

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO
EN INYESA Ltda.**

**DARIO HUMBERTO QUINTERO INFANTE
DIANA KAROLINA VERGEL ROYERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA
BUCARAMANGA**

2010

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO
EN INYESA Ltda.**

**DARIO HUMBERTO QUINTERO INFANTE
DIANA KAROLINA VERGEL ROYERO**

**Trabajo de grado como requisito para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico**

**DIRECTOR
WALTER PARDAVÉ LIVIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

Doy infinitas gracias al Todopoderoso, dador de la vida, mi guía, mi fortaleza y luz que ilumina siempre mi camino, por permitirme ser quien soy y darme la posibilidad de alcanzar este y todos los demás logros de mi vida.

A mis padres Edgar y Doris por su gran e incansable labor, por su incondicional apoyo, amor e inagotable confianza en cada una de mis decisiones, por ser los mejores amigos y consejeros durante toda esta etapa de mi vida aun en la distancia, por ser la fuente de fortaleza en los momentos que más lo necesitaba y por haber sido un claro ejemplo en mi vida de dedicación y tenacidad.

Solo a ustedes puedo dedicar este y todos los demás logros de mi vida por haberme concedido el milagro de vida, por haber hecho de mí el ser humano que hoy soy, por haber sembrado en mí las ganas de superarme y de salir adelante, por confiar en mis capacidades y porque gracias a ustedes he podido materializar muchos de los sueños y metas de mi vida.

A mis hermanitos Mario y Andrea porque a pesar de la distancia siempre sentí su respaldo y compañía, por brindarme su apoyo, cariño y porque siempre sentí de su parte orgullo y felicidad al verme cada vez más cerca de cruzar la meta.

A mi gran amigo Darío por brindarme su apoyo de manera incondicional durante toda esta etapa de mi vida,, Gracias nene...

KAROLINA

A Dios y la virgen María, gracias por las infinitas bendiciones que le han dado a mi vida, por siempre y en todo momento estar a mi lado y por regalarme las herramientas para hacer posible cada uno mis sueños.

A mi madre querida del alma, por brindarme su esfuerzo, su cariño, su apoyo, su amor y su confianza, gracias, infinitas gracias por ser la guía en el camino de mi vida.

A mi padre, por su esfuerzo y sacrificio, por darme su apoyo y confianza, por su amor y siempre esperar lo mejor de mí, gracias, infinitas gracias.

A mi hermano, gracias por su cariño sincero, le dedico este logro para que descubra que todos los sueños son posibles de alcanzar.

A mi nona María (E.P.D), por llenar mi vida amor y cariño... porque sin ella no sería la persona que soy.

A mi tío papo (E.P.D), gracias por su infinito amor, por enseñarme a entender todos los conflictos de la vida y aceptar las personas tal y como son.

A mi nona Belén, gracias por su apoyo en todo momento, por creer en mis capacidades y llenarme de confianza para alcanzar todas mis metas.

A mi amiga Karolína, por su amistad incondicional y cariño verdadero, gracias, muchísimas gracias por acompañarme en esta etapa de la vida.

A mis familiares y amigos, que siempre han creído en mí y me han ayudado en todo momento.

DARIO

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos de manera conjunta a todas las personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

A WALTER PARDAVÉ LIVIA, Ingeniero Metalúrgico M. Sc., y director de esta investigación por haber depositado su confianza en nosotros, por brindarnos su apoyo, orientación y respaldo.

A AMBROSIO CARRILLO CARRILLO, Técnico de la escuela de Ingeniería Metalúrgica por su constante colaboración, amabilidad, apoyo y por facilitar muchas de las herramientas requeridas para el desarrollo de este estudio.

A HECTOR JAVIER GAITAN, Técnico de la escuela metalúrgica por su gran colaboración.

A INDUSTRIA YESERA SANTANDEREANA INYESA Ltda., por su respaldo y confianza.

A nuestros amigos Sergio y Laura por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos vividos en esta etapa de nuestras vidas.

A todas las demás personas que de alguna u otra manera hicieron posible que esta investigación sea una realidad.

CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCION	20
OBJETIVOS	21
OBJETIVO GENERAL	21
OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
1. FUNDAMENTO TEORICO	22
1.1 GENERALIDADES SOBRE EL YESO	22
1.1.1 Variedades mineralógicas	22
1.1.2 Yacimientos	23
1.1.3 Propiedades físicas y químicas.	24
1.2 PROCESO GENERAL DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO	26
1.3 DESHIDRATACIÓN DEL MINERAL DE YESO	28
1.4 CONMINUCIÓN DE MINERALES DE YESO	29
1.4.1 Mecanismos de conminución	29
1.4.2 Funcionamiento de un molino de bolas	31
1.5 BENEFICIO DE MINERALES DE YESO EN INDUSTRIA YESERA SANTANDEREANA INYESA Ltda.	34
1.5.1 Diagrama de bloques del proceso de beneficio de yeso en Inyesa Ltda.	38
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	40
2.1 MUESTREO EN LA PLANTA INDUSTRIAL.	41
2.2 CARACTERIZACION FISICA Y QUIMICA DEL MINERAL.	42
2.2.1 Caracterización química	43
2.2.2 Caracterización física	43
2.3 BALANCE DE MATERIALES PARA EL PROCESO ACTUAL DE BENEFICIO DE YESO EN LA PLANTA INDUSTRIAL INYESA LTDA.	44
2.4 ENSAYOS PRELIMINARES	44

