

CINAREM'17

IX Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales

Título: “Beneficio de la pulpa mineral alimentada al
proceso de lixiviación ácida a presión”

Autores: Ing. Lilian Vidiaux Arcia, Ing. Luis Ángel García
Frómeta, Lic. Mirvelis López Gámez, Ms. C. Ciro
Manuel Sam Palanco.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito brindar información sobre el uso de clasificadores para el beneficio de la pulpa mineral laterítico y lograr alimentar a la Planta de Lixiviación del proceso de lixiviación ácida a presión localizada en Moa, una pulpa con un por ciento de arena requerido para el proceso menor de un 8 %. Para los ensayos se utilizó una instalación a escala de laboratorio compuesta por un clasificador de partículas, un tanque para el almacenaje de la pulpa y una bomba peristáltica. Se confeccionó un diseño experimental tipo 3^2 , se realizaron nueve experimentos con dos replicas los tres niveles. Los factores sometidos a estudio para determinar su influencia sobre la variable respuesta, que resulta el por ciento de arena fueron: flujo de agua (0.5, 1, 1.5) l/min y tiempo de residencia (20, 25, 30) seg. Se realizó el procesamiento estadístico y se determinó las condiciones óptimas de la variable respuesta (porcentaje de arena en el fino) debido a que en las 27 corridas el porcentaje de arena en el fino se comportó por debajo de la norma interna existente (<8%). Luego se realizó una prueba de clasificación bajo las condiciones óptimas para obtener un 4% de arena en el fino, obteniéndose un 4,02% de arena en el material clasificado.

SUMMARY

The present work aims to provide information on the use of classifiers for the benefit of lateritic mineral pulp and to feed the leaching plant of the acidic leaching process located in Moa, a pulp with one percent of sand required for the Process less than 8%. For the tests, a laboratory scale installation was used consisting of a particle sorter, a storage tank for the pulp and a peristaltic pump. An experimental design type 3^2 was made, nine experiments were performed with two replicates at all three levels. The factors studied were: water flow (0.5, 1, 1.5) l/min and residence time (20, 25, 30) sec. With the STATGRAPHICS Centurion XVII professional program, the statistical processing was performed and the optimal conditions of the response variable (percent of sand in the fine) were determined because in the 27 runs the percentage of sand in the fine behaved below the Existing internal standard (<8%). Then a classification test was carried out under optimum conditions to obtain a 4% of sand in the fine, obtaining a 4.02% of sand in the classified material.

Índice

CAPÍTULO 1: Búsqueda bibliográfica	3
1.1 Características de la materia prima	3
Tabla 1.1.1 Composición química de la fase sólida (mineral) de la pulpa alimentada a la planta.....	3
1.2 Métodos de separación mecánicos.....	3
Tabla 1.2.1 Clasificación atendiendo al diámetro de partícula	3
1.2.2 Tamizado	3
1.2.3 Filtración	4
1.2.4 Procesos de sedimentación por gravedad	4
1.3 Principio de la sedimentación	4
1.3.1 Tipos de sedimentación	7
1.3.2 Ensayos en probeta	7
1.4 Aparatos aplicados en la clasificación hidráulica	9
1.4.1 Clasificadores de cono.....	9
1.4.2 Clasificador de doble cono.....	9
1.4.3 Clasificador Dorr (De rastrillo).....	9
1.4.4 Separadores de cinta.....	10
1.4.5 Hidrociclones	10
1.4.6 Cajas piramidales (Spitzkasten).....	11
1.4.7 Elutriador.....	11
1.5.1 Clases de desarenadores	12
En función de su operación:.....	12
En función de la velocidad de escurrimiento:.....	12
Por la disposición de los desarenadores:.....	13
1.6 Descripción del proceso planta Preparación de Pulpa.....	13
CAPÍTULO 2: Materiales y métodos	14
2.1 Instalación experimental para la clasificación de la pulpa por medio de un elutriador	14
2.2 Métodos	14
2.2.1 Planificación de los experimentos	14
2.3 Preparación de la muestra	16
2.3.1 Caracterización física de la muestra	17
2.3.2 Caracterización química de la muestra	17

2.4 Desarrollo de las corridas experimentales	17
2.4.1 Metodología para las pruebas de clasificación	18
2.5 Determinación de las velocidades de sedimentación	18
2.6 Determinación del régimen de operación de la partícula utilizando el método “k”	18
Tabla 2.6.1 Valores de n y b según el régimen en que se encuentra la partícula	19
2.7 Cálculo de la velocidad del fluido ascendente en la sección transversal del elutriador	19
CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados	21
Tabla 3.1 Resultados de las corridas experimentales	21
Tabla 3.1.1 Resultados de las corridas experimentales	21
3.2 Análisis estadístico	22
Tabla 3.2.1 Análisis de Varianza para %Arena en el fino	22
3.2.2 Análisis de los efectos ejercidos por las variables independientes (tiempo y flujo de agua) ..	22
3.8.4 Análisis de residuos	23
Tabla 3.2.2 Niveles para optimizar respuesta	24
Tabla 3.2.3 Condiciones óptimas para cada porcentaje de arena permisible	24
3.3 Ensayo bajo condiciones óptimas obtenidas para un 4% de arena en el fino	25
Tabla 3.3.1 Corrida experimental para condiciones óptimas	25
3.3.1 Determinación del % de arena en el fino por ecuación 7	25
Tabla 3.4 Determinación de las velocidades de sedimentación para un 4% de arena	25
3.5 Análisis químico de la pulpa inicial y la clasificada	26
Tabla 3.5.1 Tabla comparativa entre la pulpa inicial y la clasificada	26
3.6 Determinación de velocidad de caída de la partícula para separar por elutriación partículas mayores de 0,15 mm	27
3.6.1 Cálculo del factor de forma por ecuación ocho	27
3.6.2 Determinación de la velocidad terminal de la partícula por ecuación nueve	27
3.6.3 Determinación de velocidad en sección transversal por ecuación 10 para los diferentes flujos de trabajo	27
CONCLUSIONES	29
RECOMENDACIONES	30
BIBLIOGRAFÍA	31
NOMENCLATURA	33

INTRODUCCIÓN

En la actualidad entre los metales de mayor importancia y demanda a nivel mundial se encuentran el níquel y el cobalto por las numerosas aplicaciones que estos poseen. En Cuba, para la extracción del níquel y cobalto se encuentran dos empresas, la "Empresa Comandante Ernesto Che Guevara" y la "Empresamixta cubano canadiense Comandante Pedro Sotto Alba", la cual procesa lateritas níquelíferas mediante la tecnología de lixiviación ácida a presión, única en su tipo en el país.

Hoy en día esta industria se enfrenta a problemas cada vez más agudos, ellos se concretan en la disminución del contenido de mineral útil y aumento del contenido de minerales nocivos para el proceso metalúrgico (SiO_2 ; Mg; Al_2O_3).

En la planta de preparación de pulpa, de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, dadas las características del mineral que se recibe actualmente se prepara una pulpa con un contenido de arena superior al 8% que es el límite máximo que debe contener, lo que trae aparejado consecuencias negativas al ser enviado en estas condiciones a la planta de lixiviación, dado por una parte porque debido al elevado contenido de magnesio que presenta el mineral, una mayor cantidad de arena implicaría que en la planta de lixiviación se incrementa el consumo de ácido por encima del requerido y por otra parte, en los reactores de lixiviación el exceso de arena se sedimentaría ocupando un volumen del reactor que limita el tonelaje que debe pasar por cada tren, al mismo tiempo que se depositaría este material sobre todas las paredes internas del reactor y accesorios, ocasionando que se afecte la capacidad de producción y la vida útil del mismo, existiendo la necesidad de sacar de la línea y sustituir a los reactores con más frecuencia que cuando se trabaja con una pulpa mineral que cumpla con el contenido de arena especificado, lo que incrementa las paradas por fin de campaña; todo ello aparejado a las afectaciones económicas que se derivan de lo anterior.

Los inconvenientes descritos anteriormente, motivan el desarrollo de esta investigación, en la que se formula como problema central:

Problema Científico: la necesidad de beneficiar la pulpa alimentada al proceso de lixiviación hasta lograr porcentajes de arena permisibles.

Objeto de estudio:

Proceso de clasificación de partículas y sedimentación en probetas.

Campo de acción:

Clasificación hidráulica por medio de un fluido vertical.

Objetivo general:

Beneficiar la pulpa alimentada al proceso mediante una técnica de clasificación de partículas hasta lograr porcentajes de arena permisibles.

Objetivos específicos:

1. Realizar la clasificación del mineral alimentado al proceso de lixiviación ácida a presión, identificando los diferentes productos.

2. Determinar la velocidad de sedimentación de las partículas en la pulpa y en los productos de la clasificación.
3. Valorar el efecto que tendría el beneficio del mineral en la planta de preparación de pulpa sobre el proceso de lixiviación.

Hipótesis:

Teniendo en cuenta las características denso-granulométricas de las partículas de la pulpa mineral que será alimentada al proceso de lixiviación, se podrá realizar el beneficio a la pulpa con la disminución de la fracción que presenta características desfavorables para el proceso.

Tareas de la investigación:

1. Recopilar información bibliográfica detallando los conceptos básicos del principio de la clasificación partículas.
2. Caracterización físico-química de la pulpa mineral.
3. Diseño y planificación de experimentos.
4. Ajuste y puesta en marcha de la instalación experimental.
5. Desarrollo de las corridas experimentales.
6. Análisis del efecto que ejercen las variables: flujo de agua y tiempo, sobre el porcentaje de arena en la pulpa mineral clasificada.

