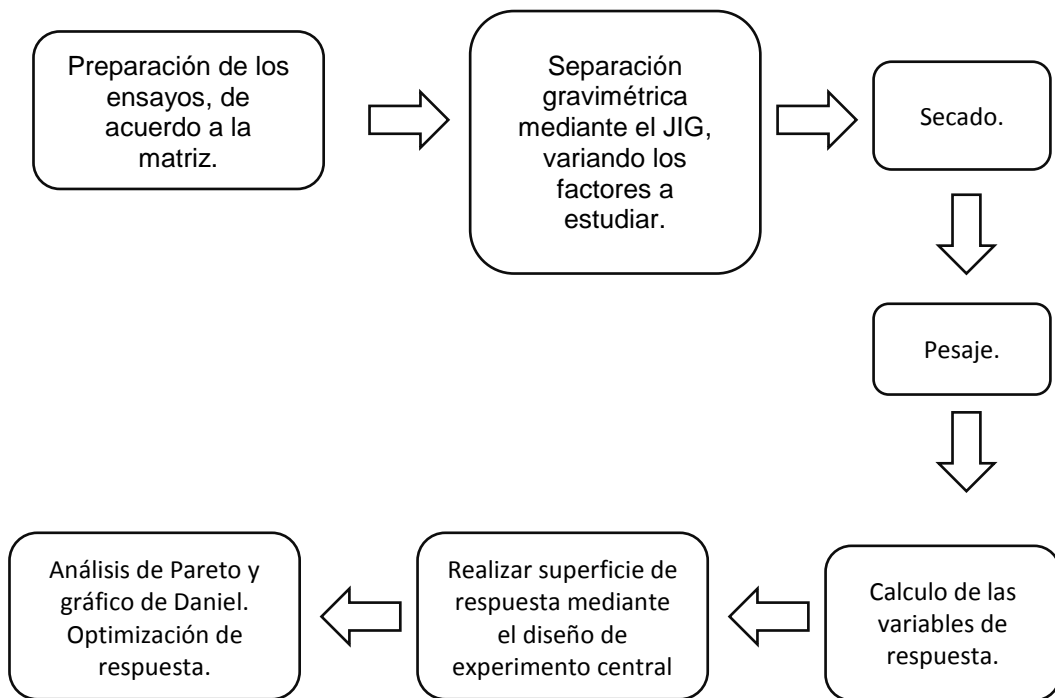


Figura nº 16. Diagrama del procedimiento para los ensayos de concentración.

A continuación, se describirá el procedimiento para realizar los ensayos de separación gravimétrica.

- a. Se procedió a realizar las mezclas del mineral A y B, variando la granulometría, de acuerdo a lo establecido en el diseño experimental central compuesto establecido.
- b. Se colocó el fondo de granza, lo más homogéneo posible, es decir, una sola capa de fondo, que cubra 4,5 cm de largo x 4 cm de ancho de la malla de la cámara y de una apertura de 2 mm.
- c. Se colocó un recipiente previamente rotulado en litros (l) para verificar el caudal, abriendo la llave de paso que regula la entrada de agua a la cámara, según lo planificado por el diseño experimental central compuesto.
- d. Con el caudal establecido en la matriz experimental, y el equipo encendido, se procedió se verter la mezcla de mineral en la alimentación.
- e. De acuerdo a lo establecido en el paso anterior, cada ensayo de concentración por duplicado.

- f. Al finalizar cada ensayo, el mineral ubicado en cada corriente, se secó, para luego reportar el peso.
- g. Se cuantificó la cantidad de mineral de casiterita (SnO_2) que obtuvo en el concentrado, mixto y liviano. Utilizando una balanza de platillo.
- h. Mediante la ecuación (15) y (16) se calculó el % de recuperación en cada ensayo y la razón de concentración.
- i. Por último, mediante el *software* Minitab 18 versión libre, se realizaron los gráficos de contornos, superficies de respuesta, diagrama de Pareto y gráfico de Daniel por cada variable de respuesta.

Las especificaciones del tratamiento del mineral, el cálculo de densidad y la norma utilizada, se ubican en los anexos II, III, IV, V, VI y VII.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se introducirán los resultados obtenidos durante la investigación.

4.1 Identificación de los parámetros operaciones de la criba hidráulica

En la Tabla nº 4, se detallan los factores que están involucrados en el proceso de separación gravimétrica utilizando pulsadoras o JIG (criba hidráulica), producto de una revisión de textos especializados e investigaciones publicadas en revistas arbitradas relacionadas con la materia de estudio, comprendida entre los años 1967-2017.

En dicha Tabla, se observan los parámetros involucrados dentro de un proceso de separación gravimétrica mediante corrientes pulsatorias ascendientes. Los factores que no se modificaron, fueron asociados a razones operativas del equipo y por limitaciones en cuanto a material, mientras que los factores que se modificaron, fueron tiempo de ciclo, caudal de cámara y granulometría de alimentación.

Tabla n° 4. Parámetros involucrados en la separación gravimétrica consultados en la bibliografía.

Parámetros	Tipo	Valor
Operativos	Tiempo de ciclo	(10-15) min para carbón Kumar et al (2015).
	Caudal de la cámara Gupta <i>et al.</i> (2006) Kumar <i>et al.</i> (2015) Tripathy <i>et al.</i> (2016) São Jose (2017) Concha (2007)	Al incrementar el caudal de la cámara, incrementa la fracción de pesados para minerales pesados. 1-4(l/min) para carbón. 9 (l/min) para mineral de hierro 17 (l/min) para mineral aurífero
	Ciclos por minuto Gupta <i>et al.</i> (2006)	(30-300) r.p.m
	Amplitud Gupta <i>et al.</i> (2006)	(10-30) mm
	Altura del lecho Kumar et al (2015).	(15-45) mm para carbón
	Fondo de granza . Gupta <i>et al.</i> (2006) São Jose (2017).	Si incrementa la densidad, disminuye la fracción de pesados. Si incrementa la granulometría del fondo, aumenta la fracción de pesados, si incrementa la altura del fondo de granza, disminuye la fracción de pesados. (250-300) g peso del fondo de granza.
	% de sólidos Gupta <i>et al.</i> (2006).	(30-50) % sólidos para una óptima operación.
	Mineral	Tipo
	Morfología Pita (2015).	Laminar para los minerales menos densos y esféricos para los más densos.
	Granulometría de alimentación Gupta <i>et al.</i> (2006) São Jose (2017) Concha (2007)	(50 µm-20 mm) minerales pesados (0,5- 200) mm para carbón (3,35+1mm -2,36+1mm) para hierro (6.4mm -0,5mm) para mineral aurífero
	Criterio de concentración (cc) (con respecto a la densidad fijando el tamaño de partícula a 50 µm) Gupta <i>et al.</i> (2006).	5.250 kg/m ³ = 2,50 3.970 kg/m ³ = 1,75 3.550 kg/m ³ = 1,50 3.130 kg/m ³ = 1,25 2.870 kg/m ³ = 1,10 2.700 kg/m ³ = 1

Los intervalos seleccionados tomando como referencia lo descrito en la tabla n° 4, son los siguientes:

1.- Granulometría de alimentación: 50 µm-20 mm

2.- Caudal de cámara: (9 -22) l/min.

3.- Tiempo de ciclo: en cuanto al tiempo de ciclo, se realizó un ANOVA (ver Tabla nº 5), cuya finalidad fue verificar si los intervalos seleccionados eran significativos, debido a que en la bibliografía solo se ubicaron tiempo de ciclo para carbón.

Los parámetros o factores controlables fueron los siguientes:

- La alimentación: mezcla de un mineral A Casiterita (SnO_2) y mineral B calcita (CaCO_3), en total se pesó 10 g (6,25%) del mineral A y 150 g del mineral B. Las caracterizaciones de los mismos se ubican en el anexo III.
- Revoluciones del motor: 564 r.p.m
- Pulsaciones por minuto: 171 r.p.m
- Amplitud: 5 mm
- Fondo de granza (esfera de acero al carbono)
 - Peso= (65,2 +/- 0.1) g
 - Densidad= (7,3296 +/- 0,6474) g/cm^3
 - Número de esferas de acero: 75
- Altura del lecho: 50 mm
- Apertura de la malla: 2 mm

Estos factores controlables, están asociados al diseño de la criba hidráulica, debido a que fueron estandarizados por el fabricante del equipo y por limitaciones del mineral utilizado.

4.1.2- Ensayos exploratorios

A continuación, se presentarán el análisis del ANOVA para mezcla de mineral.

En la Tabla nº 5 se observa el análisis del ANOVA antes mencionado. Este último se realizó con un nivel de confianza del 95% utilizando una distribución F de Fisher. Se empleó el estadístico F_0 , con la finalidad de

validar la hipótesis, de que el factor estudiado (variación del tiempo de ciclo) durante el proceso de separación no era influyente.

En la Tabla nº 5, el estadístico F_o superó en valor al F crítico= 9,6 con (3,2) grados de libertad, esto indicó que se rechazó la idea o hipótesis alternativa, es decir, si existió una significancia estadística al variar el tiempo de ciclo (1, 3 y 5 min) , dando como resultado que el tiempo de ciclo si influyó en la recuperación de mineral pesado, y es mucho menor a los tiempos reportados en la Tabla anterior. Los pesos que arrojaron estos ensayos exploratorios se ubican en el anexo VI.

Tabla nº 5. ANOVA de ensayos exploratorios.

Anova caudal de cámara 8,4 l/min (+1,68 -2) mm	
Suma total de los cuadrados (STC)	858,7
Suma de cuadrado de los tratamientos (SCF)	804,6
Suma de los cuadrados residual (SCD)	54,1
Estadístico F_o	22,3
Estadístico F crítico (3,2)	9,6
Anova caudal de cámara 16,44 l/min (+1,7 -2) mm	
(STC)	555,8
(SCF)	553,58
(SCD)	2,2
Estadístico F_o	375,1
Estadístico F crítico (3,2)	9,6
Anova caudal de cámara 20,4 l/min (+1,7 -2) mm	
(STC)	676,8
(SCF)	654,4
(SCD)	22,4
Estadístico F_o	43,73
Estadístico F crítico (3,2)	9,6

4.2- Diseño experimental con MSR

De acuerdo a la revisión realizada, los investigadores, Kumar *et al.* (2015) Tripathy *et al.* (2016), y São Jose *et al.* (2017) utilizaron la metodología de superficie de respuesta (MRS), Box Benhken 3^3 y un diseño factorial completo. Esta herramienta fue efectiva, sin embargo, la misma es limitada de acuerdo a lo establecido por Gutierrez y De La Vera (2008). La metodología de superficie de respuesta (MRS) central compuesto permitió manejar más niveles en los factores a estudiar. Por ende, la herramienta

estadística, que se aplicó para el análisis gravimétrico fue el **diseño experimental central compuesto 3³**.