2.4.1 Etapa de molienda	44
2.4.2 Etapa de calcinación	46
2.4.3 Etapa de molienda final.	49
2.5 DESARROLLO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LAS ETAPAS DE MOLIENDA, CALCINACION Y MOLIENDA FINAL.	50
2.5.1 Variables de entrada	51
2.5.2 Variables de salida	52
2.5.3 Condiciones operativas constantes diseño experimental	53
2.5.4 Análisis de resultados del diseño experimental.	56
2.6. PROPUESTA PARA EL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO.	57
3. RESULTADOS EXPERIMENTALES	58
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL.	58
3.1.1 Determinación del porcentaje de SO ₃ en las muestras tomadas en la planta industrial INYESA Ltda.	58
3.1.2 Determinación de la distribución granulométrica de las muestras tomadas la planta industrial INYESA Ltda.	59
3.2 BALANCE DE MATERIALES DEL PROCESO ACTUAL EN LA PLANTA INDUSTRIAL INYESA Ltda.	61
3.3 DETERMINACION DE LOS NIVELES DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES PARA LAS ETAPAS DE MOLIENDA, CALCINACION Y MOLINDA FINAL A PARTIR DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES.	64
3.3.1 Etapa de molienda	64
3.3.2 Etapa de calcinación	66
3.3.3 Etapa de molienda final	68
3.4 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN PRUEBAS DE LABORATORIO.	71
3.4.1 Etapa de molienda	71
3.4.2 Etapa de calcinación	75

3.4.3 Etapa de molienda final	80
3.5 PROPUESTA PARA EL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO.	84
3.5.1 Determinación del porcentaje de SO ₃ en las muestras tomadas para el diseño básico de planta propuesto.	85
3.5.2 Análisis granulométrico de las muestras tomadas para el diseño básico de planta propuesto	86
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFIA	94
ANEXOS	98

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 1. Mina de La Chorrera yeso ubicada en el municipio de los Santos - Santander	24
Figura 2. Diagrama de proceso de beneficio de minerales de yeso.	27
Figura 3. Esquema de la acción de esfuerzos de compresión	30
Figura 4. Esquema de la acción de esfuerzos de impacto	30
Figura 5. Esquema de la acción de esfuerzos de impacto	31
Figura 6. Esquema de la acción de esfuerzos de cizalle	31
Figura 7. Movimiento de la carga de un molino operando a velocidad normal.	33
Figura 8a. Planta productora de yeso INYESA Ltda	35
Figura 8b. Horno rotario ubicado en la planta productora de yeso INYESA Ltda.	35
Figura 9. Horno de secado de yeso en INYESA Ltda.	36
Figura 10. Horno de calcinación de yeso en INYESA Ltda.	37
Figura 11. Diagrama de bloques Inyesa Ltda.	39
Figura 12. Diagrama de flujo para la metodología experimental.	41
Figura 13. Puntos del circuito de producción de yeso en INYESA LTDA, donde se realizo el muestreo.	42
Figura 14. Rotap y serie de tamices.	43
Figura 15. Molino de bolas del laboratorio	46
Figura 16. Mufla tipo D8 del laboratorio	48
Figura 17. Propuesta para el circuito de producción de yeso y puntos donde se realizó el muestreo.	57
Figura 18. Distribución Granulométrica de la muestra M1.	59
Figura 19. Distribución Granulométrica de la muestra M2 y M3	60
Figura 20. Distribución granulométrica muestra M4	60
Figura 21. Diseño básico de planta del proceso actual de beneficio de minerales de yeso INYESA Ltda	62

Figura 22. Variación del porcentaje de mineral pasante en la malla 100m (Tyler) respecto al tiempo de molienda.	65
Figura 23. Porcentaje de SO ₃ Vs. Tiempo de Calcinación (T= 110°C)	67
Figura 24. Porcentaje de SO ₃ Vs. Temperatura de Calcinación (t= 30 min).	68
Figura 25. Variación del porcentaje de mineral pasante en malla 200m Tyler respecto al tiempo de molienda	70
Figura 26. Mapa de Pareto estandarizado para el % peso (-100m).	73
Figura 27. Diagrama de efectos principales para el %peso (-100m)	74
Figura 28. Muestra de mineral antes y después de la etapa de calcinación.	76
Figura 29. Mapa de pareto estandarizado para %SO ₃ en calcinación	77
Figura 30. Diagrama de efectos principales para %SO ₃ en calcinación.	78
Figura 31. Mapa de Pareto estandarizado para el %peso (-200m).	81
Figura 32. Diagrama de efectos principales para el %peso (-200m).	82
Figura 33. Triturador cónico del laboratorio	85
Figura 34. Distribución granulométrica después de trituración P2 y P3 para el proceso propuesto	87
Figura 35. Distribución granulométrica después de molienda P4 y P5 para el proceso propuesto	87
Figura 36. Distribución granulométrica después de Remolienda P6 para el proceso propuesto	88
Figura 37. Diseño básico de planta propuesto para el beneficio de minerales de yeso	89