CAPÍTULO 1

Búsqueda

Bibliográfica

CAPÍTULO 1: Búsqueda bibliográfica

1. Fundamentos teóricos

1.1 Características de la materia prima

La materia prima de la planta es el mineral laterítico que se extrae de los yacimientos a cielo abierto, es color amarilloso con un 45 % de hierro, cuenta con nueve elementos donde los principales son el níquel y el cobalto para nuestro proceso. Este mineral debe tener un contenido de arena (partículas mayores de 0.15 mm) menor de un 8% en su contenido, ya que estas presentan gran contenido de magnesio que afectan el proceso de lixiviación ácida.(1)

Tabla 1.1.1 Composición química de la fase sólida (mineral) de la pulpa alimentada a la planta(1, 2)

Elemento	Contenido (%)
Níquel	1.20 – 1.33
Cobalto	0.12 - 0.13
Hierro	47.5
Cobre	0.02
Aluminio	4.0 – 4.9
Zinc	0.040

1.2 Métodos de separación mecánicos

La separación de materiales sólidos se hace con el objeto de clasificar las partículas de materia de acuerdo a sus tamaños o de acuerdo a sus características. Ejemplos de los primeros son la separación de rocas en distintos rangos de tamaños (por zarandeo, tamizado, separaciones hidráulicas o neumáticas); y, de los segundos, la separación de minerales de su ganga (por separación magnética o concentración hidráulica). Según el tamaño y características del material a separar se utilizan distintos tipos de aparatos para la separación de materiales sólidos; en la tabla siguiente se da una clasificación de dichos aparatos.(2, 3)

Tabla 1.2.1 Clasificación atendiendo al diámetro de partícula(2)

Tamaño de grano	Método de separación	Tipos de aparatos
> 200 mm	Manual	Parrillas
De 200 a 2 mm	Mecánico	Parrillas vibratorias y cribas de tambor
< 2 mm	Hidráulico	Separadores hidráulicos
<1,5 mm	Neumático	Separadores de aire
de 50 a 1 mm	Electro magnético	Separadores electromagnéticos

1.2.2 Tamizado

El tamizado es un método de separación de partículas que se basa solamente en la diferencia de tamaño. En el tamizado industrial se vierten los sólidos sobre una superficie perforada o tamiz, que deja pasar las partículas pequeñas, o finos, y retiene las de tamaños superiores, o rechazos. Un tamiz puede efectuar solamente una separación en dos fracciones. Estas fracciones se llaman fracciones de tamaño

Capítulo 1

no especificado, porque, aunque se conoce el límite superior o inferior del tamaño de las partículas que contiene, se desconoce su tamaño real.(4)



Figura 1: Tamiz para la separación de partículas por diferencia de tamaños(4)

1.2.3 Filtración

La filtración es la separación de partículas sólidas contenidas en un fluido, pasándolo a través de un medio filtrante, sobre el que se depositan los sólidos. La filtración industrial va desde el simple colado hasta separaciones más complejas. El fluido puede ser un líquido o un gas; las partículas sólidas pueden ser gruesas o finas, rígidas o flexibles, redondas o alargadas, separadas o agregadas. La suspensión de alimentación puede llevar una fracción elevada o muy baja (40-5) % en volumen de sólidos.(4)

1.2.4 Procesos de sedimentación por gravedad(5)

Separación de sólidos contenidos en gases y líquidos. Por ejemplo, las partículas de polvo pueden retirarse de los gases por una gran variedad de métodos. Para partículas sólidas gruesas, mayores de unas 325 micras, es útil una cámara de sedimentación por gravedad. El aparato es una gran caja, donde en uno de sus extremos entra aire cargado de polvo y por el otro sale el aire clarificado. En ausencia de corrientes de aire, las partículas sedimentan en el fondo por gravedad. Si el aire permanece en la cámara durante un período de tiempo suficiente, las partículas alcanzan el fondo de la cámara, de donde se pueden retirar posteriormente.(2, 6)

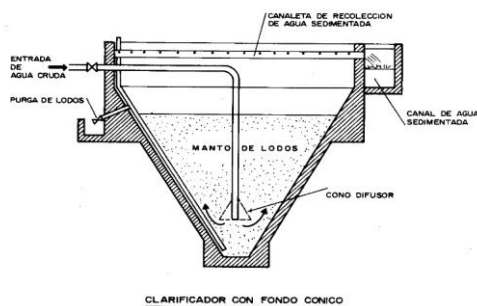


Figura 2: Sedimentador de cono

1.3 Principio de la sedimentación

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La

Capítulo 1

remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios. La sedimentación remueve las partículas más densas, mientras que la filtración remueve aquellas partículas que tienen una densidad muy cercana a la del agua o que han sido re suspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior. La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua.(2)

Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada. Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.(6)

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal.(7)

Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión.

Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos. El fenómeno de sedimentación de partículas discretas por caída libre, también denominado en soluciones diluidas, puede describirse por medio de la mecánica clásica. En este caso, la sedimentación es solamente una función de las propiedades del fluido y las características de las partículas según se demuestra a continuación. Imaginemos el caso de una partícula que se deja caer en el agua. Esta partícula estará sometida a dos fuerzas: (fuerza de flotación (FF), que es igual al peso del volumen del líquido desplazado por la partícula (Principio de Arquímedes), y fuerza gravitacional (FG).(8)

Si:

$$FF = \rho * g * V \dots\dots\dots(1)$$

$$FG = \rho s * g * V \dots\dots\dots(2)$$

donde:

ρ : Densidad del líquido

ρs : Densidad del sólido

V: = volumen de la partícula de la acción de ambas fuerzas. La fuerza resultante será igual a la diferencia de estos dos valores y estará dada por:(9)

$$Fi = g * V * (\rho s - \rho) \dots\dots\dots(3)$$

donde:

Capítulo 1

Fi: Fuerza resultante o fuerza de impulsión

Arrastrada por esta fuerza (Fi), la partícula desciende con velocidad creciente, pero a medida que baja, la fricción que el líquido genera en ella crea una fuerza de roce definida por la Ley de Newton, cuyo valor es calculado por: (10)

$$F_i = \frac{C_d * A * \rho * V_s^2}{2} \dots \dots \dots (4)$$

donde:

F_R : Fuerza de rozamiento

$\frac{V_s^2}{2}$: Energía cinética

A: Área transversal al escurrimiento

Vs: Velocidad de sedimentación

Cd: Coeficiente de arrastre

Si en un líquido se dejan caer simultáneamente partículas de un mismo material (de peso específico mayor que el líquido) y distintos tamaños, se formarán capas. Las partículas más grandes quedarán en el fondo del recipiente, las intermedias encima de ellas y de las más finas en la parte superior. Las partículas caen por la fuerza de gravedad, a la que se oponen, la fuerza de flotación y la de rozamiento. Las dos primeras son constantes, pero la de rozamiento va creciendo a medida que aumenta la velocidad. En determinado momento, la velocidad de caída se mantiene constante, y se llama dicha velocidad: velocidad límite.

Peso partícula = Fuerza flotación + Fuerza rozamiento

La separación de las partículas se realiza en el lapso de tiempo en que las partículas alcanzan su velocidad límite, lo que dura fracciones de segundo, luego siguen con la U1, ya ordenadas por tamaño, hasta depositarse. Los granos que integran una capa, es decir que han caído con igual velocidad, se denominan isódromos (o equidescentes). Partículas isódromas de distintos materiales cumplen la siguiente condición: $d_1 * \rho_1 = d_2 * \rho_2$ (donde d: diámetro partícula y ρ : densidad). La expresión que da la velocidad límite fue planteada por Stokes de la siguiente forma:

$$v_1 = \frac{K * (\rho_s - \rho_1) * D_s^2}{\mu_1} \dots \dots \dots (5)$$

Representación de la velocidad de caída de una partícula sólida en un líquido.

donde:

ρ_s : Densidad del sólido

μ_1 : Viscosidad del líquido

Ds: Diámetro de la partícula

ρ_1 : Densidad del líquido

Capítulo 1

1.3.1 Tipos de sedimentación

Se pueden distinguir dos tipos de sedimentación atendiendo al movimiento de las partículas que sedimentan: (21)

- **Sedimentación libre:** se produce en suspensiones de baja concentración de sólidos. La interacción entre partículas puede considerarse despreciable, por lo que sedimentan a su velocidad de caída libre en el fluido.
- **Sedimentación por zonas:** se observa en la sedimentación de suspensiones concentradas. Las interacciones entre las partículas son importantes, alcanzándose velocidades de sedimentación menores que en la sedimentación libre. La sedimentación se encuentra retardada o impedida. Dentro del sedimentador se desarrollan varias zonas, caracterizadas por diferente concentración de sólidos y, por lo tanto, diferente velocidad de sedimentación.

Dependiendo de cómo se realice la operación, la sedimentación puede clasificarse en los siguientes tipos:

- **Sedimentación intermitente:** el flujo volumétrico total de materia fuera del sistema es nulo, transcurre en régimen no estacionario. Este tipo de sedimentación es la que tiene lugar en una probeta de laboratorio, donde la suspensión se deja reposar.
- **Sedimentación continua:** la suspensión diluida se alimenta continuamente y se separa en un líquido claro y una segunda suspensión de mayor concentración. Transcurre en régimen estacionario.

1.3.2 Ensayos en probeta

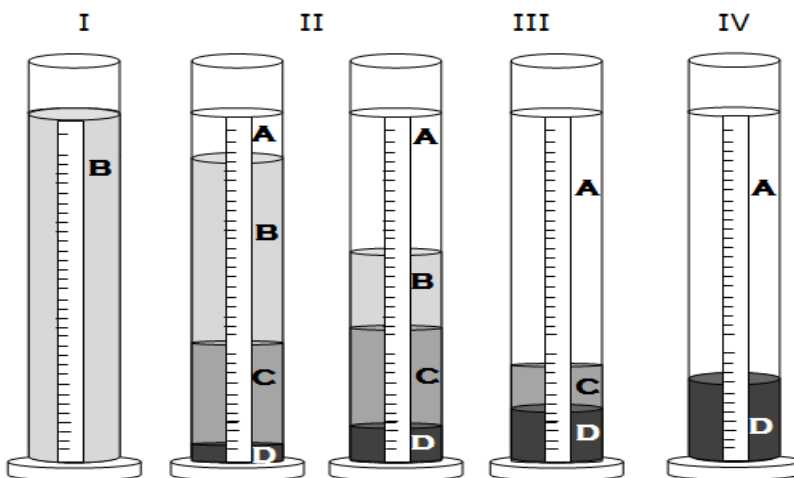


Figura 3: Esquema de sedimentación continua.