A continuación, en la Tabla n° 6, se observa la matriz del diseño experimental central compuesto, donde se detallan los niveles altos (+1), intermedios (0) y bajos de cada factor (-1). Además, en la siguiente sección 4.3 se muestra la Tabla n° 7, en donde se presentan los valores de los pesos, en cada corriente después de aplicar cada tratamiento establecido en la Tabla n° 6.

Tabla n° 6. Diseño de la matriz con los factores a estudiar con sus respectivos niveles.

Tratamientos	tiempo de ciclo (min)	Caudal de la cámara(l/min)	Granulometría de alimentación (mm)
1	1 (-1)	9 (-1)	+1,4 -1,68 (-1)
2	5 (+1)	9 (-1)	+1,4 -1,68 (-1)
3	1 (-1)	22 (+1)	+1,4 -1,68 (-1)
4	5 (+1)	22 (+1)	+1,4 -1,68 (-1)
5	1 (-1)	9 (-1)	+2 -3,36 (+1)
6	5 (+1)	9 (-1)	+2 -3,36 (+1)
7	1 (-1)	22 (+1)	+2 -3,36 (+1)
8	5 (+1)	22 (+1)	+2 -3,36 (+1)
9	1 (-1)	15,5 (0)	+1,68 -2 (0)
10	5 (+1)	15,5 (0)	+1,68 -2 (0)
11	3 (0)	9(-1)	+1,68 -2 (0)
12	3 (0)	22 (+1)	+1,68 -2 (0)
13	3 (0)	15,5 (0)	+1,4 -1,68 (-1)
14	3 (0)	15,5 (0)	+2 -3,36 (+1)
15	3 (0)	15,5 (0)	+1,68 -2 (0)
16	3 (0)	15,5 (0)	+1,68 -2 (0)
17	3 (0)	15,5 (0)	+1,68 -2 (0)
18	3 (0)	15,5 (0)	+1,68 -2 (0)
19	3 (0)	15,5 (0)	+1,68 -2 (0)
20	3 (0)	15,5 (0)	+1,68 -2 (0)

Tabla n° 7. Pesos reportados por cada tratamiento establecido por el diseño de la matriz experimental, utilizando fondo de granza.

Tratamiento	Corrientes			
	Pesado (g)	Mixto (g)	Liviano(g)	total (g)
1	18,50	104,70	34,90	158,10
1.1	18,80	101	40	159,80
1.2	18,80	93,20	47,4	159,40
2	31,50	83,50	44,7	159,70
2.1	33	78,40	31,8	143,20
3	13,40	17,20	127,7	158,30
3.1	14,50	32,10	112,3	158,90
4	10,30	13,10	135	158,40
4.1	10	17,30	131,40	158,70
5	1,60	123,10	33,90	158,60
5.1	2,10	121,10	27	150,20
6	3,80	115,20	39,90	158,90
6.1	2,60	109,70	46,60	158,90
7	3,40	23,40	130,30	157,10
7.1	4,10	26,40	129,30	159,80
8	8	3,20	148	159,20
8.1	8,20	9	142	159,20
9	9	50	100,05	159,05
9.1	8,80	64,30	59,40	132,50
10	7,20	32,50	110	149,70
10.1	19,50	30,50	109,6	159,60
10.2	19,20	30	109,1	158,30
11	18,60	83,70	57	159,30
11.1	12,80	106	41,10	159,90
12	8,90	26,30	124,50	159,70
12.1	10	18	131,80	159,80
13	8	44,30	106,90	159,20
13.1	12,50	35,80	110,70	159
14	4,30	69,10	84,30	157,70
14.1	3,90	72,20	83,40	159,50
15	17,80	29,50	111,70	159
16	16,50	28,30	110	154,80
17	16,30	29,70	112,50	158,50
18	16	28	110	154
19	17	27	113	157
20	16,80	27,50	112,20	156,50

4.3- Porcentaje de recuperación y de la razón de concentración

En la Tabla nº 7 se detalló que los tratamientos (1-14) se realizaron por duplicado, a excepción del número 10, el cual se efectuó por triplicado, debido a que se obtuvo valores de pesos con una dispersión mayor a los 10 puntos. Cabe destacar que los tratamientos desde el 15 hasta el 20 se realizaron bajo las mismas condiciones (quintuplicado), producto a que la matriz de diseño estableció que los últimos 5 tratamientos se debían realizar con el nivel intermedio de cada factor a estudiar.

A continuación, en la Tabla nº 8, se indican el peso de la corriente de pesados, el porcentaje de SnO₂ y las variables de respuesta por cada uno de los tratamientos.

Tabla nº 8. Porcentaje de recuperación y razón de recuperación, utilizando fondo de granza.

Tratamientos	Pesado (g)	% SnO ₂	% R	RE
1	18,70	46,01	92	8
2	32,25	27,93	90	4,50
3	14	66,48	92,5	10,60
4	10,15	95,07	96,5	15,20
5	1,85	85,86	16	13,70
6	3,20	89,68	29	14,30
7	3,75	93,4	35	14,90
8	8,10	96,94	78,5	15,50
9	8,90	72,51	64,5	11,60
10	19,35	48,84	94,5	7,80
11	15,70	53,68	81,5	8,60
12	9,45	94,75	89,5	15,20
13	12,50	65,60	82	10,50
14	4,10	91,38	37,5	14,60
15	17,80	52,25	93	8,30
16	16,50	55,15	91	8,80
17	16,30	55,21	90	8,80
18	16	57,50	92	8,80
19	17	57,50	92	9,20
20	16,80	57,50	92	9,20

Después de analizar los resultados mostrados en la Tabla nº 8, el tratamiento 4 realizado bajo las condiciones de operaciones de 5 min de tiempo de ciclo, 22 l/min de caudal de la cámara y una granulometría de alimentación (+1,40 -1,68) mm arrojó un 96,50 % de recuperación. De igual forma el tratamiento 3, con las condiciones de 1 minuto de tiempo de ciclo, con igual caudal de cámara y granulometría de alimentación presentó un 92,50 % de recuperación. Siendo estos dos tratamientos, los que dieron los mejores resultados.

En la Tabla nº 8 junto a la Figura nº 17, se observó que, al aumentar el caudal de la cámara, se favorece la expansión del lecho, permitiendo que las partículas pesadas se separen de las livianas. Esto posibilitó que el mineral pesado se estratificase primero bajos los mecanismos de asentamiento obstaculizado (ver sección 2.1.2, ecuación 4) y en segundo por la aceleración diferencial (ver sección 2.1.2, ecuación 8), tal y como lo expusieron los autores Bustamante *et al.* (2008), Gupta *et al.* (2003).

Otra posible explicación que justificó el alto grado de concentración para el tratamiento 3 y 4, es el tamaño de partícula, tal como lo expuso Bustamante *et al.* (2008) y Gupta *et al.* (2003) en el capítulo II, específicamente en la Figura nº 1 y en la Tabla nº 1 respectivamente. Ambos autores reflejaron que el CC de concentración se asoció con el tamaño de partícula, además se detalló que si el CC supera el 2,5 (pasante 75 μ m), la separación se realizará de forma óptima. Si por el contrario el valor de CC es de 1,25 (pasante 6,35 mm), la separación no se realizará de forma satisfactoria. Para el caso específico del tratamiento 4 y 3, el corte granulométrico utilizado para ambos ensayos fue (+1,4 - 1,68) mm, dando como resultado un CC de 1,75. Este valor se ubicó en el intervalo aceptable de concentración.

Los ensayos 5 y 6 presentaron bajos porcentajes de recuperación, como se observó en la Tabla nº 8. Las condiciones para estos ensayos fueron: un tiempo de ciclo de 1 min y 5 min, el caudal de cámara de 9 l/min y una granulometría de alimentación (+2 -3,36) mm para ambos casos. Dando

como resultado un 16 % y 29 % de recuperación respectivamente. La justificación a estos valores de recuperación, es debido a que se necesitó un corte granulométrico con tamaño de partículas inferiores.

Al analizar la variable de respuesta RE (razón de enriquecimiento) cuyo valor se muestra en la Tabla nº 8. Se denotó que el tratamiento que reportó un alto valor de RE, fue el número 8, con condiciones de 5 min de tiempo de ciclo, 22 l/min de caudal de cámara y granulometría de alimentación de (+2 -3,36) mm dando como resultado un 15,50 de RE. El alto valor del índice metalúrgico anterior fue debido al intervalo granulométrico utilizado. Algunas partículas lograron pasar entre los intersticios del fondo de granza y los granos de mineral que no pasaron a través de la malla de 2 mm. Posibilitando que los minerales pesados se estratifiquen por el mecanismo de escurrimiento intersticial propuesto por Bustamante *et al.* (2008).

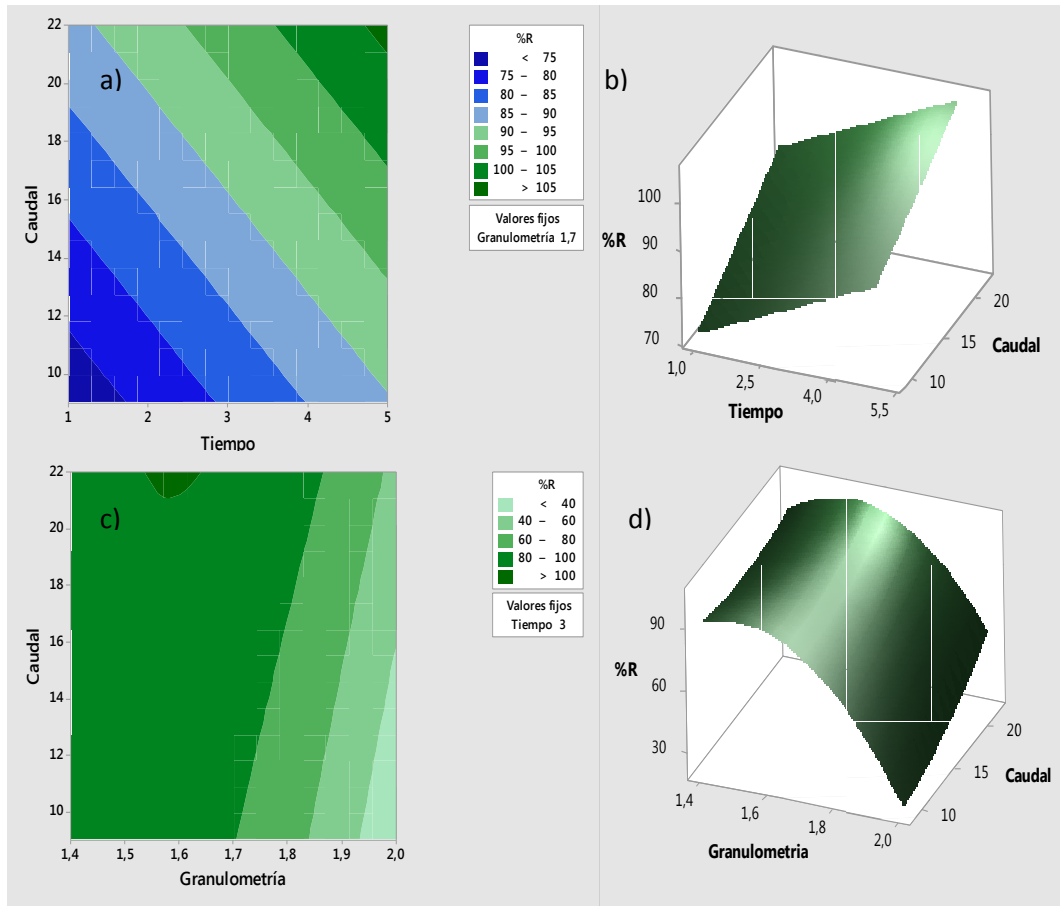
Mientras que el tratamiento 2 (ver Tabla nº 8) con condiciones de 5 min de tiempo de ciclo, 9 l/min y granulometría de alimentación entre los intervalos (+1,4 -1,68) mm, presentó un RE de 4,50. Este bajo RE, es debido a que el caudal empleado no fue suficiente para expandir el lecho mineral. La poca expansión del lecho mineral, hizo que las partículas livianas permanecieran dentro de la cámara y se escurrieran entre los intersticios del fondo de granza, alojándose dentro de la corriente de los pesados.