LISTA DE TABLAS

	PÁG.
Tabla 1. Propiedades físicas del yeso	25
Tabla 2. Composición química del yeso	25
Tabla 3. Cálculo de emisiones de material particulado en INYESA Ltda.	38
Tabla 4. Variables y Niveles de variables independientes en la etapa de molienda.	54
Tabla 5. Combinación de variables para la etapa de molienda.	54
Tabla 6. Variables y Niveles de variables independientes en la etapa de molienda final.	55
Tabla 7. Combinación de variables para la etapa de molienda final.	55
Tabla 8. Variables y Niveles de variables independientes en la etapa de calcinación.	56
Tabla 9. Combinación de variables para la etapa de calcinación.	56
Tabla 10. Porcentaje de SO ₃ para las muestras tomadas en la planta industrial.	58
Tabla 11. Peso y porcentaje de mineral retenido y pasante de la malla 100m (Tyler)	65
Tabla 12. Porcentaje de SO ₃ obtenido en el mineral después de calcinación a diferentes tiempos. (T=110°C).	67
Tabla 13. Porcentaje de SO ₃ obtenido en el mineral después de calcinación a diferentes temperaturas. (30 minutos).	68
Tabla 14. Peso y porcentaje de mineral retenido y pasante de la malla 200m Tyler	69
Tabla 15. % Peso (-100m) obtenido en la etapa de molienda.	71
Tabla 16. Valores adecuados para el %peso (-100m) en etapa de molienda.	75
Tabla 17. Porcentaje de SO ₃ obtenido en la etapa de calcinación.	76
Tabla 18. Valores adecuados para %SO ₃ en etapa de calcinación.	79
Tabla 19. % peso (-200m) obtenido en la etapa de molienda final.	80

Tabla 20. Valores adecuados para %peso (-200m) en la etapa de molienda final.	83
Tabla 21. Porcentaje de SO ₃ para las muestras tomadas en el diseño básico de planta propuesto para el beneficio de yeso.	86

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DETERMINACION GRAVIMETRICA DE SO ₃ EN UN YESO	99
ANEXO B. DISTRIBUCIÓN DE BOLAS PARA PRUEBAS PRELIMINARES	101
ANEXO C. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LA MUESTRA M1	103
ANEXO D. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LA MUESTRA M2 Y M3	104
ANEXO E. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LA MUESTRA M4	105
ANEXO F. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA MINERAL INICIAL P1 PARA EL PROCESO PROPUESTO	106
ANEXO G. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DESPUES DE TRITURACION P2 y P3 PARA EL PROCESO PROPUESTO	107
ANEXO H. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DESPUES DE MOLIENDA P4 y P5 PARA EL PROCESO PROPUESTO	108
ANEXO I. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DESPUES DE REMOLIENDA P6 PARA EL PROCESO PROPUESTO	109

RESUMEN

TITULO: MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO EN INYESA Ltda^{*}.

AUTORES: DARIO HUMBERTO QUINTERO INFANTE
DIANA KAROLINA VERGEL ROYERO^{**}

PALABRAS CLAVES: Yeso, molienda, diseño experimental, calcinación.

DESCRIPCION

Se realizó una propuesta para el establecimiento de condiciones operativas al proceso de beneficio de minerales de yeso llevado a cabo en la planta industrial INYESA Ltda., basado en el estudio de las etapas de molienda, calcinación y molienda final aplicando técnicas del diseño experimental con el objetivo de evaluar la incidencia de las variables de entrada sobre las variables de salida. Los ensayos de molienda se realizaron en un molino de bolas y las de calcinación en una mufla. La etapa de molienda se analizó midiendo el efecto de la carga de bolas, el tiempo de residencia y el tamaño de partícula de alimentación sobre el porcentaje en peso pasante de la malla 100m (Tyler). La etapa de calcinación se analizó evaluando el efecto del tiempo, temperatura y tamaño de partícula en el %SO₃ de la muestra. La molienda final se analizó midiendo el efecto de la carga de bolas, el tiempo y tamaño de partícula de alimentación sobre el porcentaje en peso de la malla 200m (Tyler).

Se realizó un análisis granulométrico por tamizado y determinación del %SO₃ a las muestras tomadas en todo el circuito de beneficio de la planta industrial.

Finalmente se provee un diseño básico de planta con balance de materia y las variables operativas seleccionadas a nivel de laboratorio, que permitirían establecer las condiciones más favorables para el proceso productivo en la planta industrial.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardavé Livia.

ABSTRACT

TITLE: IMPROVING THE PROCESS OF GYPSUM BENEFIT FROM GYPSUM MINERALS IN INYESA SA*.

AUTHORS: Dario Humberto Quintero Infante
Diana Karolina Vergel Royero**

Key Words: Gypsum, grinding, experimental design, calcination, %SO₃

SUMMARY

A proposal was made for the establishment of operating conditions for benefit of minerals process of gypsum, conducted in the industrial plant INYESA Ltd., based on the study of grinding stages, calcination and final grinding applying experimental design techniques to evaluate the impact of input variables on output variables. Grinding tests were conducted in a ball mill and the calcination in an oven. The grinding stage was analyzed by measuring the effect of the ball charge; the residence time and feeding particle size on the percentage by weight passing of the 100m mesh (Tyler).