A: Líquido claro

B: Concentración constante

Capítulo 1

C: Concentración variable

D: Sedimento

- Las zonas de sedimentación y la del líquido claro crecen a expensas de las zonas de concentración uniforme hasta que desaparece (punto crítico).
- Hasta este punto, las partículas sedimentan libremente, chocando eventualmente debido a la concentración
- Después del punto crítico, las partículas descansan una sobre otra produciéndose una compresión final.
- La única interfase nítida es la existente entre el agua clara y la pulpa.
- La variación de esta altura respecto del tiempo se utiliza para caracterizar la sedimentación.

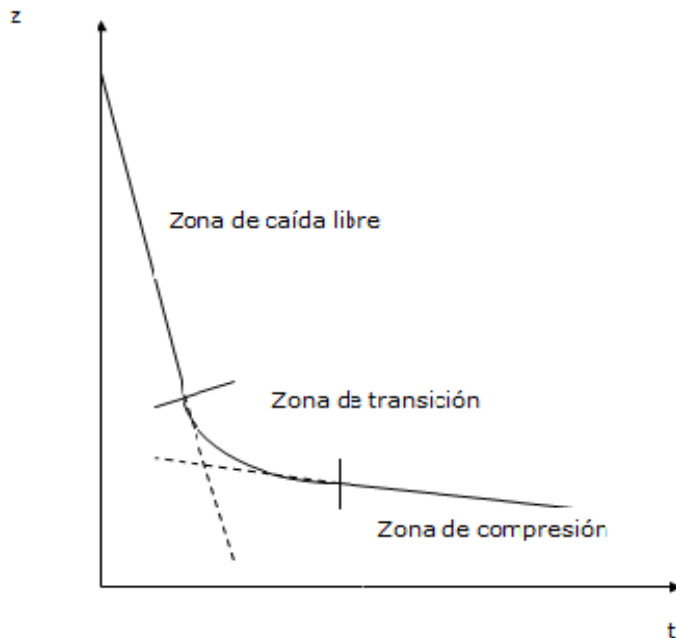


Figura4: Curva de sedimentación

- La velocidad de desplazamiento se calcula mediante la pendiente de la curva.
- La curva presenta tres zonas típicas:
- Recta al principio, en que la velocidad de la interfase es constante
- Tramo curvo, cuando desaparece la zona de concentración constante
- Asintótica, después del punto crítico

1.3.3 Caída en corriente de líquido

Capítulo 1

Cuando una partícula cae en una corriente de líquido ascendente y alcanza su velocidad límite se establece una velocidad relativa v_r que será: (2, 11)

$$V_r = V_{\text{líquido}} - V_{\text{lim}} = V_{\text{líquido}} - V_{\text{rel}}$$

De esta expresión surgen tres alternativas:

1. Si $v_{\text{líquido}} = v_1$ la partícula sólida queda suspendida en el fluido.
2. Si $v_{\text{líquido}} < v_1$ la partícula cae al fondo del recipiente con velocidad $v_r < v_1$.
3. Si $v_{\text{líquido}} > v_1$ la partícula es arrastrada hacia la parte superior del recipiente a velocidad $v_1 < v_{\text{líquido}}$

1.4 Aparatos aplicados en la clasificación hidráulica

1.4.1 Clasificadores de cono

Estos aparatos se utilizan para separar mediante una corriente de líquido ascendente partículas finas de gruesas. Este aparato es una especie de embudo con un canal en la parte superior, para la descarga de los finos. La suspensión penetra por la parte superior, y el material grueso desciende por el embudo hasta salir por el fondo. El material fino, es arrastrado hacia la parte superior mediante una corriente de agua que asciende desde la parte inferior del embudo, descargándose por un canal circular. Estos clasificadores; pueden procesar un flujo de 20m³/hora, para un diámetro del cono de un metro. (2, 12)

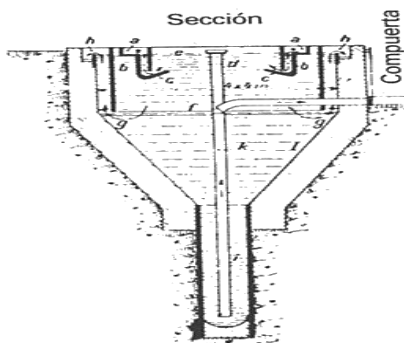


Figura 5: Clasificador de cono

1.4.2 Clasificador de doble cono

Este aparato es de funcionamiento análogo al anterior, con la diferencia de que cuenta con dos conos concéntricos. Por el interior, por la parte superior, penetra la suspensión y en su parte inferior encuentra un conito derivador (que distribuye uniformemente a la misma). Una corriente ascendente de agua arrastra hacia la parte superior a los finos, por el espacio comprendido entre ambos conos. Las partículas gruesas, por su mayor peso, caen por el fondo del embudo. Este aparato permite modificar la posición del embudo interior, con lo que se puede regular la velocidad de la corriente de agua ascendente en el espacio entre conos y, por consiguiente, el tamaño de partículas a separar. (8)

1.4.3 Clasificador Dorr (De rastrillo)

Este clasificador consta de una caja con plano inclinado (9° a 14°), y un rastrillo, que se desplaza de abajo hacia arriba rascando el plano inclinado, y vuelve hacia abajo pero levantado, es decir separado

del plano inclinado. En su movimiento ascendente el rastrillo eleva las partículas más gruesas que salen por la parte superior del plano inclinado. Las partículas finas se mantienen en suspensión y salen por rebose por el extremo opuesto. La entrada de la suspensión se hace, cerca de la parte inferior del aparato por una abertura lateral. Estos aparatos pueden tener uno, dos o cuatro rastrillos y una capacidad de producción de 2000 toneladas/24 horas. Las dimensiones del producto sólido a clasificar se encuentran entre 10 y 200 mallas. La capacidad puede duplicarse respecto a la citada, en aparatos de cuatro rastrillos. El aparato consume potencias bajas, de dos a cinco HP, y el número de rastrilladas por minuto alrededor de 12 a 30 (las más rápidas para partículas más gruesas). El ancho de las cajas varía entre 1,20 m. y 4,80 m. (cuatro rastrillos), con una longitud de seis a nueve metros.(6)

1.4.4 Separadores de cinta

El separador de cinta es similar a una cinta transportadora, cuenta con dos poleas, una motora y otra conducida. La cinta tiene, además, salientes en su superficie. La polea conductora está magnetizada. El material no magnético cae, por gravedad, el magnético queda adherido por el campo magnético. Cuando la cinta abandona la polea, cesa el campo magnético y el material magnético cae por gravedad. El tamaño del material a separar debe ser de cinco a 50 mm. La producción es de 10 ton / hora, para una polea de 0,45 m de diámetro y 0,60 m de ancho. El aparato trabaja a una velocidad de 50 rpm y utiliza un motor de 1,5 HP de potencia.

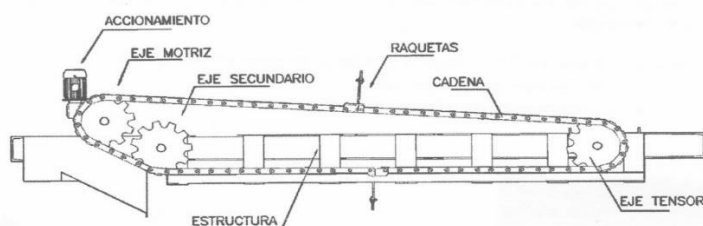


Figura 6: Separador de cinta

1.4.5 Hidrociclones

Los hidrociclones son aparatos que aprovechan la fuerza centrífuga y no la gravedad, como en el caso de los clasificadores anteriormente descritos, lo que hace que sean aparatos de menor tamaño. Son elementos de forma cilíndrico-cónicas que cuentan con una tubería de alimentación, una cámara de alimentación un tronco de cono, una tubería de salida inferior y una tubería de rebose. La suspensión (sólido-líquido de 10 al 20%), se introduce a presión elevada en la cámara de alimentación, mediante una tubería tangencial, tomando un movimiento en torbellino, alrededor de una columna de aire que se forma en el eje del aparato y se divide en dos corrientes, una que se evacua por el orificio central de rebose arrastrando las partículas finas. La otra sale por el extremo inferior junto a las partículas más grandes y pesadas, que han perdido energía cinética por el choque contra las paredes y posterior deslizamiento por las mismas hacia la salida inferior. Para tener una idea de tamaños y producción de estos aparatos.(13-15)

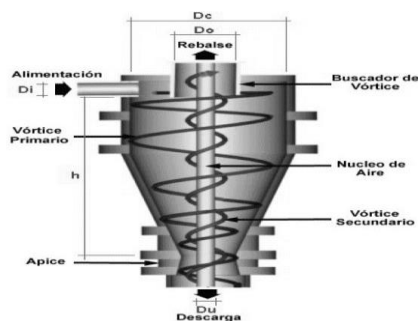


Figura 7: Hidrociclón

1.4.6 Cajas piramidales (Spitzkasten)

Este se utiliza para la clasificación de partículas de tamaño que se encuentran entre 0,25mm y 1,25 mm. Son también utilizadas en minería y permiten clasificar partículas de cuatro clases distintas. Es una serie de recipientes en forma piramidal, cuyo tamaño es creciente desde el extremo de entrada de la suspensión (primera caja) al de salida del líquido claro. En la primera caja sedimentan las partículas gruesas, en la segunda las medias y densas, en la tercera las medias y livianas y en la cuarta las finas. El aparato trabaja con un cierto nivel de líquido, el que es regulado mediante el agregado, a las cajas, de agua desde las tuberías, que se observan en la parte superior. Naturalmente el caudal de agua que se envía de las tuberías a las cajas depende del caudal de suspensión tratado. Las partículas salen por la parte inferior de las cajas formando un barro, a través de un tubo acedado, por la presión hidrostática que distribuyen a la misma en forma pareja en toda la sección del aparato. El líquido claro sale por el extremo opuesto a la entrada de suspensión a través de un canal. Como dato ilustrativo, a continuación, se suministran datos del tamaño de estos aparatos.(4)

1.4.7 Elutriador

Un elutriador es esencialmente una cámara vertical de asentamiento. Los elutriadores consisten de uno o más de tubos verticales o torres en serie, por dentro de los cuales fluye hacia arriba una corriente de agua con una velocidad definida por la rapidez del flujo de agua y el área de la sección transversal del tubo. Las partículas grandes, con velocidades terminales de asentamiento superiores a la velocidad del flujo hacia arriba de agua, son separadas y recolectadas en el fondo de la cámara. Las partículas más pequeñas con menores velocidades de asentamiento, son arrastradas fuera del colector. El tamaño de partícula que se atrapa, puede variar cambiando la velocidad del agua. La clasificación por tamaño de las partículas atrapadas puede lograrse utilizando una serie de tubos con diámetros cada vez mayores. Las tolvas son utilizadas por lo general para recolectar al material asentado.(16)

1.4.7.1 Ventajas

1. Bajos costos de inversión inicial.
2. Bajos consumo de energía.
3. Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación.
4. Excelente funcionamiento.
5. Baja caída de presión a través del equipo.