Finalmente, el efecto del tiempo del ciclo, adquirió relevancia. Permitía clasificar el mineral pesado prácticamente en su totalidad, ya que facultó a que las partículas de casiterita percolen entre el fondo de granza y la apertura de la malla.

Otro punto importante a tomar en cuenta es la morfología de partícula. Esta última se analizó cualitativamente mediante la Figura nº 3. La morfología observada de la casiterita fue de caras angulosas y redondas (ver anexo III), relacionándose con los altos porcentaje de recuperación y razón de enriquecimiento según lo analizado por Pita *et al.* (2015).

- **Gráficos de contornos y gráficos de superficie de respuesta %R**

A continuación, se presentarán los gráficos de contorno y de superficie por cada factor con la variable de respuesta recuperación (% R). Luego en la tabla nº 9, se presentará el ANOVA correspondiente a la variable de respuesta %R, para determinar cuáles fueron los parámetros e interacciones que fueron estadísticamente significativas.



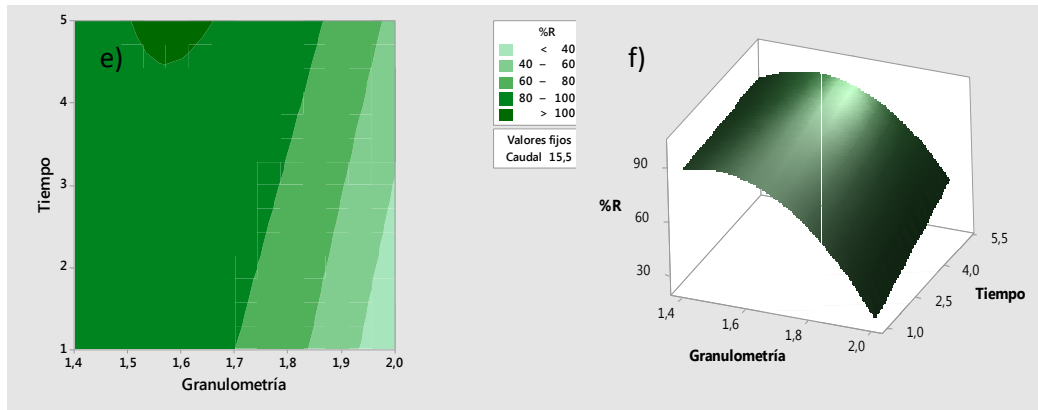


Figura nº 17 . Gráfico de contorno y de superficie para la variable de respuesta %R. a) Gráfico de contorno Caudal de la cámara (l/min) vs tiempo de ciclo (min). b) Superficie de respuesta. Caudal de la cámara (l/min) TC (min) vs. c) Granulometría de alimentación (mm) vs CC (l/min). d) SR. GA (mm) vs TC (min). e) GC. TC (min) vs GA (mm). f) SR. TC (min) vs GA (mm).

Mediante los gráficos de contorno y de superficie de respuesta mostrado en la Figura nº 17 a-b, se observó que valores cercanos a un tiempo de ciclo de 5 min y caudales de cámara de 22 l/min, se garantizó la máxima recuperación durante el proceso de separación mediante el JIG. Por otro lado, en la misma Figura nº 17-b, se detalló que la superficie de respuesta, mantiene el mismo comportamiento que el gráfico de contorno anterior, es decir, el incremento del caudal y el tiempo, favoreció la obtención de altos valores de % R. El punto óptimo estadístico se ubicó igualmente, a los 5 min de TC y 22 l/min de CC.

Luego para analizar el comportamiento de la variable de respuesta % R, variando los niveles de GA y CC, se utilizó la Figura nº 17 c-d. En ellas, se observó que el valor alto de % R se consiguió a un tamaño de partícula pasante 1,7 mm, utilizando todo el rango experimental de los caudales de cámara que se emplearon.

Finalmente, en la Figura nº 17 e-f, se observó el mismo comportamiento que en la figura 17 c-d. El % R más alto, se obtuvo con un tamaño de partícula pasante 1,7mm a diferentes niveles de tiempo de ciclo.

Cabe destacar que, para realizar las gráficas antes expuestas, se realizó previamente un ANOVA con un intervalo de confianza del 95 % (ver Tabla

nº9), para filtrar si los efectos e interacciones entre ellos eran estadísticamente significativos durante el proceso.

En la Tabla nº 9, se observó que las variables que presentaron una significancia estadística fueron aquellas que no superaron el 0,05 del indicador estadístico p.

Tabla nº 9. ANOVA superficie de respuesta y gráficos de contornos para %R.

Efectos	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo de ciclo	783,2	783,23	12,18	0,006
Caudal de la cámara	697,2	697,23	10,85	0,008
Granulometría de alimentación	6604,9	6604,90	102,76	0,000
Tiempo C* Tiempo C	36,2	36,23	0,56	0,470
Caudal C*Caudal C	15,5	15,45	0,24	0,634
Granulometría A *Granulometría A	1503,2	1503,16	23,39	0,001
Tiempo C*Caudal C	166,5	166,53	2,59	0,139
Tiempo C*Granulometría A	371,3	371,28	5,78	0,037
Caudal C*Granulometría A	472,8	472,78	7,36	0,022

Las variables que presentaron significancia estadística, como se puede observar en la Tabla nº 9, fueron: Tiempo de ciclo, Caudal de la cámara, GA*GA (granulometría de alimentación * granulometría de alimentación), tiempo de ciclo * granulometría de alimentación y caudal de cámara * granulometría de alimentación.

- **Gráficos de contornos y gráficos de superficie de respuesta RE**

A continuación, se interpretará el RE, mediante los gráficos de contornos y de superficie, variando los factores a estudiar. Luego en la Tabla nº 12, se presentará el ANOVA correspondiente a la variable de respuesta RE, para determinar cuáles fueron los parámetros e interacciones que son estadísticamente significativos.

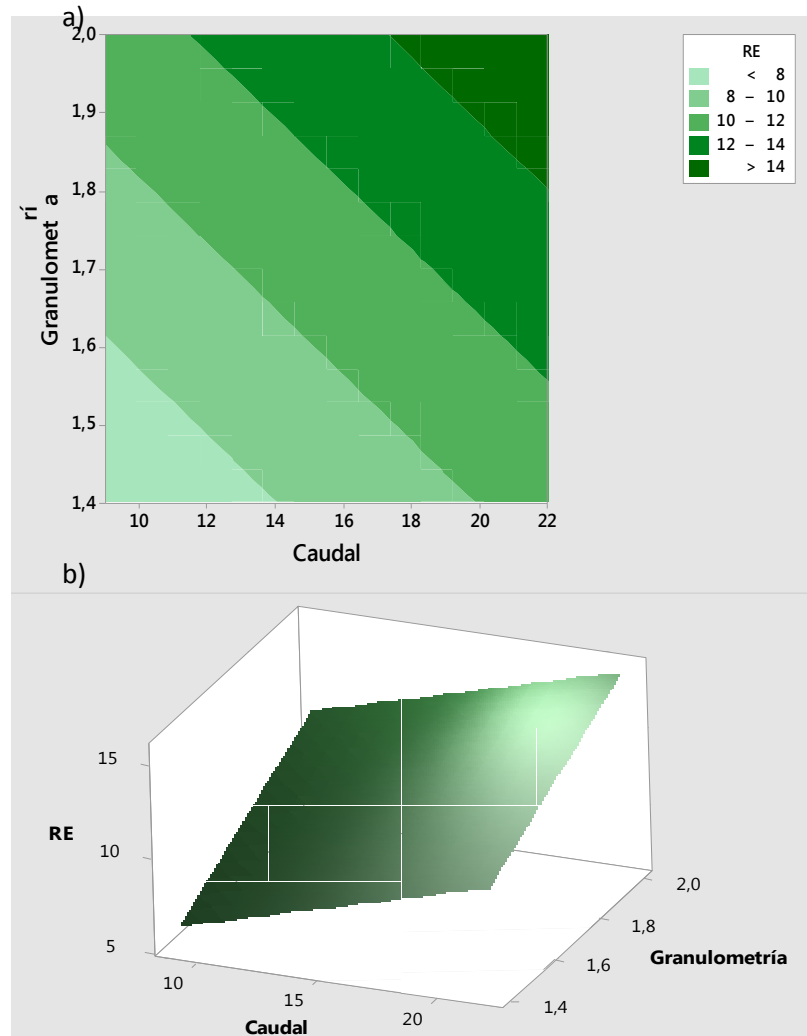


Figura nº 18. Gráfico de contorno y de superficie para la variable de respuesta RE. a) Gráfico de contorno. Caudal de la cámara (l/min) vs tiempo de ciclo(min). b) Superficie de respuesta. Caudal de la cámara (l/min) vs tiempo de ciclo(min). c) GC (mm) vs tc (min). d) SR. GA(mm) vs TC(min). e) GC CC (l/min). f) SR CC (l/min) vs GA(mm).

En la Figura nº 18 a-b se detalló el correspondiente gráfico de contornos y superficie de respuesta para la variable dependiente RE. En ambos gráficos, se indicó que, para asegurar valores altos de RE, se necesitaron caudales de cámara de 22 l/min y GA pasante a 2 mm.