The calcination stage was analyzed by evaluating the effect of time, temperature and particle size in the percentage of SO₃ in the sample. The final grinding was analyzed by measuring the effect of the ball charge, time and feed particle size on the percentage by weight passing of the 200m mesh (Tyler).

Particle size analysis was performed by sieving and determination of SO₃ percentage (%SO₃), to samples taken at all stages of the benefit process of the industrial plant.

Finally, it provides a basic design of plant with material balance and operating variables selected in the laboratory, which would establish the most favorable conditions for the production process in the plant.

* Work of Degree

** Faculty of engineerings Physicist - Chemistries. School of Metallurgical engineering. The director: Walter Pardavé Livia.

INTRODUCCION

El beneficio de minerales de yeso es un proceso de enriquecimiento del SO_3 conformado por diversas etapas de operaciones unitarias en donde se encuentran incluidas variables operativas que afectan la eficiencia de cada operación, por lo cual es muy importante identificar y conocer las variables que permitan lograr un mejor aprovechamiento a lo largo del proceso de producción y así evitar pérdidas significativas en el beneficio de este tipo de minerales.

El estudio de los procesos de beneficio de yeso permite conocer y analizar el comportamiento de cada una de las variables operativas que controlan las etapas del beneficio del mineral, por lo que esto se convierte en una herramienta útil para determinar cuáles son las condiciones de operación que permiten obtener mayor eficiencia en el proceso.

La importancia del conocimiento de las variables que controlan los procesos radica en que una vez determinadas, es posible ejercer control sobre éstas y de esta manera hacer más eficaz el proceso productivo.

En esta investigación se pretende realizar un estudio del proceso de beneficio de minerales de yeso llevado a cabo en la planta industrial Santandereana INYESA Ltda., con el fin de identificar las variables operativas que tienen el efecto más significativo dentro del proceso productivo y de esta manera ejercer control sobre las condiciones operativas del proceso. Además proponer un diseño básico de planta del proceso de beneficio de yeso, con variables de operación plenamente identificadas y definidas, buscando obtener productos de mejor calidad y con ello propender por una mejor tecnología y productividad del yeso en la planta industrial INYESA Ltda.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Proponer condiciones operativas para el proceso de beneficio de minerales de yeso en INYESA Ltda, seleccionando variables operativas mediante aplicación del diseño de experimentos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar el efecto de las variables independientes sobre la variable respuesta obtenidos en el diseño experimental para las etapas de molienda, calcinación y remolienda con ayuda del paquete estadístico STATGRAPHICS.
- Proponer condiciones operativas para el proceso de beneficio de minerales de yeso en INYESA Ltda.
- Realizar un diseño básico de planta con balance de materiales para el circuito actual del proceso de beneficio de minerales de yeso en INYESA Ltda.
- Proponer un diseño básico de planta con balance de materiales para el circuito de beneficio de minerales de yeso.

1. FUNDAMENTO TEORICO

1.1 GENERALIDADES SOBRE EL YESO

Se da el nombre de yeso a un mineral constituido por sulfato de calcio que incluye en los retículos de sus cristales monoclinicos dos moléculas de agua de cristalización, cuya fórmula es $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$. Se encuentra abundantemente en la naturaleza en gran variedad de formas y colores, dependiendo de su pureza y de su formación geológica.

Las principales impurezas que contienen los minerales de yeso son los carbonatos de Calcio y Magnesio y los óxidos de Hierro y Aluminio.

1.1.1 Variedades mineralógicas

En la naturaleza existen diferentes variedades o tipos de yeso:

- Yeso masivo o roca de yeso: Es la variedad más común. Cuando se encuentra puro es blanco, pero comúnmente presente coloraciones en rosado, azul, amarillo, gris, etc. Cuando presenta grano fino y se presta para ser tallado, se llama Alabastro.
- Selenita: es una forma de yeso en cristales. La selenita pura es incolora y transparente.
- Espato Satinado o yeso fibroso: puede ser de color blanco o rosado y en ocasiones amarillo. Casi nunca se encuentra grandes depósitos. Se presenta a veces dentro del Yeso masivo.¹

¹ DAZA, Imelda. Minería del yeso en Colombia. Bogotá, Ministerio de Minas Y Petróleos 1972.

1.1.2 Yacimientos

El yeso es un mineral localizado frecuentemente en las rocas sedimentarias que la mayoría de veces forma capas delgadas, ubicadas generalmente bajo depósitos de sal, por haber sido uno de los primeros minerales que cristalizaron por evaporación de aguas salinas. Se halla en regiones volcánicas especialmente si las calizas han sido afectadas por vapores sulfurosos. Se encuentra asociado habitualmente a minerales como la halita, anhidrita, calcita, azufre, pirita y cuarzo.

²

Existen grandes depósitos de yeso en muchos lugares del mundo, en Colombia posee variedades mineralógicas de este mineral en yacimientos ubicados en Santander, Tolima, Cundinamarca, Boyacá y La Guajira.

En Santander los minerales de yeso tienen una distribución restringida y se presenta en las variedades de selenita, yeso fibroso o espató satinado dentro de la Formación Paja. El yeso gris está contenido en los estratos inferiores de la Formación Rosa Blanca de donde proviene la totalidad de producción de Santander, que es el principal productor de yeso en el país, con una producción anual que varía entre 100.000 y 150.000 toneladas, la cual sufre en gran porcentaje las necesidades de la industria cementera del país.