Capítulo 1

6. El equipo no está sujeto a la abrasión, debido a las bajas velocidades del agua.

1.4.7.2 Desventajas

1. Inadecuado para materiales muy viscosos o aglutinantes.
2. Gran tamaño físico.

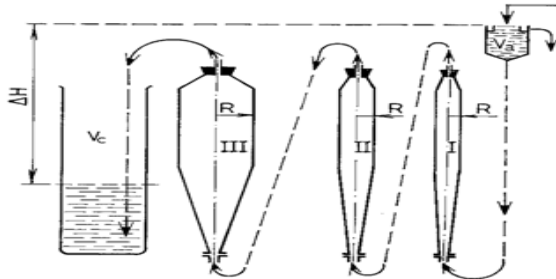


Figura 8: Elutriadores en serie

1.5 Desarenadores

Los desarenadores son estructuras que se ubican después de las unidades que remueven sólidos gruesos (tamizado) y antes de tanques de sedimentación primaria. Estos equipos son efectivos con variaciones de flujo, necesitan de limpieza y supervisión continua.

Objetivos de su aplicación

Su instalación tiene por finalidad la separación de partículas minerales relativamente gruesas, especialmente arenas y gravillas.

Las metas principales de su diseño deberán ser:

- Evitar que se produzcan sedimentos en las líneas de conducción.
- Proteger contra la abrasión los equipos de impulsión y otras instalaciones de la planta.
- Evitar sobrecargas en las fases siguientes del proceso.

1.5.1 Clases de desarenadores

En función de su operación:

- Desarenadores de lavado continuo, es aquel en el que la sedimentación y la extracción son dos operaciones simultáneas.
- Desarenadores de lavado discontinuo, es el que almacena y luego retira el sedimento.

En función de la velocidad de escurrimiento:

- De baja velocidad $v > 1 \text{ m/s}$ de $(0.2-0.6) \text{ m/s}$
- De alta velocidad $v < 1 \text{ m/s}$ de $(1-1.5) \text{ m/s}$

Capítulo 1

Por la disposición de los desarenadores:

- En serie: formado por dos o más dispositivos a continuación uno del otro.
- En paralelo: formado por dos o más dispositivos de forma paralela para una fracción del caudal derivado.
- Combinados.

1.6 Descripción del proceso planta Preparación de Pulpa

La planta de Preparación de Pulpa tiene como propósito primordial producir una pulpa acuosa del mineral laterítico a una concentración de 25 % de sólidos y recuperar las partículas de limonita de un tamaño menor de 0.84 mm (20 mesh).

Esta Planta fue diseñada con dos unidades iguales e individuales (con algunos equipos en común). Cada unidad es capaz de manipular la capacidad total de la planta, pero normalmente cada tren debe operar con una capacidad no mayor de 455 t/h. Estos trenes están compuestos por una (tolva, transportador de estera, transportador de banda, criba), dos (lavadoras, zarandas primarias) y cuatro zarandas secundarias. El mineral cae por gravedad a una tolva, cuyo tiempo de retención es 9.9 minutos. De las tolvas, el mineral cae a dos esteras de velocidad variable, las cuales controlan el tonelaje de mineral alimentado a la planta.

El mineral es luego conducido a las cribas, que poseen barras situadas paralelamente a una distancia de 127 mm (5 pulgadas), aquí se añade por primera vez agua en forma atomizada a una presión de 80 lb/pul² con el objetivo de romper los terrones de mineral que pasaron a través del embudo y lavar las partículas de mineral que traen las rocas serpentínicas.

La pulpa con partículas de mineral menores de 127 mm (5 pulgadas) cae por gravedad de las cribas vibratorias a las lavadoras de paletas, las cuales desmenuzan a la vez que lavan el mineral. Los pedazos de mineral de mayor tamaño quedan en las lavadoras, formando una cama y la pulpa de 30 % de sólidos que sale de esta, dividida en dos corrientes, cae por gravedad a las zarandas primarias, las cuales son de malla de 9.58 mm (3/8 pulgadas). Las partículas mayores de 9.53 mm (3/8 pulgadas) que son en su mayoría de carácter serpentínico, son rechazadas por las zarandas primarias y van al transportador de rechazo y las menores de 9.53 mm (3/8 pulgadas) se dividen en dos corrientes cada una de las cuales cae a una zaranda secundaria. Las zarandas secundarias separan las partículas menores de 0.84 mm, formando una pulpa de 25% de sólidos alimentándose por gravedad a la Planta de Espesadores de Pulpa a través de una tubería de concreto de 24 pulgadas de diámetro.

CAPÍTULO 2

Materiales y

métodos

CAPÍTULO 2: Materiales y métodos

En este capítulo se describen los materiales y métodos necesarios para el desarrollo experimental de la investigación. Se utilizaron métodos de análisis físico-químicos, mineralógicos y estadísticos, empleando en este último el programa **STATGRAPHICS Centurion XVII** como herramienta para la planificación de los experimentos e interpretación y análisis de resultados.

2.1 Instalación experimental para la clasificación de la pulpa por medio de un elutriador

En la figura 2.1.1 se muestra la instalación experimental donde se realizó la clasificación de la pulpa con alto contenido de arena. Está compuesta por un depósito de agua y uno de pulpa, una bomba de alimentación de agua, un embudo para la alimentación de la pulpa con alto contenido de arena, un flujómetro para la regulación del flujo de agua de alimentación, un clasificador de partículas (elutriador), un depósito de pulpa y otro de arena. Las mangueras que cierran el circuito son engomadas.

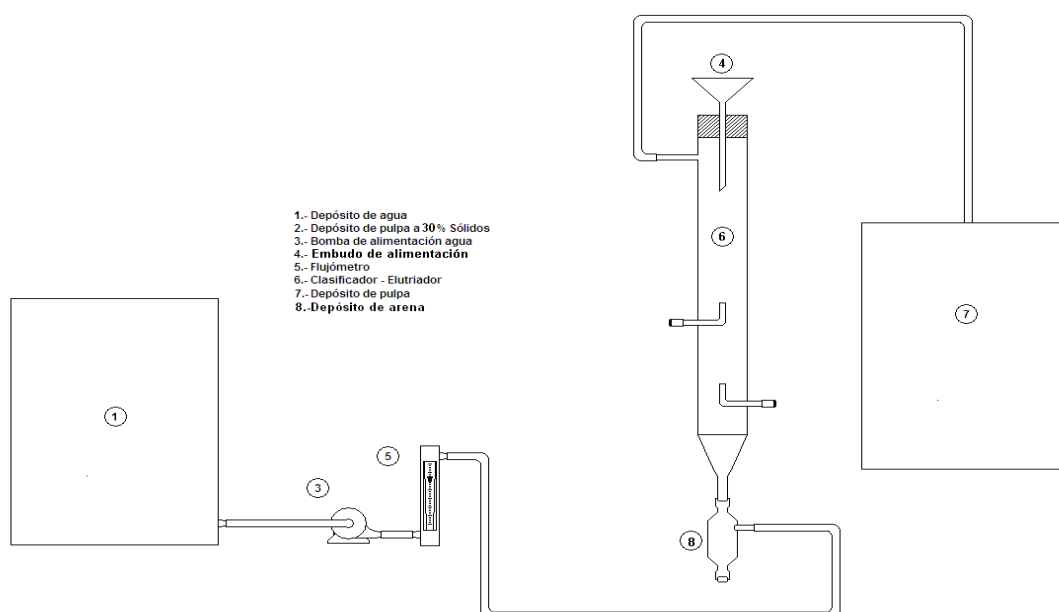


Figura 9: Instalación experimental

Características del elutriador

- Altura: 0.178 m
- Diámetro: 0.06 m
- Material de construcción: acrílico, que permitirá la mejor observación de los fenómenos que ocurren en el interior del mismo.

2.2 Métodos

2.2.1 Planificación de los experimentos

Con el objetivo de cuantificar el porcentaje de arena en la descarga del elutriador se realizaron 27 corridas experimentales, las cuales fueron planificadas según un diseño de experimento factorial multinivel y se utilizó el programa profesional **STATGRAPHICS Centurion XVII**, proponiéndose como factores el flujo de agua y el tiempo de alimentación de la pulpa a clasificar. El orden de los experimentos fue totalmente aleatorio.