En la Tabla nº 10, se indicó el ANOVA para la variable de respuesta RE con un intervalo de confianza del 95 %. Donde se observó que sólo las variables estadísticamente significativas fueron aquellas que no superaron el 0,05 del indicativo estadístico p.

Tabla nº 10. ANOVA. superficie de respuesta y gráficos de contornos para RE

Efectos	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo de ciclo	0,233	0,2328	0,04	0,836
Caudal de la cámara	50,006	50,0057	9,65	0,011
Granulometría de alimentación	59,473	59,4734	11,48	0,007
Tiempo C* Tiempo C	16,665	16,6650	3,22	0,103
Caudal C*Caudal C	0,239	0,2391	0,05	0,834
Granulometría A *Granulometría A	0,420	0,4202	0,08	0,782
Tiempo C*Caudal C	8,036	8,0364	1,55	0,241
Tiempo C*Granulometría A	0,001	0,0010	0,00	0,985
Caudal C*Granulometría A	15,279	15,2789	2,95	0,117

Los factores que presentaron significancia estadística, como se detalla en la Tabla nº 10, fueron las siguientes: Caudal de cámara, granulometría de alimentación.

- **Herramientas estadísticas para la evaluación de los efectos de las variables estudiadas. Gráfico de Daniel y diagrama de Pareto**

A continuación, se presentarán las gráficas de Daniel y Pareto, las cuales son las herramientas estadísticas que ayudan a determinar gráficamente si los efectos de las variables o factores a estudiar son estadísticamente significativos.

Los efectos de los factores y de sus interacciones se ven reflejados en la Figura nº19 a-b. La variable C, la cual representó la granulometría de alimentación, presentó un efecto estadísticamente negativo en la variable de respuesta, es decir, al aumentar las granulometrías de alimentación, los porcentajes de recuperación disminuyen, lo que indicó que la separación no fue efectiva en virtud del criterio de concentración.

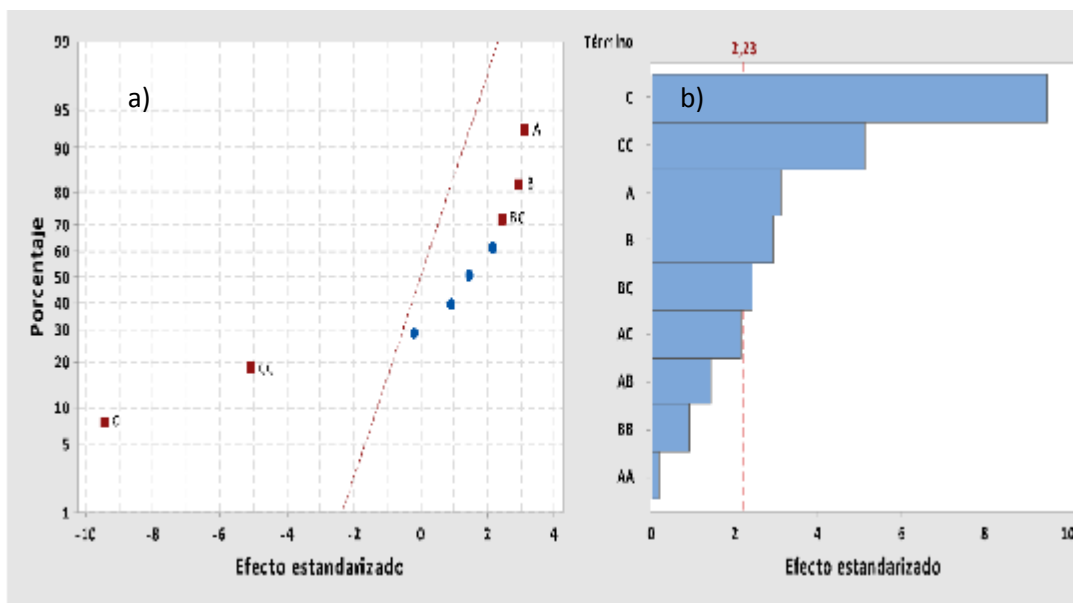


Figura n° 19 . Análisis estadístico. a) Gráfico de Daniel para la respuesta %R. b) Gráfico de Pareto para la respuesta %R con un α 0,05 para ambas gráficas.

En cuanto a la variable cuadrado CC ($GA*GA$), presentó un efecto negativo sobre la variable de respuesta (ver Figura n° 19-a). Dicho efecto se traduce a que el comportamiento del proceso de recuperación no fue lineal al variar la granulometría.

Finalmente se filtraron los variables que no presentaron una significancia estadística, tal y como se explicó en la Tabla n° 9 y 10. El nuevo ANOVA para la variable de respuesta % R se muestra en la Tabla n° 11.

Tabla n° 11. Nuevo ANOVA superficie de respuesta y gráficos de contornos para %R.

Efectos	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo de ciclo	783,2	783,22	12,00	0,004
Caudal de la cámara	697,2	697,23	10,68	0,006
Granulometría de alimentación	6604,9	6604,90	102,76	0,000
Granulometría A *Granulometría A	2912,5	2912,49	44,61	0,000
Tiempo C*Granulometría A	371,3	371,28	5,69	0,033
Caudal C*Granulometría A	472,8	472,78	7,24	0,019

Este ANOVA, arrojó los siguientes indicadores estadísticos: $R^2 = 93,31\%$, $R^2_{aj} = 90,22\%$.

A continuación, se presentarán el gráfico de Daniel y diagrama de Pareto para la variable de respuesta de razón de enriquecimiento.

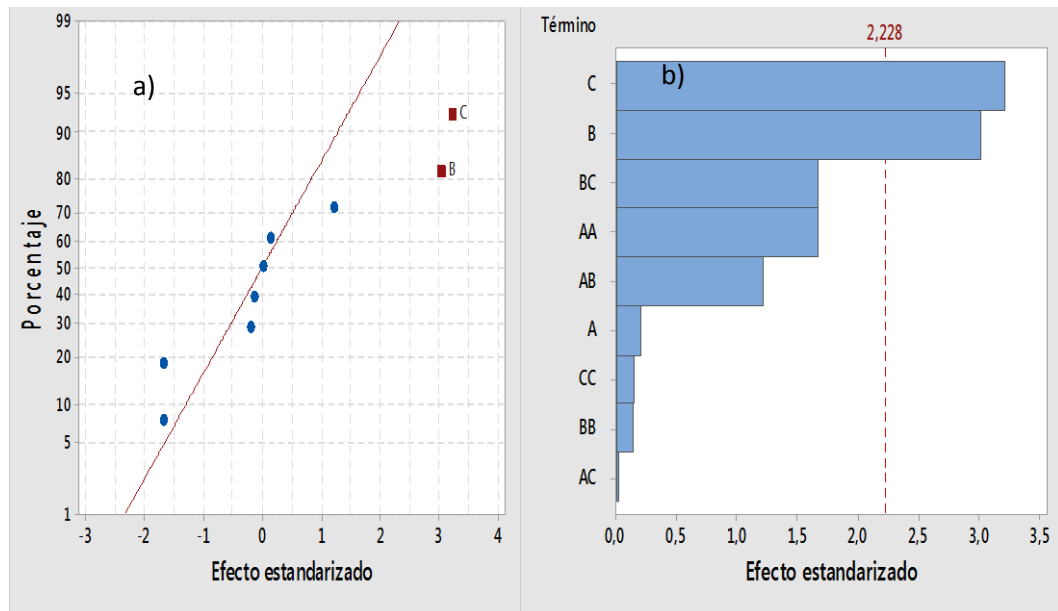


Figura nº 20. Análisis estadístico. a) Gráfico de Daniel para la respuesta RE. b) Gráfico de Pareto para la respuesta RE con un α 0,05 para ambas gráficas.

En la Figura nº 20, se detallan el gráfico de Daniel y el diagrama de Pareto para la variable de respuesta RE. En este caso, solo se observó que 2 factores estudiados presentaron efectos estadísticamente significativos y además positivos. Estos efectos fueron C (granulometría de alimentación) y B (caudal de la cámara).

El efecto de la granulometría de alimentación para la variable de respuesta RE, fue la más importante, debido a que, al aumentar el tamaño, el RE aumentó. Así mismo, el caudal de la cámara permitió un incremento del RE.

Finalmente, después de realizar el tratamiento de filtrar los efectos, tal y como se explicó en la Tabla nº 9 y Tabla nº 10. El nuevo ANOVA para la variable de respuesta RE, se presentó en la Tabla nº 12.

Tabla n° 12. Nuevo ANOVA para la variable de Respuesta RE.

Efectos	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Caudal de la cámara	50,006	50,0057	9,66	0,006
Granulometría de alimentación	59,473	59,4734	11,49	0,003

En la tabla n°12 se observa el ANOVA para la variable de respuesta RE. Los indicadores estadísticos arrojados por el ANOVA detallado en la Tabla n° 12, fueron $R^2 = 51,10\%$ y $R^2_{aj}=45,35$.

Los investigadores Kumar *et al.* (2015) y Tripathy *et al.* (2016), reportaron indicadores estadísticos de $R^2 =$ de 0,99 en sus investigaciones sobre la concentración gravimétrica del carbón. Los R^2 obtenidos en este trabajo especial de grado es ubicaron por debajo de los reportados en la antes mencionada. Sin embargo en esta investigación, el mejor R^2 fue de 93,31%, que se obtuvo para la variable de respuesta de % R.

4.4-Optimización de las variables con mayor grado de incidencia en el proceso de concentración con respecto a las variables de respuestas

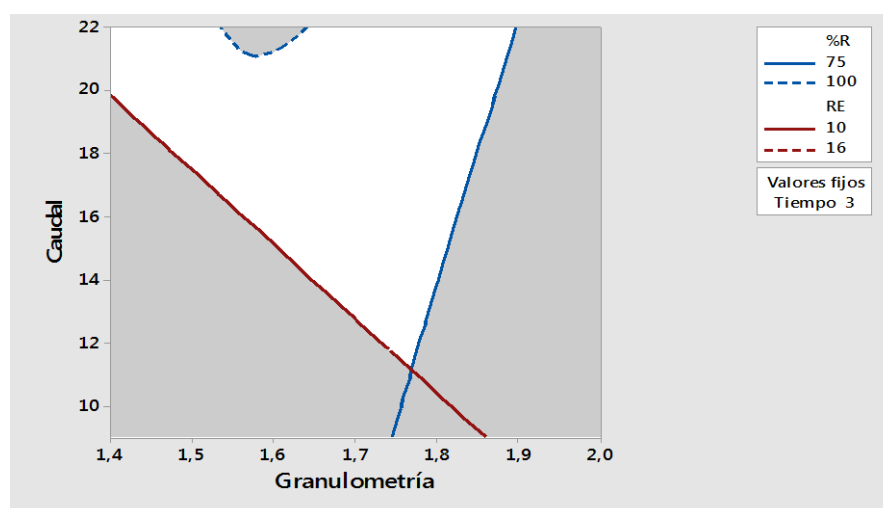


Figura n° 21. Interfaz del software estadístico para optimizar la variable de respuesta %R y RE. Caudal da la cámara (l/min) vs granulometría de alimentación(mm).