En los depósitos de Los Santos y Villanueva Santander, en lo correspondiente al Aporte 019 de Mineralco, se han calculado reservas inferidas de 160 millones de toneladas, reservas indicadas de 35 millones de toneladas, reservas medidas de 20 millones de toneladas y también han sido medidos 2,4 millones de toneladas de yeso tierra (granulado), según Mendoza y Riaño (1994-1995). En 1994 la

² JAMES DWIGHT, Dana. HURLBUT S, Cornelius. Manual de mineralogía. Barcelona. Reverte. 1962. 2 Edición.

producción de yeso en Santander fue de 161.400 toneladas; de éstas, 89.400 son de Los Santos, 48.000 de Villanueva y 24.000 de Zapatoca.³

Figura 1. Mina de La Chorrera yeso ubicada en el municipio de los Santos - Santander



Fuente: Autores del proyecto.

1.1.3 Propiedades físicas y químicas.

La tabla 1 presenta las propiedades físicas del yeso y la tabla 2 muestra la composición general del yeso.

³ “MAPA GEOLÓGICO GENERALIZADO DEPARTAMENTO DE SANTANDER”, Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear, INGEOMINAS, 2000.

Tabla 1. Propiedades físicas del yeso

Brillo	Generalmente Vítreo; también perlado y sedoso.
Color	Incoloro, blanco, gris; diversas tonalidades de amarillento, rojizo, castaño como consecuencia de impurezas.
Densidad	2.32 g/cm³
Transparencia	Transparente a traslucido.
Dureza	2 (puede ser rallado con la uña).
Fractura	Fibrosa paralela a (011)
Exfoliación	En 4 direcciones; perfecta paralela a (010), con producción fácil de hojas delgadas; con superficie concoidea paralela a (100).

Fuente: JAMES DWIGHT, Dana. HURLBUT S, Cornelius. Manual de mineralogía. Barcelona. Reverte. 1962. 2 Edición.

Tabla 2. Composición química del yeso

Peso molecular	172,17 g/mol			
Composición	Ca	23.28%	CaO	32.57%
	H	2.34%	H₂O	20.93%
	S	18.62%	SO₃	46.5%
	O	55.76%	Total	100%
	Total	100%		
Formula empírica	CaSO₄*2H₂O			
Nombre del compuesto	Sulfato cálcico hidratado			

Fuente: JAMES DWIGHT, Dana. HURLBUT S, Cornelius. Manual de mineralogía. Barcelona. Reverte. 1962. 2 Edición.

Es importante resaltar que el sulfato cálcico hidratado es insoluble en agua (0,223 g por 100g a 0°C y 0,25g por 100 g a 50°C). Soluble en ácidos, sales de amonio y cloruro de sodio.⁴

1.2 PROCESO GENERAL DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO

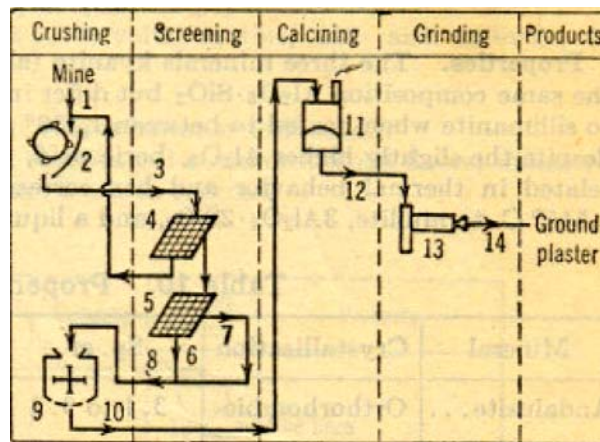
A nivel industrial el beneficio de minerales de yeso se realiza por medio de extracción directa de diversas rocas de yeso en minas o canteras y está basado en el enriquecimiento del porcentaje de SO₃ del mineral extraído.

La calidad y propiedades del producto obtenido, dependen del control que se tenga sobre las variables de operación en cada una de las etapas del proceso de producción, por ello es importante tener en cuenta aspectos como la calidad y composición de la materia prima, el grado de selección realizado, método empleado para la calcinación del mineral así como temperatura y tiempo del mismo, la calidad en los procesos de molienda, cribado y la verificación de la calidad en el producto final.

La figura 2 muestra un diagrama de flujo generalizado de una planta productora de yeso.

⁴ W. L. Faith, KEYES B., L, Ronald Clark. Industrial Chemicals. John Wiley & Sons, III Edition 1966.

Figura 2. Diagrama de proceso de beneficio de minerales de yeso.



Fuente: Handbook Of Mineral Dressing; Ores And Industrial Mineral. Taggart, Arthur F. New York: John Wiley, 1945.

La fase de trituración es el primer proceso de conminución donde el mineral proveniente de la mina, es reducido a un tamaño aproximado de ½ a 1 pulg. Para realizar esta reducción de tamaño en el mineral existen diversos métodos, tales como: aplastamiento, percusión, abrasión, disminución de presión interna, fuerzas ultrasónicas. De los cuales el más recomendado es el de percusión, el cual se realiza en trituradoras de mandíbulas o molinos de impacto. Una vez finalizada la trituración el mineral es llevado a la segunda etapa.