Capítulo 2

Tabla 2.2.1.1 Planificación de los experimentos

Experimentos	Flujo de agua (l/min)	Tiempo (seg)
1	1.5	20.0
2	0.5	25.0
3	1.5	30.0
4	1.0	30.0
5	1.0	25.0
6	0.5	20.0
7	1.0	20.0
8	1.5	25.0
9	0.5	30.0
10	1.0	30.0
11	1.5	25.0
12	1.5	20.0
13	0.5	20.0
14	0.5	30.0
15	1.0	25.0
16	1.5	30.0
17	1.0	20.0
18	0.5	25.0
19	0.5	25.0
20	1.5	25.0
21	1.5	20.0
22	0.5	30.0
23	0.5	20.0
24	1.0	30.0

Capítulo 2

Tabla 2.2.1.1 Continuación

Experimentos	Flujo de agua (l/min)	Tiempo (seg)
25	1.0	25.0
26	1.5	30.0
27	1.0	20.0

Diseño experimental desarrollado

Clase de diseño:

- Factorial multinivel

Base de diseño

- Número de factores experimentales: 2
- Número de bloques: 3
- Número de respuestas: 2
- Número de corridas: 27
- Grados de libertad para el error: 19
- Aleatorizar: Sí

Resumen del Diseño Experimental desarrollado

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Flujo de agua	0.5	1.5	3	(L/min)
Tiempo	20	30	3	(seg)

Respuestas

% Arena en el fino (%)

% Arena en la arena (%)

2.3 Preparación de la muestra

Para el estudio se utilizó una muestra de mineral limonítico proveniente de la Empresa "Comandante Pedro Soto Alba", la cual fue empleada en estudios anteriores. Se tomaron 10 kg de la muestra mineral homogénea a la cual se le conoce el contenido de humedad y se determinó la cantidad de agua necesaria para formar una pulpa alrededor de 40% de sólidos.

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \dots\dots\dots(6)$$

Donde C y V son concentración y volumen respectivamente.

Capítulo 2

2.3.1 Caracterización física de la muestra

La pulpa fue preparada hasta alcanzar el sólido deseado (30% Sólidos) mediante la ecuación 6 y posteriormente homogenizada para tomar una muestra y realizar la caracterización física de la misma, la cual incluyó determinación de:

- por ciento de sólidos de la pulpa
- densidad de la pulpa.
- contenido de arena en la pulpa
- velocidad de sedimentación en la pulpa (V_s).

V_s : mm en dos horas.

Para la preparación y procesamiento de las muestras se utilizaron los siguientes equipos:

- Agitador para la preparación de la pulpa
- Estufa para el secado muestras sólidas
- Balanza analítica para determinar el por ciento de sólidos de las muestras
- Balanza analítica para determinar el peso de la muestra.
- Tamiz de 100 mesh para la determinación del porcentaje de arena
- Probetas de 1 L estándar para determinar velocidad de sedimentación

En la tabla 2.3.1.1 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización física de la muestra.

Tabla 2.3.1.1 Resultados de la caracterización física

%Sólidos (%)	Densidad (kg/L)	V_s (mm/2hrs)	%Arena (%)
30.074	1,26	150	13.77

2.3.2 Caracterización química de la muestra

Para la caracterización química (identificación completa de los elementos mayoritarios en el mineral objeto de estudio) de la pulpa se tomó una muestra de 100 g, la cual fue secada y triturada. Luego se envió al laboratorio del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQU) para ser analizada por los especialistas utilizando la técnica de análisis Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).

Los resultados del análisis químico realizado en el laboratorio del CEDINIQU para la pulpa mineral se muestran a continuación en la tabla 2.3.2.1.

Tabla 2.3.2.1 Resultados de la caracterización química de muestra inicial

% Ni	% Co	% Fe	% Cu	% Zn	% Cr	% Al	% Mg	% Si	% Mn
1.08	0.069	39.96	0.021	0.041	1.58	4.12	0.731	7.47	0.259

2.4 Desarrollo de las corridas experimentales

Una vez caracterizada física y química la muestra se realizó 27 corridas experimentales empleando los métodos que a continuación se describen:

Capítulo 2

Para cada una de las pruebas de elutriación se desarrolló la siguiente metodología. Primeramente, se montó el equipo tal como se indica en la figura 2.1.1 colocando adecuadamente los depósitos de arena y pulpa elutriada. Se pesó la muestra que se va a clasificar (100 g) la cual contiene 30 % en peso de sólidos. Esta fue sometida a ensayos variando el flujo de trabajo del elutriador y el tiempo para cada uno de los experimentos realizados.

Para el desarrollo de las corridas experimentales se realizaron cálculos previos para determinar las condiciones necesarias altura del tubo de succión de la descarga.

2.4.1 Metodología para las pruebas de clasificación

Inicialmente se arranca la bomba de alimentación de agua al flujo escogido (este se regula mediante un flujómetro) hasta llenar completamente la columna. Se debe haber arrancado la bomba de descarga. La pulpa se mantiene constantemente agitada por medio de un agitador y se alimenta al elutriador mediante un embudo. Se inicia la corrida experimental. La calidad de los productos obtenidos de la elutriación depende en gran parte del flujo de agua. Desde el momento que empieza la alimentación de la pulpa se toma el tiempo de inicio (tiempo según el escogido en el diseño). La prueba termina cuando no se aprecian signos de separación de partículas en el interior del elutriador, es decir, cuando el agua en el reboso salga totalmente limpia. Los productos de la elutriación fueron pesados y analizados para determinar el contenido de arena en los mismos. Para ello se utilizó la ecuación (7).

$$\% \text{ arena} = \frac{\text{Masa de arena seca}}{\% \text{ sólidos pulpa} \times \text{Masa de pulpa}} \times 100 \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

Masa de arena seca: masa retenida en el tamiz.

% sólidos: % de sólidos determinado en la balanza automática.

Masa de pulpa: Peso de la pulpa tomada en gramos para la determinación del peso de sólidos secos.

2.5 Determinación de las velocidades de sedimentación

1. Se medirá la altura inicial de la suspensión, h_0 , usando la regla acoplada a cada probeta.
2. Se determina la masa de pulpa concentrada y esta se añadirá a una probeta previamente tarada.
3. Se añade agua a la probeta hasta completar un litro.
4. Se agita intensamente (10 veces) para que la concentración sea lo más uniforme posible a lo largo de toda la probeta.
5. Se deja la probeta en reposo y se va determinando la altura que ocupa la suspensión en función del tiempo, tomando para ello medidas de la altura de la suspensión (h) a la hora y a las dos horas

2.6 Determinación del régimen de operación de la partícula utilizando el método “k”(17)

$$K = d_p \left[\frac{(\rho_p - \rho)}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (8)$$

1) Régimen de Stokes. $0 \leq K \leq 3,30$

Capítulo 2

2) Régimen Intermedio. $3,30 \leq K \leq 43,68$

3) Régimen de Newton. $K \geq 43,68$

Una vez calculado el régimen en que opera la partícula sólida, se calcula la velocidad terminal de la partícula sólida, v_t , utilizando la ecuación correspondiente a dicho régimen (Stokes, intermedio, Newton). (7, 17)

$$v_t = \left[\frac{4 * g * d_p^{(1+n)} * (\rho_p - \rho)}{3 * b * \mu^n * \rho^{(1-n)}} \right]^{\left(\frac{1}{2-n}\right)} \quad \text{Para partículas con geometría esférica} \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad. $9,8 \text{ m/s}^2$

ρ : Densidad del fluido.

ρ_p : Densidad de la partícula sólida.

μ : Viscosidad del fluido.

d_p : d partícula, sólido: Diámetro de la partícula sólida.

K: factor de forma

Tabla 2.6.1 Valores de n y b según el régimen en que se encuentra la partícula (7, 17)

Régimen	Rango "K"	Valor de: b	Valor de: n
Stokes	$0 \leq K \leq 3,30$	24,0	1,0
Intermedio	$3,30 \leq K \leq 43,68$	18,5	0,6
Newton	$3,30 \leq K \leq 43,68$	0,44	0,00

2.7 Cálculo de la velocidad del fluido ascendente en la sección transversal del elutriador

$$v = \frac{Q_{\text{laboratorio}}}{\frac{\pi * d^2}{4}} \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

$Q_{\text{suspensión}}$: Flujo volumétrico del fluido ascendente a escala laboratorio

d: Diámetro del desarenador a escala laboratorio

v: Velocidad del fluido ascendente en la sección transversal

Si:

$v_t > v$ La partícula sedimenta dentro del equipo

$v_t < v$ La partícula es arrastrada por el fluido

$v_t = v$ La partícula queda suspendida

Capítulo 3

Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados

En este capítulo se aprecian los resultados obtenidos del desarrollo de las 27 corridas experimentales usando el elutriador de laboratorio siguiendo el diseño del experimento 3². Se comentan los resultados del procesamiento de los datos en el **STATGRAPHICS Centurion XVII** y se demuestra la influencia que tienen los factores tiempo y flujo de agua en las variables respuestas (porcentaje de arena en el rechazo y en el fino). Para posterior análisis de las condiciones óptimas del diseño.

Tabla 3.1 Resultados de las corridas experimentales

En la tabla 3.1.1 se muestran los resultados obtenidos para las corridas realizadas en el elutriador de laboratorio siguiendo el diseño de experimento.

Tabla 3.1.1 Resultados de las corridas experimentales

Exp	Flujo de agua (l/min)	Tiempo (seg)	%Arena fino (%)
1	0,5	30	1,87
2	1,5	30	3,39
3	1,5	20	5,60
4	1,0	25	2,14
5	1,5	25	4,56
6	0,5	25	3,52
7	1,0	20	3,41
8	0,5	20	6,44
9	1,0	30	1,30
10	0,5	25	3,75
11	0,5	30	1,68
12	1,5	30	3,25
13	1,0	20	3,50
14	1,5	20	5,70
15	1,0	25	2,02
16	1,5	25	4,63
17	0,5	20	6,32
18	1,0	30	1,49
19	0,5	25	3,41
20	1,0	25	2,46
21	1,5	30	3,54
22	0,5	20	6,56
23	0,5	30	1,76
24	1,0	30	1,12
25	1,5	20	5,73
26	1,0	20	3,60
27	1,5	25	4,23

Capítulo 3

Se puede apreciar en la tabla 3.1.1 que los valores de % Arena en el fino se encontraron por debajo de un ocho por ciento, valores que indican que a cualquiera de estas condiciones se pudiera operar.

3.2 Análisis estadístico

El análisis se desarrolló con el objetivo de obtener el comportamiento del porcentaje de arena en el fino (variable respuesta), con respecto a las variables independientes (flujo de agua y tiempo).

Para una mejor comprensión de cómo influyen en la variable respuesta las variables seleccionadas, se analizan los diagramas, tablas y gráficos que a continuación se muestran.