La Figura nº 21, representa un gráfico de contorno, que se intersectó aplicando el método gráfico, donde las líneas azules continuas representaron la respuesta del 75 % de recuperación, mientras que la línea azul discontinua correspondió a una recuperación del 100 %. Por otro lado, las líneas rojas continuas representan un valor de 10 en razón de enriquecimiento y las discontinua 16 respectivamente. Estos intervalos fueron seleccionados en virtud a que más de la mitad de los tratamientos registraron valores de porcentaje de recuperación y razón de enriquecimiento en esos intervalos (ver Tabla nº 8). A su vez estas líneas representaron valores óptimos individuales, y la intersección de estas representaron un valor óptimo simultáneo (solución compromiso) (ver capítulo II sección 2.1.1).

Para el caso de la Figura nº 21, se observó que la granulometría de alimentación debe de estar entre (1,6-1,8) mm y se pueden utilizar intervalos de caudales de cámara de 14 a 20 l/min para el tipo de mezcla mineral utilizada. Ambas condiciones operativas generan una zona de solución de compromiso para las variables respuesta.

- **Ecuaciones de regresión lineal para las variables de respuestas**

A continuación, se presentarán las ecuaciones de regresión lineal para la variable de respuesta % R y RE respectivamente, mediante las cuales se van a evaluar los factores óptimos estadísticos reportados en la Figura nº 21, estos últimos se encuentran delimitados en las zonas de intersección.

$$R\% = -412 - 14,88 A - 5,42 B + 731 C - 268,2 C^2 + 11,35 AC + 3,94 BC \quad (ec 17)$$

$$RE = -6,33 + 0,344 B + 8,13 C \quad (ec 18)$$

Donde:

A= Tiempo de ciclo (min)

B= Caudal de la cámara (l/min)

C= Granulometría de alimentación (mm)

Tabla nº 9. Valores de las variables de respuestas con los factores estudiados optimizados.

solución	Tiempo de ciclo (min)	Caudal de la cámara (l/min)	Granulometría de alimentación (mm)	% R	RE
1	1	14	1,5	85,8	10,68
2	2	15	1,6	88,1	11,83
3	3	16	1,7	88,4	13
4	4	17	1,8	86,6	14,15
5	5	18	1,9	82,7	15,31

En la Tabla nº 15 se observan los valores de las variables de respuestas (%R, RE) y los valores óptimos de los factores a estudiar (tiempo de ciclo, caudal de cámara y granulometría de alimentación). Los cuales se obtuvieron al evaluar las condiciones óptimas establecidas en la Figura nº 21.

En dicha Tabla, se apreció que la solución 3, con las condiciones experimentales de 3 min de tiempo de ciclo, 16 l/min de caudal en la cámara, y de granulometría de alimentación de 1,7mm es la mejor solución compromiso (ver capítulo II sección 2.2.1).

Todas las soluciones obtenidas mediante la ecuación 17 y 18 reflejaron que se pueden conseguir altos valores de porcentaje de recuperación y de razón de enriquecimiento, con las condiciones establecidas, tal y como lo expuso São Jose *et al.* (2017).

Este último planteamiento permite dar la idea que un sólo JIG, se puede realizar concentración gravimétrica en una sola operación, donde tenga un concentrado de buena calidad con bajo estéril.

- **Validación del modelo estadístico**

A continuación, se validará el modelo estadístico, interpretando los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia. Para ello se utilizarán las Figura nº 22 a-b, 23 a-b y 24 a-b.

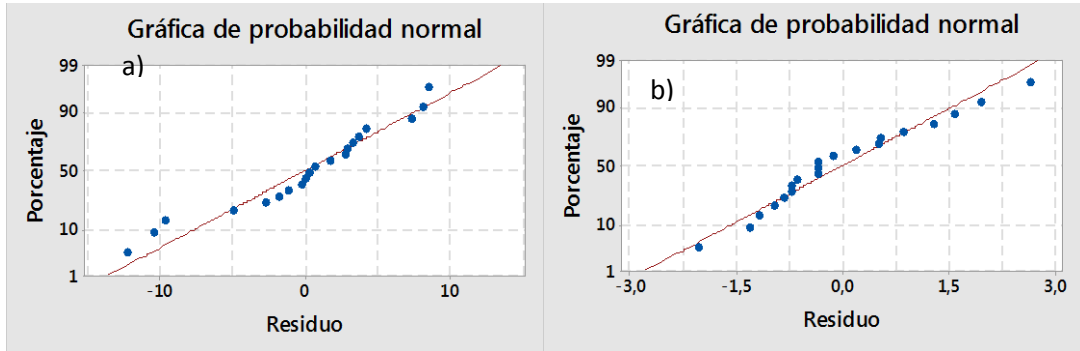


Figura nº 22 .a) Gráfica de probabilidad normal vs residuos para %R. b) Gráfica de probabilidad normal vs residuos para RE.

La Figura nº 22, permitió verificar el supuesto de normalidad. Se observaron que los puntos graficados están distribuidos a lo largo de la línea de normalidad (Gutierrez y De La Vera 2008), tanto en la Figura nº 22-a-b. Esto indicó que el modelo no está sesgado y se adecuó para describir el comportamiento del proceso de concentración empleando corrientes ascendentes pulsatorias con los factores de tiempo de ciclo, caudal de cámara y granulometría de alimentación.

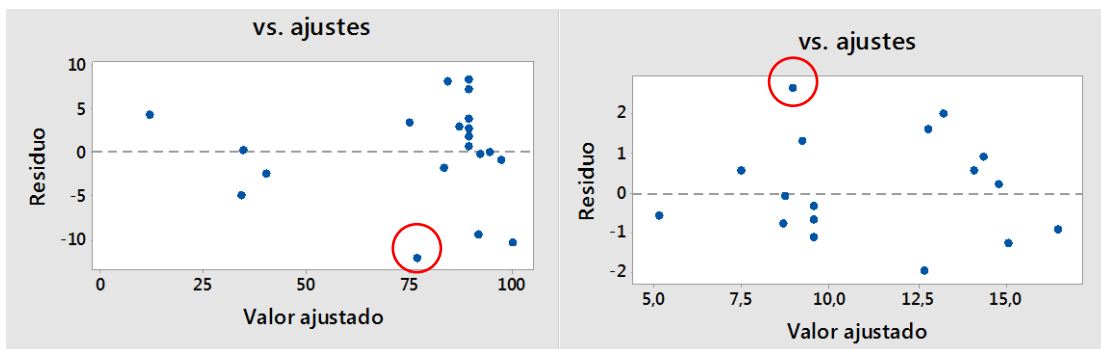


Figura nº 23. a) Gráfica de residuos vs valor ajustado para %R. b) Gráfica de residuos vs valor ajustado para RE.

La Figura nº 23 a-b, detalló el supuesto de normalidad, el cual se cumplió. En vista que no se observó un patrón definido o tendencia sobre los

puntos reflejados sobre la línea central de tendencia. Sin embargo, se presentó un punto residual atípico en ambas gráficas, el cual no se considera suficiente para que no se cumpla dicho supuesto.

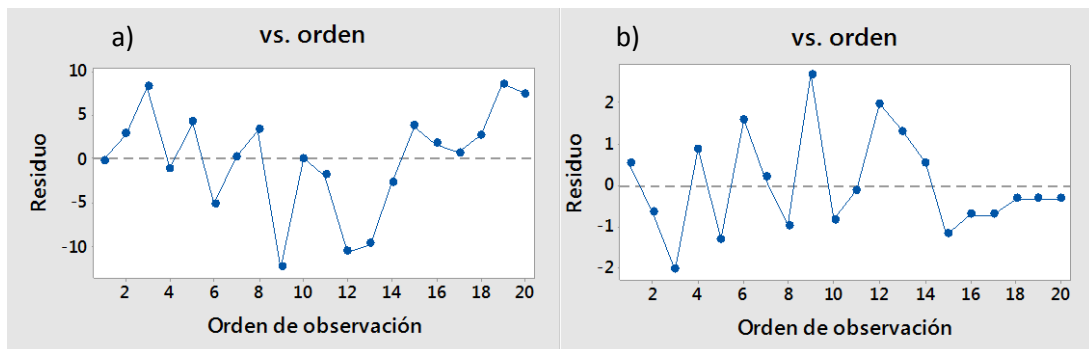


Figura nº 24 .a) Gráfica de residuos vs orden de observación para %R. b) Gráfica de residuos vs orden de observación para RE.

La Figura nº 24 a-b, permitió verificar el supuesto de independencia entre los ensayos. Al igual que el caso anterior, no se observó ninguna tendencia en los puntos graficados (ver la Figura nº 24). No obstante, se apreció un residual atípico en ambas gráficas, pero esto no es suficiente para violar el supuesto de independencia en los tratamientos.

Los criterios para analizar las Figuras nº 23 a-b y 24 a-b, fueron expuesta por Gutierrez y De La Vera (2008).

CONCLUSIONES

- Se identificaron los parámetros de una criba hidráulica, los cuales se dividen en operativos y de mineral.
- El diseño experimental central compuesto, permitió construir la matriz de diseño con los factores a estudiar con sus respectivos niveles.
- El tratamiento 4 reportó un % R= 96,5 %, a las condiciones de 5 minutos de tiempo de ciclo, 22 l/min de caudal de cámara y una granulometría de alimentación de (+1,40 -1,68) mm.
- El tratamiento 5 arrojó el menor valor de % R (13,7), bajo los siguientes parámetros: 1 min de TC, CC de 9 l/min y GA de (+3,36 -2) mm.
- El tratamiento 8 generó un alto RE (15,50) con los parámetros de 5 min de TC, CC 22 l/min y GA (+2 -3,36) mm. Por el contrario, el tratamiento 2, dio un bajo RE (4,5) mediante las condiciones de TC 1 min, CC de 9 l/min y GA (+1,4 -1,68) mm.
- La granulometría de alimentación presentó un efecto estadísticamente negativo en la variable de respuesta de %R, mientras que el tiempo de ciclo y caudal de cámara fueron estadísticamente significativos para él %R.
- La variable de respuesta razón de enriquecimiento, la granulometría afecta significativamente sobre la RE al igual que el caudal de la cámara.
- La condición óptima estadística se alcanzó con los parámetros de 16 l/min de CC y una GA de 1,7mm. Alcanzado un % R de 88,40 y una RE igual a 13.
- Se verificó el modelo estadístico aplicando y analizando el criterio de los residuos (supuesto de normalidad, varianza constante e independencia) y se llegó a la conclusión de que se cumplió de forma satisfactoria.