La fase de cribado comprende la clasificación por tamaños del mineral proveniente de la fase anterior, los gruesos de mineral regresan a la fase anterior hasta lograr el tamaño requerido, los finos pasan a una segunda etapa de cribado. Posteriormente el mineral pasa a una segunda etapa de trituración, que generalmente se realiza en molinos de bolas o martillos. El mineral obtenido es llevado hasta la etapa siguiente a través una cinta transportadora.

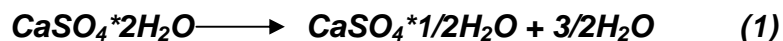
Durante la calcinación el mineral es sometido a la acción del calor con el fin lograr la deshidratación parcial del mismo, por ello es importante tener un control estricto sobre las condiciones operativas con el fin de garantizar la calidad del producto

final. Generalmente los hornos utilizados para este proceso pueden ser verticales u horizontales y estos a su vez fijos o rotarios.

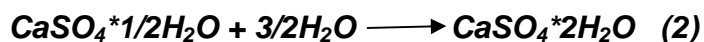
Se realiza un proceso de molienda del mineral calcinado hasta obtener el tamaño adecuado para la comercialización. Luego el producto es llevado a través de un elevador hasta la maquina empacadora. De esta manera se obtiene el yeso comercial.

1.3 DESHIDRATACIÓN DEL MINERAL DE YESO

Cuando el mineral de yeso se encuentra sometido a rangos de temperatura entre 120°C a 160°C, ocurre la deshidratación parcial del mineral, dando lugar a la transformación de sulfato cálcico hidratado a hemihidratado, como consecuencia de la pérdida de 1½ moléculas de agua. La reacción que describe dicha transformación es:



Luego de la deshidratación parcial del mineral de yeso, este presenta una gran tendencia a la absorción de agua, la reacción de hidratación es la siguiente:



Se puede observar que la reacción de hidratación es exotérmica.

Al seguir aumentando la temperatura de calcinación hasta 190°C aproximadamente, ocurre la deshidratación completa del mineral de yeso, formándose un compuesto conocido como sal anhidrita (CaSO_4):



1.4 CONMINUCIÓN DE MINERALES DE YESO

La conminución es un proceso que implica la reducción de tamaño de un mineral y el cual puede ocurrir por diferentes mecanismos de fractura. Los equipos empleados para esta reducción pueden ser trituradoras, molinos de impacto, de rodillos o molinos rotatorios.

Las primeras etapas de conminución se llevan a cabo con el fin de facilitar el manejo del mineral proveniente del yacimiento y luego, en las etapas sucesivas, se busca entre otras cosas, incrementar el área superficial por unidad de masa para ayudar a que algunos procesos físico-químicos sean más eficientes u obtener un tamaño de partícula adecuado en el producto final.

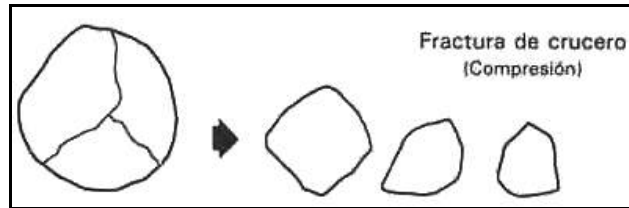
Para estas últimas etapas se emplean frecuentemente molinos rotatorios los cuales pueden utilizar diversos medios moledores que se con ayuda del movimiento del cilindro fracturan las partículas de mineral a través de la combinación de mecanismos. Además los molinos rotatorios poseen una forma cilíndrica que les permite rotar en torno a su eje horizontal y es posible proveer condiciones específicas para la operación de molienda modificando factores como la velocidad de operación, el tipo de revestimiento, la forma y el tamaño de los medios de molienda.

1.4.1 Mecanismos de conminución

La fragmentación de las partículas minerales durante la reducción de tamaño ocurre por un proceso de deformación no homogéneo, que implica diferentes mecanismos de fractura como son:

- Compresión: ocurre por aplicación de esfuerzos de compresión lentos en maquinas donde hay una superficie fija y otra móvil que da origen a la formación de partículas finas y gruesas. (Ver figura 3)

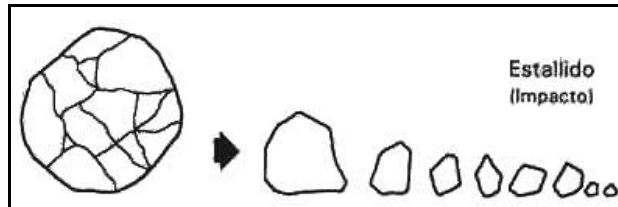
Figura 3. Esquema de la acción de esfuerzos de compresión



Fuente. TAPIA QUEZADA, Jaime. Preparación Mecánica de Minerales –Universidad Arturo Prat Iquique – Chile Ingeniería en Metalurgia Extractiva

- Impacto: ocurre por aplicación de esfuerzos de compresión rápidos y la energía suministrada excede la necesaria para fracturar la partícula dando lugar a un amplio rango de tamaños.(Ver figura 4)