Tabla 3.2.1 Análisis de Varianza para %Arena en el fino

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Flujo de agua+bloque	92.1901	1	92.1901	1.76	0.1999
B:Tiempo	892.461	1	892.461	17.08	0.0006
AA	162.441	1	162.441	3.11	0.0940
AB	1.59724	1	1.59724	0.03	0.8631
BB	6.10512	1	6.10512	0.12	0.7363
bloques	24599.0	2	12299.5	235.34	0.0000
Error total	992.98	19	52.2621		
Total (corr)	26746.8	26			

R-cuadrada = 96.2875 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.4035 porciento

Error estándar del est. = 7.22925

Error absoluto medio = 4.51779

Estadístico Durbin-Watson = 1.40029 (P=0.0153)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.190488

En la tabla 3.2.1 se muestra la variabilidad de %Arena en el fino en piezas separadas para cada uno de los efectos, se prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 96.2875% de la variabilidad en %Arena en el fino. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95.4035%

3.2.2 Análisis de los efectos ejercidos por las variables independientes (tiempo y flujo de agua)

En la figura 11 (Diagrama de Pareto), y en la 12 (Efectos principales) y en la se puede apreciar que el tiempo es la variable más influyente para el % Arena en el fino.

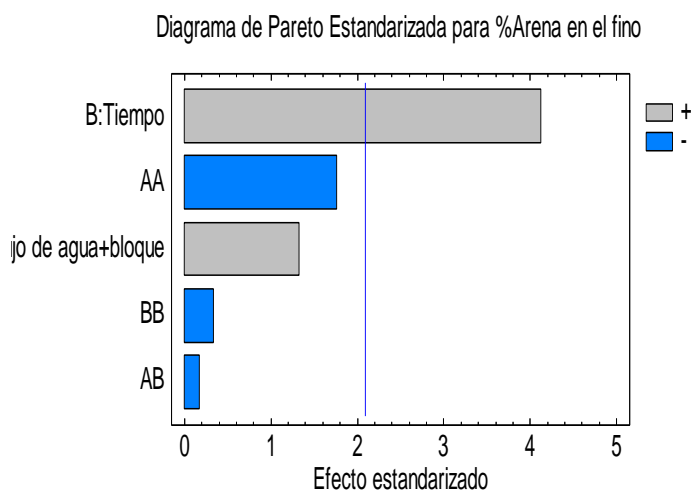


Figura 10: Diagrama de Pareto Estandarizado

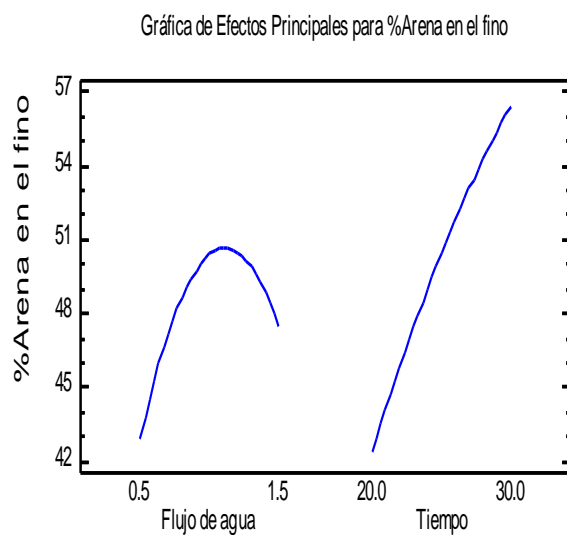


Figura 11: Efectos principales para el % de Arena en el fino

3.8.4 Análisis de residuos

La figura 13 muestra de manera general cómo los residuos se distribuyen con uniformidad de izquierda a derecha alrededor de la línea central, indicando una variación aleatoria alrededor de la línea; los cambios en la magnitud de los residuos de izquierda a derecha son una señal de que la varianza del

Capítulo 3

error experimental varía en el nivel promedio de la respuesta. Los puntos con marcado alejamiento respecto al grupo de los residuos se corresponden con el 95.4035 % de regresión obtenido en el ajuste del modelo, lo que indica que el 4.5965% de los casos se aleja de debido comportamiento y en consecuencia tienen mayor contribución al error.

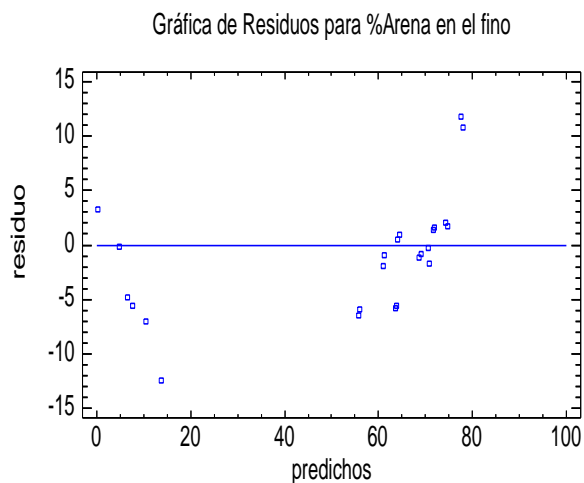


Figura 12: Gráfica de residuos para el % de arena

Tabla 3.2.2 Niveles para optimizar respuesta

Factor	Bajo	Alto
Flujo de agua	0.5	1.5
Tiempo	20.0	30.0

En la tabla 3.2.2 se muestra los distintos niveles de las variables independientes, para determinar las condiciones óptimas de operación.

Tabla 3.2.3 Condiciones óptimas para cada porcentaje de arena permisible

%A en el fino (%)	Flujo de agua(l/min)	Tiempo (s)
0.80 (mín)	0.88	30.00
1	1.01	29.64
2	0.94	25.48
3	1.42	29.87
4	1.31	21.51
5	1.42	20.16
6	0.51	20.12
6.14(máx)	0.50	20.00

Capítulo 3

Esta tabla 3.2.3 muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual optimiza el %Arena en el fino sobre la región indicada. Se escogió optimizar la respuesta para distintos por cientos de arena en el fino, de esta forma se puede operar a distintas condiciones según el porcentaje de arena deseado.

Se escogieron las condiciones óptimas de flujo y tiempo para un valor de 4% de arena como valor deseado, y a estas condiciones se realizó una prueba de clasificación, luego se realizaron pruebas de sedimentación y análisis químico.

3.3 Ensayo bajo condiciones óptimas obtenidas para un 4% de arena en el fino.

Tabla 3.3.1 Corrida experimental para condiciones óptimas

Flujo de agua (l/min)	Tiempo (seg)	Fino seco (g)	Arena fino (seca)	%Arena fino (%)
1.31	21.51	11.44	0.46	4.02

3.3.1 Determinación del % de arena en el fino por ecuación 7

$$\%A_F = \frac{0.46}{11.44} * 100$$

$$\%A_F = 4.02 \%$$

Como se puede apreciar el porcentaje de arena calculado fue aproximadamente igual al valor arrojado por el diseño.

Tabla 3.4 Determinación de las velocidades de sedimentación para un 4% de arena

t (min)	h (mm) Pulpa inicial	Velocidad (mm/min) Pulpa inicial	h (mm) Pulpa clasificada	Velocidad (mm/min) Pulpa clasificada
0	0	0	0	0
10	12	1.20	10	1.00
20	30	1.50	23	1.15
30	50	1.67	37	1.23
40	60	1.50	43	1.08
50	72	1.44	54	1.08
60	83	1.38	63	1.05
120	150	1.25	117	0.98

En la tabla 3.2.4 se muestran los datos de altura y velocidad para la determinación de las velocidades de sedimentación de la pulpa antes y después de clasificar.

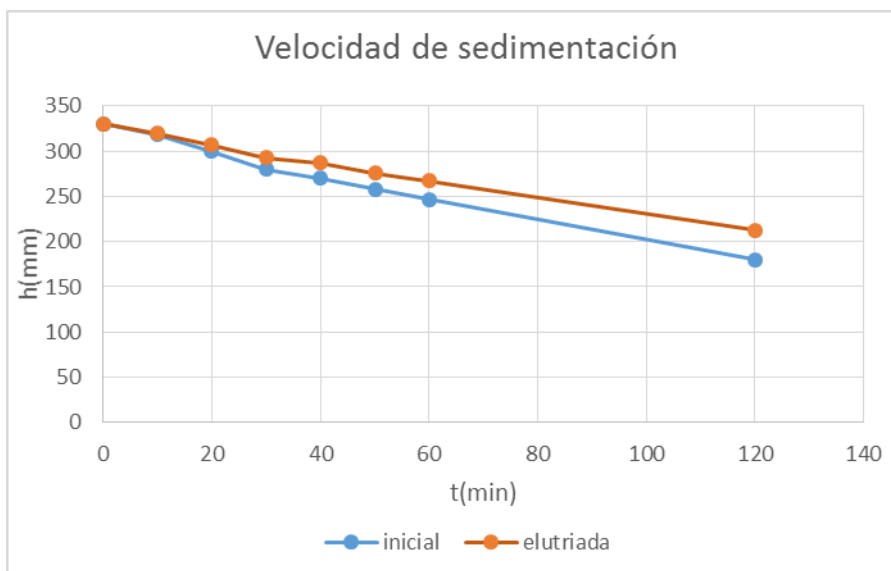


Figura 13: Curva de sedimentación para la pulpa antes y después de clasificar

La figura 13 señala las velocidades de sedimentación tanto para la pulpa inicial como para la pulpa clasificada. Se puede apreciar que ambas pulpas presentan una velocidad de sedimentación similar. Asumiendo que la arena no es determinante en la velocidad de sedimentación de la pulpa.

Según norma interna la velocidad de sedimentación se puede dividir en tres grupos:

- Velocidad de sedimentación mala menor de 85 mm en 2 horas
- Velocidad de sedimentación regular de 85 - 100 mm en 2 horas
- Velocidad de sedimentación buena más de 100 mm en 2 horas

Como se muestra en la figura 9 al cabo de 2 horas la pulpa inicial sedimentó 150 mm y la pulpa mineral clasificada sedimentó 120 mm respectivamente, encontrándose ambos en norma, lo que indica que la tecnología no afecta notablemente la sedimentación.