RECOMENDACIONES

Una vez desarrollado el presente trabajo de investigación, se proponen dos propuestas como recomendaciones, encausadas en los siguientes ámbitos.

Equipo JIG

- Instalar un variador de revoluciones, para ampliar el intervalo de pulsaciones del equipo.
- Elaborar un proceso de mantenimiento que permita el acceso a piezas críticas.
- Elabora un proceso de calibración eficiente para el equipo.

Académicos

- Modificar las proporciones de la mezcla de minerales, factores a estudiar y controlables, para analizar el comportamiento estadístico de las variables de respuestas antes investigadas.
- Comparar el modelo estadístico de diseño central compuesto en la criba hidráulica a escala de laboratorio, para evaluar si el comportamiento estadístico se aproxima a las cribas a escala piloto e industriales.
- Analizar la hidrodinámica de las partículas dentro de la cámara del JIG, mediante elementos finitos, variando las condiciones estudiadas en este trabajo especial de grado.
- Utilizar otro modelo estadístico como el Box-Behnken empleando los parámetros y variables de respuestas aplicados en este TEG.
- Variar otros parámetros, para analizar el comportamiento de los mismo de las variables de respuestas antes investigadas.
- Utilizar otras mezclas que presenten otro criterio de concentración, para analizar la influencia de las mismas empleadas en la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Bustamente et al (2008) I.M Cemex Concentración De Minerales Colombia: Universidad Nacional
- Concha(2007) Estudio De La Concentración Gravimétrica De Minerales Auríferos En Un Jig De Laboratorio(Tesis de Pregrado) Universidad Del Valle, Colombia
- Cho(2007) Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness and Strength–Natural and Crushed Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(11) 1474-1474
- De São Jose(2017) Combination of gravity concentracion variables to increase the productivity of the Brucutu mineral processing plant. Journal of Materials Research and Technology, 7(2) 164-158
- Hori(2006) Optimun wáter pulsation of jig separation for crushed particles. International Journal Of Mineral Processing 92(3,4) 108-103.
- Gupta, D.S Yan (2006) Mineral Processing Desing and Operation an Introducción. Elsevier.
- Gutierrez y De La Vera(2008) Análisis y Diseño de Experimentos. Mexico: McGraw- Hill Interamericana
- Kumar(2015) Performance analysis of jig of coal cleaning using 3D response surface methodology. International Juornal of Mining Science and Tecnology, 27(2) 337-333

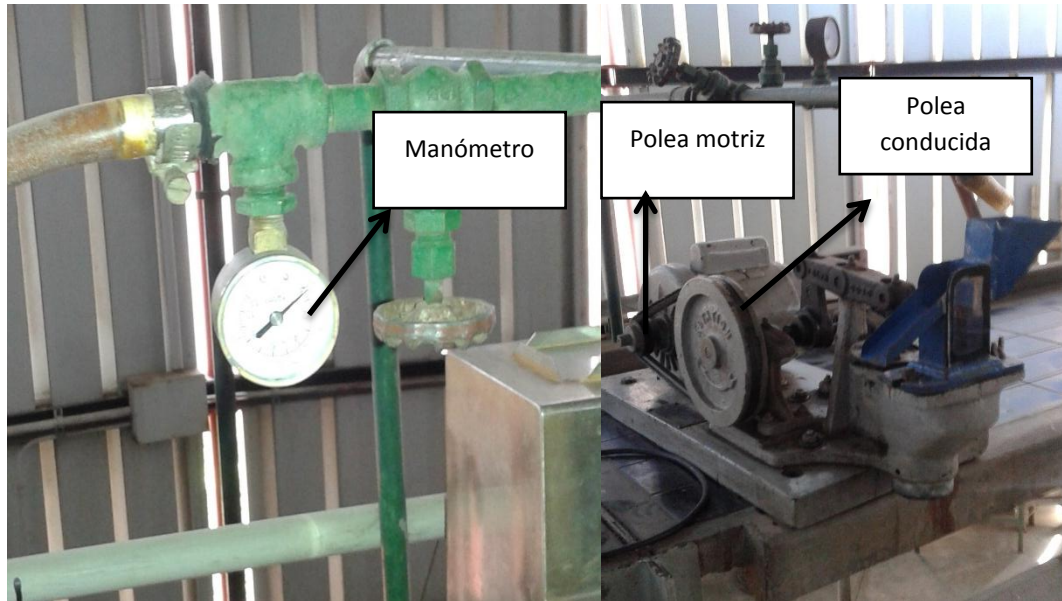
- Kumar(2012) Análisis De La Respuesta De Separación En El Equipo De Separación Kelsey Para El Procesamiento De Carbon Fino. Fuel Processing Technology 115 78-71
- Mahmoud (2010) Optimization of jigging process using statistical technique. Journal of Engineering Sciences, 38(3) 818- 807
- Mongomery D (2004) Diseño y Análisis de Experimentos. México: Editorial Limusa S.A
- Ospina M. (2014) Modelamiento de la hidrodinámica de la separación gravimétrica de minerales en Jigs. Unversidad Nacional de Colombia, Facultad de Materiales y Minas. Medellin Colombia.
- Ospina M. (2014) Estudio hidrodinámico de equipos de concentración gravimétrica tipo JIG. Unversidad Nacional de Colombia, Facultad de Materiales y Minas. Medellin Colombia.
- Pita (2015) Influence of shape and size of the particles on jigging separation of plastics mixture. Waste Managment, 48 94-89
- Sampio(2006) Beneficio Del Carbón De La Mina Candiota Usando Un Jig Neumático. Fuel Processing Technology, 89 (2) 202-198
- Taggart(1966) Elementos De Preparación de Minerales. Madrid: Ediciones interciencia
- Tripathy (2014) Stastitical optimization study of jigging process on beneficiation of fine size high ash Indian Non-coking coal. Advanced Powder Tecnology 27(4) 1224-1219
- Wills(1988), *Tecnología De Procesamiento De Minerales*. México: Lumisa Noriega Editores

ANEXO

ANEXO I Inspección visual del del equipo

a. Medición del caudal de la cámara, r.p.m del motor, pulsaciones por minuto y amplitud

- Colocar un recipiente previamente rotulado en litros (l) en la salida de la cámara del JIG.
- Abrir la llave de paso de agua que suministra el fluido a la cámara.
- Mediante el manómetro que se ubica en la tubería de agua hacia la cámara, se registra presión de agua.
- Asociar la presión del agua en la tubería con el caudal que se va utilizar.
- Registrar el tiempo que tarda en llenar un volumen específico.
- **Conteo de las r.p.m.**
- se utiliza un software para bajar la velocidad de video.
- Contar las vueltas que da la polea que es accionó el motor utilizando el software.
- Utilizar la ecuación (19), para calcular las **pulsaciones por minuto.**
- **La amplitud o carrera del embolo**
- Llenar la cámara de agua.
- Colocar el vernier frente a la pantalla de acrílico.
- Fijar las mordazas inferiores haciendo que este sea el cero con respecto al nivel del agua y la superior que esté por encima del nivel del agua.
- Encender el equipo.
- Registrar el desnivel del nivel de agua.



Criba hidráulica (JIG) 1. a) Manómetro instalado en el equipo. b) Poleas de motriz y polea conducida.

$$N1xD1 = N2xD2 \quad (ec\ 19)$$

Donde:

N1= revoluciones de la polea 1

D1= diámetro de la polea 1

N2= revoluciones de la polea 2

D2= diámetro de la polea 2

ANEXO II Preparación y caracterización física de los minerales para los ensayos del diseño experimental MSR

- a. Reducción de tamaño:** se procedió a realizar una reducción de tamaño (trituración primaria) del mineral B mediante una trituradora de mandíbula (11 x 14) cm, y apertura de salida de 2,54cm. Luego se realizó una trituración secundaria con un equipo de rodillos lisos $\varnothing=9''$ (22,86cm), con una distancia de 2mm.



Trituradora de mandíbula (11 x 14) cm. b) trituradora de rodillo lisos Ø=9"(22,86cm). Laboratorio de beneficio mineral UCV.

- b. Distribución granulométrica:** se procedió a tamizar tanto el mineral A y el B por la series de tamices ASTM E-11-4 N° 6(3,36mm), N° 2 (2mm), N° 12(1,70mm) y N°14(140mm), y se separó las fracciones retenidas por cada tamiz.



Serie de tamices ASTM E-11-4.

c. Análisis de Difracción de Rayos X

Se tomó una muestra de 30g de ambos minerales A y B, los cuales se pulverizaron para colocarlos por separado en el equipo de DRX Phillips-binay(scan) con una lámpara de ánodo de Cu, a un α 1,54 Å y un ángulo de barrido de 2θ . El laboratorio está ubicado en el Laboratorio de Geología y Geoquímica de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica,



Equipo de Difracción de rayos X.

d. Determinación de peso específico y densidad: se procedió según la norma COVENIN 2224-84 Materiales. Determinación de la gravedad específica real por inmersión en agua.