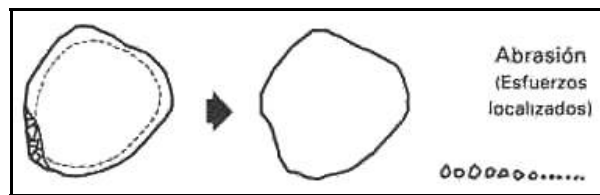
Figura 4. Esquema de la acción de esfuerzos de impacto



Fuente. TAPIA QUEZADA, Jaime. Preparación Mecánica de Minerales –Universidad Arturo Prat Iquique – Chile Ingeniería en Metalurgia Extractiva

- Abrasión: ocurre cuando la energía aplicada es insuficiente para producir quiebre en la partícula produciendo fractura localizada. dando como resultado una distribución de partículas de tamaño casi igual al original y partículas muy finas. (Ver figura 5)

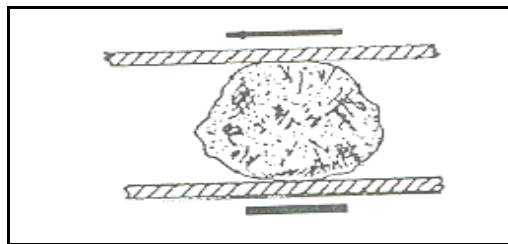
Figura 5. Esquema de la acción de esfuerzos de impacto



Fuente. TAPIA QUEZADA, Jaime. Preparación Mecánica de Minerales –Universidad Arturo Prat Iquique – Chile Ingeniería en Metalurgia Extractiva

- Cizalle: ocurre como un esfuerzo secundario al aplicar esfuerzos de compresión e impacto, produce gran cantidad de finos.(Ver figura 6)

Figura 6. Esquema de la acción de esfuerzos de cizalle



Fuente: RIVERA ZEBALLOS, Juan H. Compendio de cominución. Editorial Consejo Nacional De Ciencia y Tecnología - CONCYTEC. Lima - Perú. 2003.

- Astillamiento: ruptura de los bordes de una partícula causada por la aplicación de esfuerzos.

1.4.2 Funcionamiento de un molino de bolas

Es un molino rotatorio el cual utiliza como medios molidores bolas de acero de diferentes diámetros, de distinta dureza y composición, la cantidad de bolas adicionadas puede ser expresada como un porcentaje del volumen útil del molino.

Al iniciar el movimiento rotatorio del molino el mineral y las bolas son elevados hasta una altura determinada de donde caen y golpean el mineral entre ellas y

contra los revestimientos interiores. Esto se repite sucesivamente hasta que se logra una reducción en el tamaño del mineral.

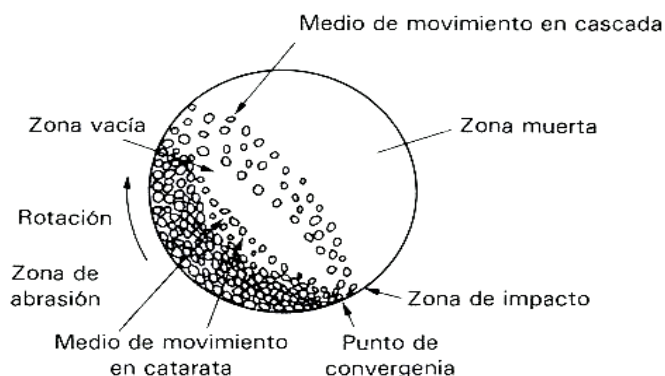
Pueden ocurrir diversos fenómenos que permiten la fractura y desintegración del mineral. En primer lugar un impacto masivo que ocasiona desintegración completa de las partículas, también pueden ocurrir golpes que puede astillar las esquinas y fricción que produce desgaste en la superficies (abrasión).

A velocidades bajas de rotación las bolas tendrán una acción de volteo relativamente suave, presentando una tendencia en la masa de las bolas a ser levantadas por la acción de rotación las paredes del molino y deslizarse hacia atrás como una masa compacta.

Al aumentar la velocidad, aumenta también la acción del volteo y el lecho aparece como una superficie inclinada de la cual emergen bolas que giraran hacia abajo y que vuelven a tener contacto con la superficie, creando colisión con las demás bolas; de esta manera se inducen esfuerzos en las partículas.

El lecho esta en un estado de cascada cuando existe una velocidad de rotación más alta; habrá una mayor cantidad de bolas elevadas desde la superficie hasta lo alto del molino formándose así una catarata de bolas.(ver figura 7)

Figura 7. Movimiento de la carga de un molino operando a velocidad normal.