3.5 Análisis químico de la pulpa inicial y la clasificada

Tabla 3.5.1 Tabla comparativa entre la pulpa inicial y la clasificada

Contenido	Ni	Co	Mg	Si	Fe	Zn	Mn	Cu	Al	Cr
Pulpa inicial	1.08	0.069	0.731	7.47	39.96	0.041	0.259	0.021	4.12	1.58
Pulpa elutriada	0.99	0.060	0.221	5.32	39.06	0.038	0.256	0.019	4.02	1.50

Como se muestra en la tabla 3.5.1 el material después de ser clasificado disminuyó considerablemente el porcentaje de magnesio y silicio, factores fundamentales en el arenamiento y consumo excesivo de ácido del tren de reactores de la planta de Lixiviación Ácida a Presión. En cuanto a los otros elementos no hubo un cambio significativo, lo que permite concluir que la tecnología es conveniente ya que elimina gran contenido de agentes indeseables para el proceso y no afecta a los elementos de interés.

Capítulo 3

3.6 Determinación de velocidad de caída de la partícula para separar por elutriación partículas mayores de 0,15mm

Datos

$$d_p = 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\rho_{\text{partícula}} = 2480 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{fluido}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$Q_{\text{laboratorio}} = 8,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

3.6.1 Cálculo del factor de forma por ecuación ocho

$$K = 0.00015 \left[\frac{(2480 - 1000)}{0,005^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$K = 0.17094$$

Régimen	Rango "K"	Valor de : b	Valor de : n
Stokes	$0 \leq K \leq 3,30$	24,0	1,0

3.6.2 Determinación de la velocidad terminal de la partícula por ecuación nueve

$$v_t = \left[\frac{4 * 9,81 * 0.00015^{(1+1)} * (2480 - 1000)}{3 * 24 * 0.001^1 * 1000^{(1-1)}} \right]^{\left(\frac{1}{2-1}\right)}$$

$$v_t = 0.018150 \text{ m/s}$$

3.6.3 Determinación de velocidad en sección transversal por ecuación 10 para los diferentes flujos de trabajo.

$$\text{Para } Q_{\text{laboratorio}} = 8,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v = \frac{8,33 * 10^{-6}}{\frac{\pi * 0,06^2}{4}}$$

$$v = 0,00295 \text{ m/s}$$

$v_t > v$ La velocidad de caída de la partícula es mayor que la velocidad del fluido ascendente del fluido en la sección transversal por lo tanto la partícula sedimentará en el equipo.

$$\text{Para } Q_{\text{laboratorio}} = 1.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Capítulo 3

$$v = \frac{1,67 * 10^{-5}}{\frac{\pi * 0,06^2}{4}}$$

$$v = 0,00589 \text{ m/s}$$

$$v_t > v$$

Para $Q_{\text{laboratorio}} = 1.67\text{E-}05 \text{ m}^3/\text{s}$

$$v = \frac{2,5 * 10^{-5}}{\frac{\pi * 0,06^2}{4}}$$

$$v = 0,00884 \text{ m/s}$$

$$v_t > v$$

Como se puede observar en los cálculos anteriores la velocidad de caída de las partículas de diámetro de 0.15 mm es mayor que las velocidades de ascenso del fluido separador a los distintos flujos de operación. De esta forma se puede inferir que las partículas de este tamaño sedimentaran dentro del equipo a las distintas condiciones de flujo.

CONCLUSIÖNES

CONCLUSIONES

Una vez terminado el trabajo se arribó a las siguientes conclusiones:

1. Se clasificó la pulpa inicial alimentada al proceso de lixiviación ácida mediante pruebas de elutriación, identificando como productos principales la pulpa y el rechazo.
2. Se clasificó el mineral bajo condiciones óptimas (Flujo=1.31 l/min y tiempo=21.51 seg), presentando este en el fino un 4,02 % de arena, valor que se encuentra por debajo del máximo permisible (8%).
3. Se determinó las velocidades de sedimentación de las partículas en la pulpa inicial y en la pulpa clasificada siendo estas de: 150 mm/2hrs y 117 mm/2hrs respectivamente; demostrando así que la sedimentación del mineral es buena (>100 mm/2hrs) luego de la clasificación.
4. Se demostró que la separación de las arenas, además de la ventaja de disminuir la concentración de ellas en el material de alimentación a la planta de Lixiviación, disminuye los por cientos de magnesio y sílice, sin verse afectados los de níquel y cobalto.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Realizar ensayos de clasificación sin la utilización de agua bajo las condiciones óptimas de la clasificación con agua.
2. Realizar pruebas de lixiviación a la pulpa inicial y a la pulpa elutriada para analizar el comportamiento de las extracciones una vez clasificado el mineral.
3. Hacer análisis mineralógico a los productos de la clasificación.
4. Reincorporar los rechazos de la clasificación mediante un proceso de molienda.

IBIBLOKRAFJA

BIBLIOGRAFÍA

1. Alba ECPS. Pulpas de proceso.
2. 1 I. Separación de sólidos de sólidos separaciones hidraulicas separación de sólidos de líquidos. 2015.
3. Rúa MOB. Concentración de minerales. Universidad Nacional de Colombia. 2008.
4. UNAM FdQ. Procesos de Separación. Facultad de Química UNAM. 2008.
5. Pérez1 AM. Nuevo enfoque para el pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional Minería y Geología / v23 n3 / 2007 2007.
6. Alfonso EBAC-AFCAB. Manual De Entrenamiento En Concentración De Minerales. Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas – SERGEOTECMIN
7. Ruelas PH. Estudio hidrodinámico de la fluidización de de las partículas cilíndricas Instituto Tecnológico de Durango. 2009.
8. Andrea Blanco E. Capítulo 10. Clasificación Indirecta. Universidad de Cantabria, Santander, España. BLOQUE II
9. Correa AMO. Evaluación de un sistema de clasificación hidráulica para separación diferencial de mezclas sólidas. PFA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. 2011.
10. Chávez1 SF. Tecnología de clasificación fina de mineral metálico y no metálico. Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial Vol 12(1): pp 27-31 (2009) UNMSM ISSN: 1560-9146 (Impreso) / ISSN: 1810-9993 (Electrónico). 2009.
11. Amaury Palacios Rodríguez EGP. Extracción de cobalto mediante lixiviación ácida de los escombros lateríticos. V CONGRESO CUBANO DE MINERIA. 2013.
12. Ltd. DARMI. Principios básicos del análisis del tamaño de partículas iesmat, SA C/ Caléndula, 95 – Miniparc II 28109 Alcobendas (Madrid)
13. C.I. Paulo *a MSDb, M.R. Barbosa a Diseño óptimo de un proceso de separación de partículas finas. AAIQ Asociación Argentina de Ingenieros Químicos - CSPQ 2013.
14. Ing. Ariel Breff-Azaharezl DJF-H, Ing. Nadielza Góngora-FonsecaIII Evaluación de trabajo de un hidrociclón para la clasificación de la pulpa de cienos carbonatados Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. 2013
15. Hernández JF. Estudio de la clasificación de partículas. Tecnología Química, Vol XX, No 2, 2000 ISSN: 0041-8420. 2000.
16. Bermejo PM. Separación de partículas. Depto Farmacia y Tecnología Farmacéutica, Universidad de Valencia, España. 2003-2004.
17. Parra JP. Diseño de un tren de elutriadores. 2008.
18. Bird, R.B., et al., Fenómenos de transporte: un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento 1982: Reverté
19. Bird B. R., Stewart, E. W. Lightfoot, N. E.: Fenómenos de Transporte. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1979.

20. Geankoplis. Chistic, J "Procesos de Transporte y operaciones unitarias",Compañía editorial continental, S.A De C.V México. University of Mennesoto. Tercera Edición México, 1998
21. <http://www.monografias.com/trabajos82/sedimentacion-y-espesamiento-minerales/sedimentacion-y-espesamiento-minerales.shtml#ixzz4if3ETZ8s>

NOMENCLATURA

NOMENCLATURA

Minúsculas

d	Diámetro del desarenador
g	Aceleración de la gravedad
rpm	Revoluciones por minuto
t_r	Tiempo de residencia
v	Velocidad del agua ascendente

Mayúsculas

A	Área transversal al escurrimiento
Cd	Coeficiente de arrastre
D_s	diámetro de la partícula
FF	Fuerza de flotación
FG	Fuerza gravitacional
F_i	Fuerza resultante o fuerza de impulsión
F_r	Fuerza de rozamiento
K	Factor de forma
$Q_{\text{suspensión}}$	Flujo volumétrico del fluido ascendente
V	Volumen de la partícula de la acción de ambas fuerzas
V_{lim}	Velocidad límite
$v_{\text{líquido}}$	Velocidad del líquido
V_s	Velocidad de sedimentación
V_r	Velocidad relativa