- Mediante la ecuación 21, se procedió a calcular la gravedad específica tanto del mineral A y B.

$$G = \frac{(W - P)}{(W1 - P) - (W2 - W)} \quad (ec\ 21)$$

Donde=

G = gravedad específica

W = peso del picnómetro vacío (g)

W1 = peso del picnómetro lleno de agua (g)

W2= peso del picnómetro, muestra más agua (g)

- Para calcular la densidad absoluta del mineral A y B por separado, se multiplicó la gravedad específica del mineral A y B por la densidad absoluta del agua a una temperatura en °C a la cual se realizó el experimento, es decir:

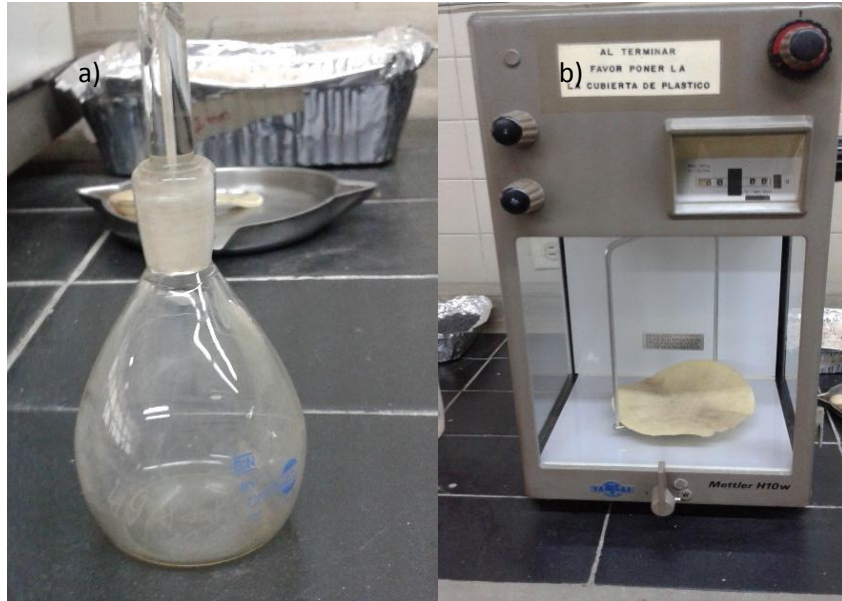
$$\rho = G \times \rho_t(\text{agua}) \quad (\text{ec } 22)$$

Donde=

G= gravedad específica

ρ_t (H₂O) = densidad del agua a la temperatura a la cual se realizó el ensayo (kg/m³)

Los ensayos se realizan por triplicado.



a) Picnómetro de $\varnothing = 8\text{mm}$ de 50cm^3 de capacidad. b) Balanza de platillo Mettler H10W de capacidad (160+/-0,0001) g.

e. Morfología

Se Realizó un cuarteo del mineral por cada fracción, y seleccionó una muestra de 50g, se extendió sobre un papel milimetrado de 2 mm x 2 mm, para realizar la descripción de los mismos mediante una lupa óptica de Zeiss Stemi SV 6 a un aumento de 10X, ubicado en el Laboratorio de Geología y Geoquímica de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica,



Lupa óptica.

f. Calculo de densidad del fondo de granza y masa de volumen de fondo de granza

Se realizó el pesado de una esfera del fondo de granza por triplicado, luego se midió el radio de las esferas por triplicado mediante el vernier, y se utilizó la ecuación (19).

Se colocó una cama de fondo de granza, de tal forma que quede lo más homogénea posible.

- **ANEXO III Caracterización de minerales a utilizar y fondo de granza Para realizar las corridas en frio**

a. Corridas con material y mineral para ensayos exploratorios

Se realizará una corrida con material esférico de tipo polímero de diferentes diámetros, en mezclas 1:1.

Para medir la densidad del material esférico, se procedió a pesar una fracción, una a una, se registró el peso, y luego se registra el radio con el vernier, se realizó por triplicado, por último se utiliza la ecuación (19) . La finalidad fue observar la hidrodinámica de las partículas, previo a la caracterización física del material y mineral a utilizar en este estudio.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{ec 20})$$

Donde

ρ = densidad absoluta(g/cm³)

m= masa (g)

v= volumen (cm³)



Distintos materiales en corridas en frio

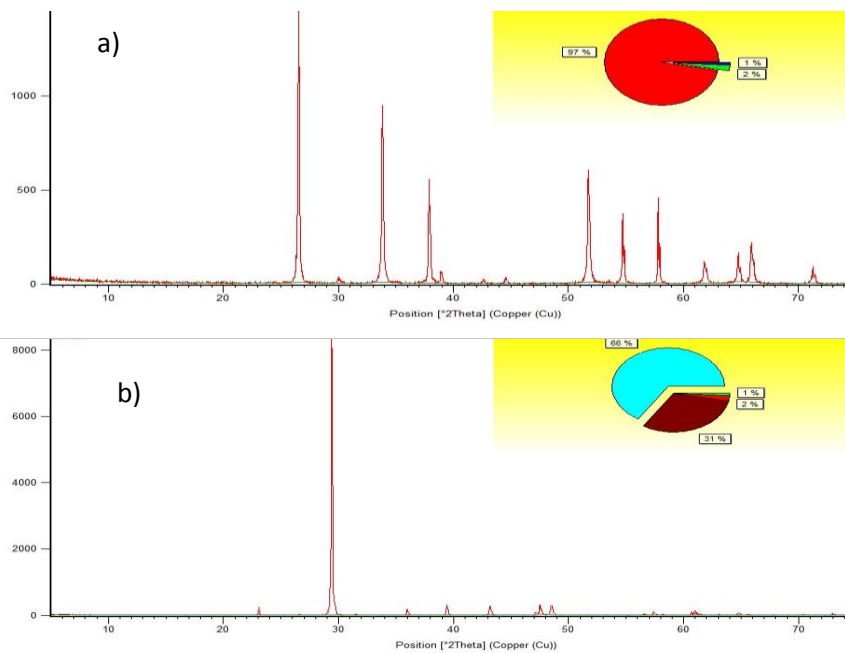
Para los ensayos, se realizaron corridas con el mineral A y B, mezclas 1:1, que mediante a los pasos siguiente, se explicarán cómo se van a caracterizar para la realización de la metodología de superficie de respuesta. Pero previo a generar la superficie de respuesta, se realiza un ANOVA de un factor, para corroborar parte de la teoría investigada anteriormente en el capítulo II.

Se pondrá operativo el equipo a variando el caudal de la cámara sin ningún mineral o mezcla de material. Lo que permitió el diagnóstico del equipo con respecto a su funcionamiento mecánico.

Densidades de los minerales A y B después de aplicar la norma COVENIN 2224-84

Mineral	Densidad (g/cm ³)
Mineral A	6,9982 +/- 0,03891
Mineral B	2,6224 +/- 0,04883
criterio de concentración de acuerdo a la ecuación(1)	3,70
Valor reportado por Gupta (2006)	3,5

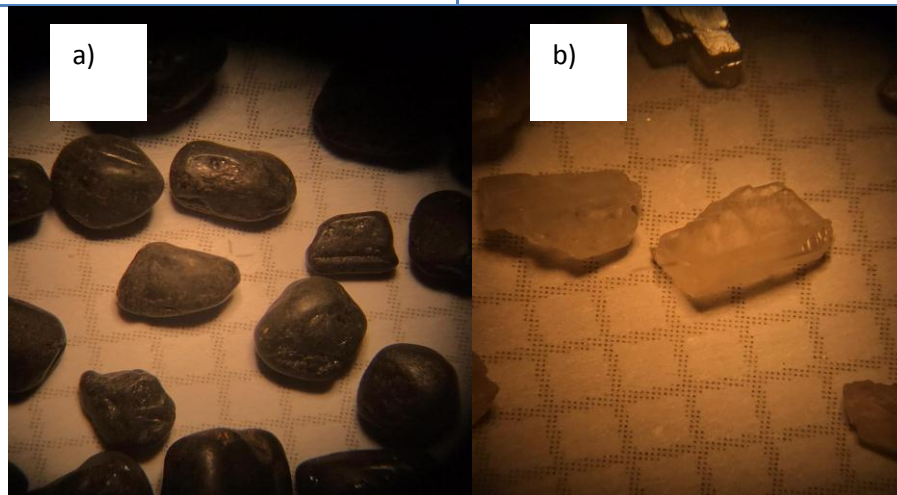
Difracción de rayos X, se identificó ambos minerales



Difracctograma. a) Difracción de rayos x del mineral A. b) Difracción de rayos x del mineral B

Casiterita	Calcita
(SnO ₂) con un 63%	Calcita con un 54%,
(Fe) 17%	cuarzo(13%)
Ferrocolumbita (5%).	

Mineral	Morfología
a) Casiterita	tipo granular, con las aristas redondeadas y algunas angulosas y el color que presentó la casiterita fue de un gris mate
b) Calcita	morfología tabular de color blanco opaco.

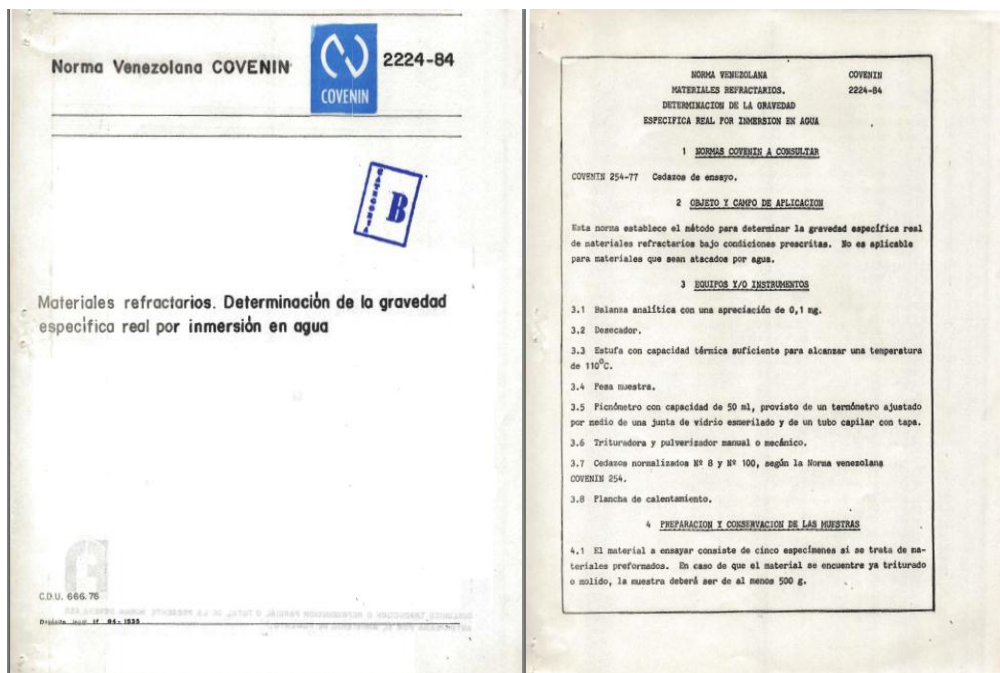


Morfología de los minerales utilizados. a) Casiterita SnO₂ b) Calcita CaCO₃



Fondo de granza $\varnothing = (6,00 \pm 0,01)$ mm masa $c/u = (0,8307 \pm 0,001)$ de densidad $(7,3296 \pm 0,6474)$ g/cm³

- **ANEXO IV Norma utilizada para el cálculo de densidad del mineral**



Anexo Norma Covenin 2224-85

/2

4.2 De cada espécimen preformado que constituye la unidad de muestreo, previamente quebrantado, se extraen dos o más trozos, de tamaño aproximado de 30 mm de diámetro y de diferentes lugares del mismo, excluyendo los trozos que tengan parte de las superficies originales.

4.3 Se trituran los trozos hasta que pase el cedazo COVENIN N° 8 (2,38 mm). Se mezcla vigorosamente el material triturado y se reduce por cuarteo hasta obtener una muestra para ensayo de 50 g.

4.4 Si el material a ensayar se encuentra ya triturado o molido, la muestra se mezcla vigorosamente y se reduce por cuarteo hasta obtener una muestra para ensayo de 50 g.