$$\frac{V_s^2}{2}$$

Energía cinética

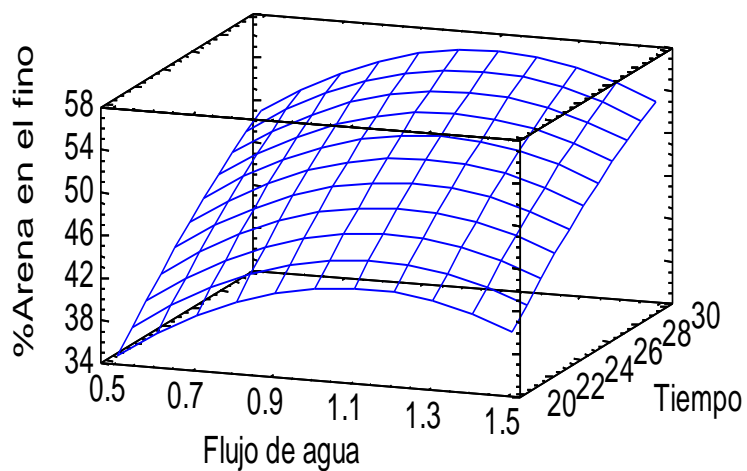
Letras griegas

ρ	Densidad del líquido
ρ_s	Densidad del sólido
μ	Viscosidad del líquido

ANEXOS

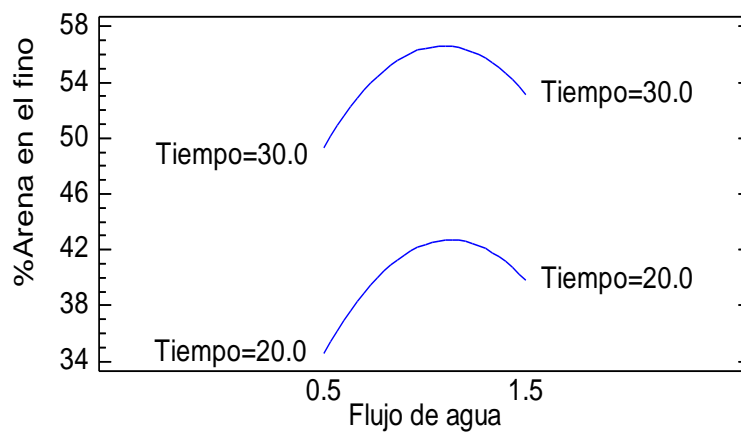
ANEXOS

Superficie de Respuesta Estimada

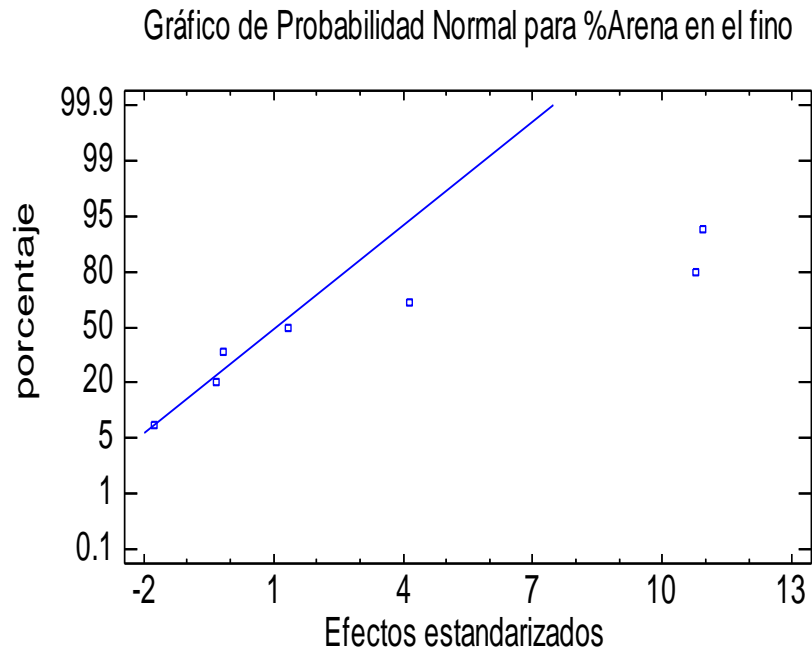


Anexo 1: Superficie de Respuesta Estimada

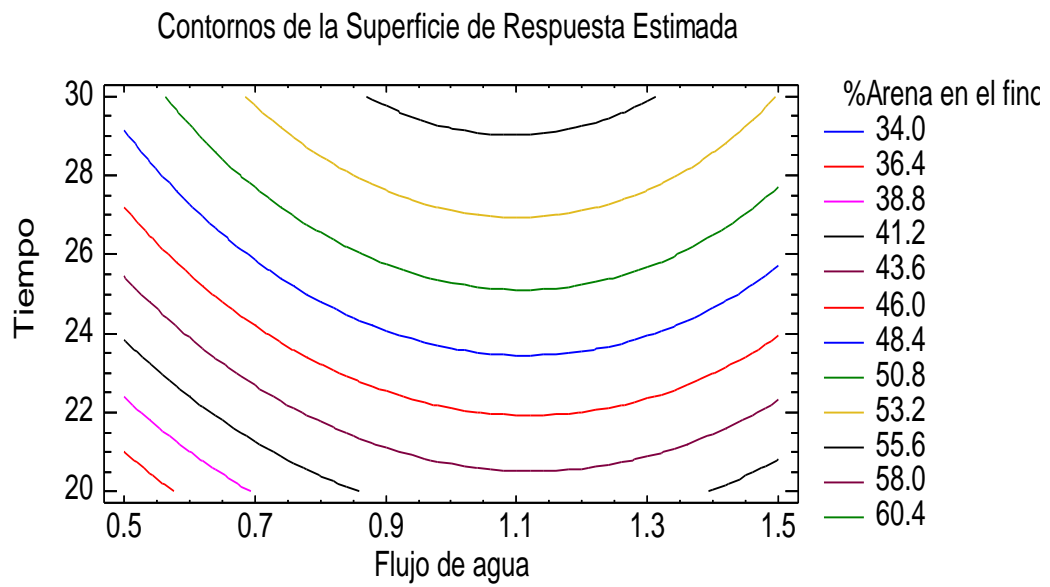
Gráfica de Interacción para %Arenas en el fino



Anexo 2: Gráfica de interacción para %A_F



Anexo 3: Gráfica de probabilidad normal para %A_F



Anexo 4: Contornos de la superficie de respuesta estimada

Tabla A1: Corridas experimentales de la elutriación

Exp	Flujo (l/min)	Tiempo (seg)	h(cm)	%S de rechazo (%)	%S Fino (%)	Masa Húmeda de rechazo (g)	Masa Húmeda de fino (g)
1	0,5	30	8,80	56,60	17,50	11,80	148,40
2	1,5	30	26,50	57,40	9,18	12,50	100,00
3	1,5	20	17,70	57,07	26,22	10,00	82,00
4	1,0	25	14,70	55,16	16,35	12,50	141,10
5	1,5	25	22,10	57,00	18,53	11,30	121,30
6	0,5	25	7,40	57,33	18,56	12,10	100,00
7	1,0	20	11,80	57,17	9,18	12,90	100,00
8	0,5	20	5,90	57,78	11,44	7,10	100,00
9	1,0	30	17,70	57,20	17,50	12,20	100,00
10	0,5	25	7,40	57,66	13,99	13,20	100,00
11	0,5	30	8,80	56,52	22,07	14,50	96,00
12	1,5	30	26,50	58,08	18,47	11,10	100,00
13	1,0	20	11,80	57,65	17,67	11,60	100,00
14	1,5	20	17,70	56,07	14,45	10,10	100,00
15	1,0	25	14,70	58,53	13,45	11,40	100,00
16	1,5	25	22,10	57,01	21,95	11,50	77,00
17	0,5	20	5,90	58,58	17,99	11,00	100,00
18	1,0	30	17,70	56,02	19,66	11,30	100,00
19	0,5	25	7,40	57,72	19,05	13,80	86,03
20	1,0	25	14,70	55,46	19,54	11,70	75,02
21	1,5	30	26,50	55,95	19,85	11,30	71,30
22	0,5	20	5,90	57,61	17,88	12,20	80,00
23	0,5	30	8,80	55,61	20,25	13,50	49,00
24	1,0	30	17,70	54,50	19,08	13,30	62,70
25	1,5	20	17,70	57,85	15,49	10,70	77,00
26	1,0	20	11,80	56,14	18,85	11,50	83,00
27	1,5	25	22,10	60,00	22,29	10,80	56,80

Continuación de tabla A1

Exp	Flujo (l/min)	Tiempo (seg)	h(cm)	Masa seca de rechazo (g)	Masa seca de fino (g)	Masa de arena en el rechazo (seca) (g)	Masa de arena en el fino (seca) (g)	%Arena rechazo (%)	%Arena fino (%)
1	0,5	30	8,80	6,68	25,97	4,65	0,49	69,69	1,87
2	1,5	30	26,50	7,18	9,18	5,45	0,31	76,01	3,39
3	1,5	20	17,70	5,71	21,50	3,40	1,20	59,50	5,60
4	1,0	25	14,70	6,90	23,07	5,05	0,49	73,21	2,14
5	1,5	25	22,10	6,44	22,48	4,37	1,03	67,88	4,56
6	0,5	25	7,40	6,94	18,56	4,49	0,65	64,68	3,52
7	1,0	20	11,80	7,37	9,18	4,28	0,31	57,99	3,41
8	0,5	20	5,90	4,10	11,44	2,02	0,74	49,19	6,44
9	1,0	30	17,70	6,98	17,50	6,21	0,23	89,05	1,30
10	0,5	25	7,40	7,61	13,99	4,98	0,52	65,40	3,75
11	0,5	30	8,80	8,20	21,19	5,66	0,36	69,10	1,68
12	1,5	30	26,50	6,45	18,47	4,92	0,60	76,30	3,25
13	1,0	20	11,80	6,69	17,67	3,89	0,62	58,20	3,50
14	1,5	20	17,70	5,66	14,45	3,41	0,82	60,30	5,70
15	1,0	25	14,70	6,67	13,45	4,91	0,27	73,56	2,02
16	1,5	25	22,10	6,56	16,90	4,46	0,78	68,10	4,63
17	0,5	20	5,90	6,44	17,99	3,23	1,14	50,08	6,32
18	1,0	30	17,70	6,33	19,66	5,62	0,29	88,80	1,49
19	0,5	25	7,40	7,97	16,39	5,15	0,56	64,62	3,41
20	1,0	25	14,70	6,49	14,66	4,74	0,36	73,02	2,46
21	1,5	30	26,50	6,32	14,15	4,83	0,50	76,34	3,54
22	0,5	20	5,90	7,03	14,30	3,46	0,94	49,19	6,56
23	0,5	30	8,80	7,51	9,92	5,27	0,17	70,21	1,76
24	1,0	30	17,70	7,25	11,96	6,48	0,13	89,45	1,12
25	1,5	20	17,70	6,19	11,93	3,65	0,68	59,04	5,73
26	1,0	20	11,80	6,46	15,65	3,73	0,56	57,75	3,60
27	1,5	25	22,10	6,48	12,66	4,38	0,54	67,54	4,23