4.5 Se pulveriza la muestra para ensayo hasta que pase el cedazo COVENIN N° 100 (149 μ). Se deberán tomar precauciones para evitar la contaminación de la muestra. Se remueve cualquier material magnético introducido durante la trituración y molienda mediante un imán. No se deberá excluir cualquier trozo de la muestra que sea dificultoso de triturar o pulverizar.

4.6 Se transfiere la muestra de 50 g a un peso muestra con tapa de vidrio esmerilado y se seca hasta peso constante a una temperatura entre 105 y 110°C. La tapa de vidrio del peso muestra se deja entreabierta para facilitar la eliminación de la humedad. Luego se tapa y se coloca en un desecador.

5 PROCEDIMIENTO

5.1 Se coloca el picnómetro en una estufa a una temperatura entre 105 y 110°C, se deja enfriar en un desecador y se pesa en una balanza analítica. Luego se registra el peso del picnómetro vacío como P.

5.2 Se llena el picnómetro con agua destilada a temperatura ambiente (20 \pm 5°C), la variación de temperatura durante el ensayo no deberá ser mayor de 0,5°C. Se coloca el termómetro en el picnómetro, observándose un flujo de agua a través del capilar. Se elimina el exceso de agua del extremo del capilar, de tal manera, que no se extraiga agua del mismo. Se

/3

coloca la tapa sobre el tubo capilar, y se seca toda porción de agua adherida a la parte externa del picnómetro, se pesa y se registra este valor como W₁.

5.3 Se vacía el picnómetro y se seca nuevamente a una temperatura comprendida entre 105 y 110°C. Se transfiere de 5 a 10 g de la muestra a ensayar en el picnómetro seco, se tapa, se pesa y se registra el peso como W. Se llena el picnómetro desde un cuarto a un medio de su capacidad con agua destilada, se lleva a ebullición durante 10 a 15 min. La ebullición deberá ser suave para evitar pérdidas de la muestra debido al burbujeo. Es aconsejable colocar una delgada cinta de papel con la tapa del capilar antes de comenzar a calentar el agua. Después de la ebullición, se llena el picnómetro con agua destilada, se enfría a temperatura ambiente t, en un baño de agua, se coloca el termómetro, se elimina el exceso de agua del extremo del tubo capilar, se coloca nuevamente la tapa, y se seca bien el picnómetro. Se pesa finalmente el picnómetro y su contenido y se registra el peso como W₂.

5.4 Se hace un ensayo por duplicado de la muestra de 50 g. Todas las pesadas se deberán hacer con una apreciación de 0,1 mg.

6 EXPRESION DE LOS RESULTADOS

6.1 CALCULOS

Se calcula la gravedad específica real utilizando la siguiente expresión:

$$GER_{t/t'} = \frac{W - P}{(W_1 - P) - (W_2 - W)}$$

Donde:

GER = Gravedad específica real

t = Temperatura del material, expresado en °C

t' = Temperatura del agua, expresado en °C

P = Peso del picnómetro, expresado en g

W = Peso del picnómetro y la muestra, expresado en g

W₁ = Peso del picnómetro lleno de agua, expresado en g

Anexo Norma Covenin 2224-85

/4

W₂ = Peso del picnómetro, muestra y agua, expresado en g.

6.2 Las dos determinaciones se deberán registrar con dos decimales. Si los valores obtenidos discrepan entre sí en más de 0,03, el ensayo se deberá repetir.

NOTA: Si se desea obtener el valor de la densidad real, se multiplica por el valor de la densidad específica del agua a temperatura de ensayo (t') (Ver Tabla 1).

TABLA 1 Densidad de agua como función de temperatura entre 15 y 30°C

Temperatura (°C)	Densidad (g/cm ³)
15	0,999 099
16	0,998 943
17	0,998 774
18	0,998 595
19	0,998 405
20	0,998 203
21	0,997 992
22	0,997 770
23	0,997 538
24	0,997 296
25	0,997 044
26	0,996 783
27	0,996 512
28	0,996 232
29	0,995 946
30	0,995 646

7 INFORME

7.1 El informe debe contener lo siguiente:

7.1.1 Ensayo realizado según la Norma Venezolana COVENIN 2224.

7.1.2 Fecha de realización del ensayo.

7.1.3 Identificación de la muestra.

/5

7.1.4 Temperatura del agua.

7.1.5 Peso de la muestra utilizada.

7.1.6 Se reportan los resultados individuales y el promedio de las dos determinaciones.

BIBLIOGRAFIA

ASTM C 135-76 Standard Test Method for True Specific Gravity of Refractory Materials By Water Immersion.

COPANT 381 Materiales Refractarios. Método de Determinación del Peso Específico Real.

Temperatura (°C)	Densidad (g/cm ³)
15	0,999 099
16	0,998 943
17	0,998 774
18	0,998 595
19	0,998 405
20	0,998 203
21	0,997 992
22	0,997 770
23	0,997 538
24	0,997 296
25	0,997 044
26	0,996 783
27	0,996 512
28	0,996 232
29	0,995 946
30	0,995 646

BIBLIOGRAFIA

ASTM C 135-76 Standard Test Method for True Specific Gravity of Refractory Materials By Water Immersion.

COPANT 381 Materiales Refractarios. Método de Determinación del Peso Específico Real.

Anexo Norma Covenin 2224-85

Anexo V Ensayos exploratorios y observaciones

a. Inspección del equipo

Nombre del equipo	
Motor	Operativo
Diafragma	Operativo
Embolo	Operativo
Malla	Operativo
Bomba	Operativo
Cámara	Operativo
Manómetro	Operativo
Llave de paso de agua de la cámara y de alimentación	Operativo
Bomba hidráulica	Operativa

b. Ensayos exploratorios

Densidad (promedio)	(g/cm ³)
Material 1	1,00+/- 0,051
Material 2	1,10 +/- 0,092
Material 3	2,88 +/- 0,38
Material 4	2,80+/- 0,24

P 1:1 Condiciones del ensayo

Material	Esferas de plástico
Malla	2mm
Caudal:	9, 15 y 22 l .
Tiempo:	1, 3 y 5 min
Fondo de granza	No aplica

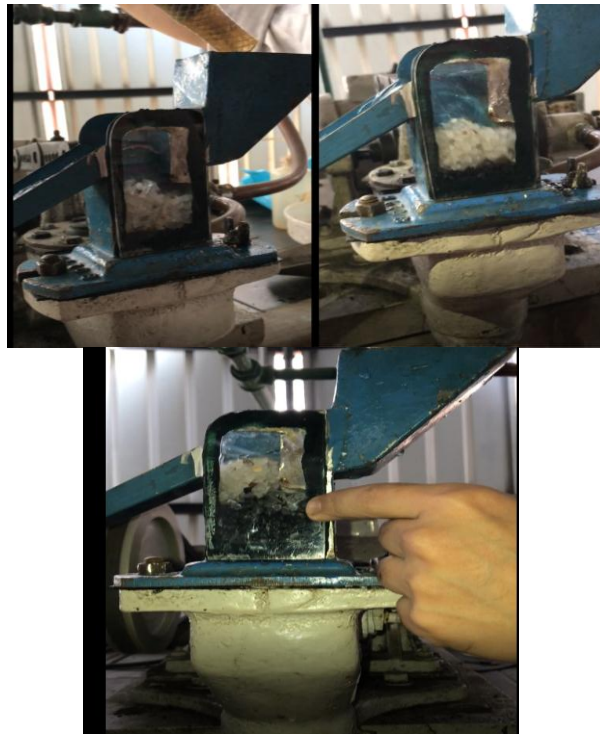


Estratificación de esferas de plásticos en ensayos exploratorios

Ensayos exploratorios con minerales sin fondo de granza

M 1:1

Mineral	casiterita ($\rho=6,9\text{g/cm}^3$) Calcita ($\rho=2,6\text{g/cm}^3$)
caudal l/min	9, 15 y 22
tiempo de ciclo	1,3,5
granulometría	(+1,7, -2) mm
fondo de granza	No aplica



Ensayos exploratorios con mezcla mineral

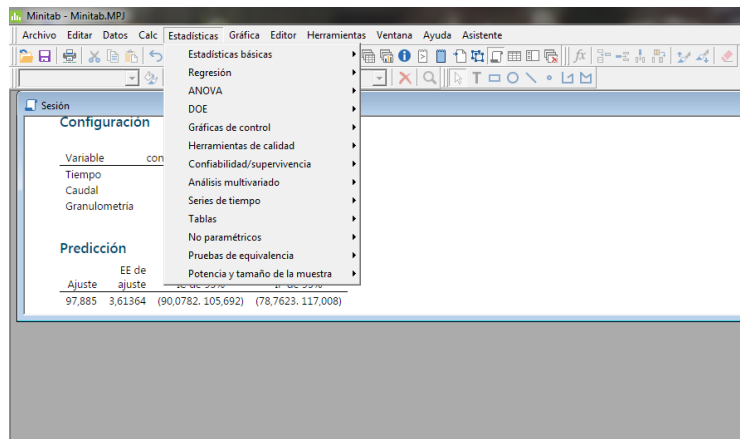
ANEXO VI Pesos reportados para ensayos exploratorios con minerales sin fondo de granza

Resultados del Ensayo exploratorio mezcla 1:1 (+1,68 -2) mm.

Caudal de cámara 8,4 l/min (+1,68 -2) mm .					
tiempo de ciclo (min)	concentración (%)	tiempo de ciclo (min)	concentración (%)	tiempo de ciclo(min)	concentración(%)
1	36,10 +/-1,90	3	52,90+/- 4,30	5	64,40+/-5,60
Caudal de cámara 16,44 l/min (+1,68 -2) mm					
tiempo de ciclo (min)	concentración(%)	tiempo de ciclo (min)	concentración (%)	tiempo de ciclo (min)	concentración(%)
1	38,90 +/-0,30	3	53,50 +/-0,50	5	61,10+/-1,40
Caudal de cámara 20,4 l/min (+1,68 -2) mm.					
tiempo de ciclo (min)	concentración(%)	tiempo de ciclo (min)	concentración (%)	tiempo de ciclo (min)	concentración(%)
1	34,50+/-3,30	3	55,50+/-0,30	5	57,60+/-3.30

ANEXO VII Pasos para realizar la superficie de respuesta, mediante el software estadístico

Interfaz del software estadístico



Para realizar un diseño experimental, se debe:

- 1) Se debe seleccionar, la pestaña donde aparece DOE, se desplegará otra ventana.

2) Luego se selecciona la opción de superficie de respuesta, seguido de la opción de análisis de superficie de respuesta, por último, se abrirá otra ventana donde va a identificar los parámetros, niveles y tipo de diseño experimental que se requiera emplear.

3)