Fuente. TAPIA QUEZADA, Jaime. Preparación Mecánica de Minerales –Universidad Arturo Prat Iquique – Chile Ingeniería en Metalurgia Extractiva

La acción de volteo de las bolas dentro del molino y la velocidad de fractura del mineral dependerá de la proporción del volumen del molino que se encuentre ocupado con bolas. Esta fracción volumétrica de llenado de bolas denominada J , puede ser expresada convencionalmente como la fracción del molino lleno por el lecho de bolas en reposo y esta dado por:

$$J = \frac{m_b}{(1 - \xi)\rho_b V_m} \quad (4)$$

Donde:

m_b = Masa de bolas en el molino (Tm)

ξ = Porosidad nominal del lecho

ρ_b = Densidad aparente del lecho (Tm/m³)

V_m = Volumen del molino (m³)

Para efectos de cálculos el valor promedio de porosidad nominal del lecho es 0.4 y una densidad aparente del lecho de 4.70 Tm/m^3 .⁵

1.5 BENEFICIO DE MINERALES DE YESO EN INDUSTRIA YESERA SANTANDEREANA INYESA Ltda.

INYESA LTDA es una empresa santandereana, ubicada en el norte de la ciudad de Bucaramanga en la carretera al café Madrid (Ver figura 8a y 8b). Esta empresa se dedica a la producción de yeso blanco y gris o estuco a partir de minerales de yeso, molienda del caolín a partir de la piedra y la pulverización de cal.

Utiliza como materia prima para la fabricación de yeso los minerales de yeso o yeso crudo, cuyo componente principal es el sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), extraída en su estado natural de minas o canteras. El consumo mensual de esta materia prima es de 187 toneladas por mes y con una eficiencia del proceso del 85% aproximadamente, la cantidad de toneladas producidas al mes es de 160 aproximadamente.

En INYESA Ltda. el beneficio de minerales de yeso comprende básicamente 5 etapas, a saber: secado, molienda, calcinación, remolienda y embalaje.

⁵ RIVERA ZEBALLOS, Juan H. Compendio de conminución. Editorial Consejo Nacional De Ciencia y Tecnología - CONCYTEC. Lima - Perú. 2003.

Figura 8a. Planta productora de yeso INYESA Ltda



Fuente: Autores del proyecto

Figura 8b. Horno rotario ubicado en la planta productora de yeso INYESA Ltda.

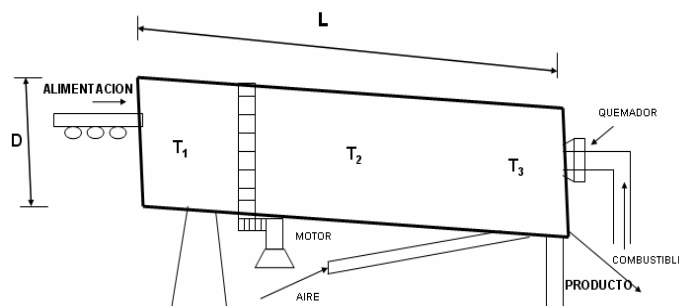


Fuente: Autores del proyecto

- **Secado:** el yeso se somete a una etapa previa de secado en un horno rotatorio de flujo de continuo con capacidad de 2 Ton/h durante 15 minutos para retirar el exceso de humedad. El horno cuenta con un quemador de gas natural de 300000 Btu/h , un motorreductor acoplado de 10HP, rpm=1,667. Las temperaturas del horno de secado fueron medidas durante el desarrollo de esta investigación con ayuda de un pirómetro óptico ubicado en el laboratorio de biomateriales de la Universidad Industrial de Santander se midieron las

temperaturas T1, T2 y T3 (Ver figura 9) del horno de secado de INYESA Ltda., las cuales corresponden a 55°C, 150°C y 210°C respectivamente. Las dimensiones del horno son 7 m de longitud y 63 cm de diámetro.

Figura 9. Horno de secado de yeso en INYESA Ltda.

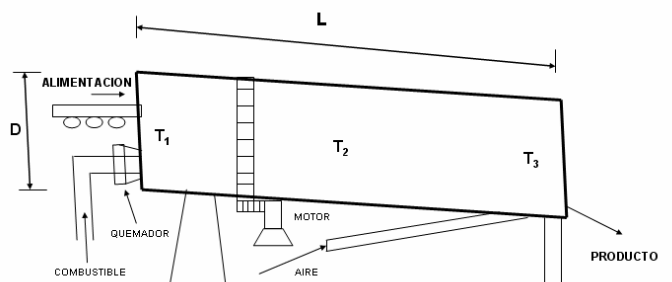


Fuente: Autores del proyecto

- **Molienda:** Después del proceso de secado, el yeso pasa a un molino de martillos (24HP a 3600rpm y transmisión por correas) El producto de la molienda es llevado a la siguiente etapa mediante un elevador de cangilones que tiene un motor de 3HP y transmisión por correas. Esta etapa se realiza en un molino de capacidad de 3 Tn/h.
- **Calcinación:** se realiza durante 45 minutos en un horno rotatorio de flujo continuo con quemador de gas natural de 700000 Btu/h (motorreductor 5Hp). En esta etapa es retirada parte de la humedad del mineral, ocurriendo una reacción de deshidratación en donde el sulfato de calcio dihidratado pasa a ser semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). El producto de la calcinación es llevado a la etapa posterior mediante un elevador de cangilones, que tiene un motor de 3HP y transmisión por correas. Las temperaturas del horno de calcinación fueron medidas durante el desarrollo de esta investigación con ayuda de un pirómetro óptico ubicado en el laboratorio de biomateriales de la Universidad Industrial de Santander se midieron las temperaturas T1, T2 y T3 (Ver figura

10) del horno de calcinación de INYESA Ltda., las cuales corresponden a 300°C, 130°C y 100°C respectivamente. Las dimensiones del horno son 11m de longitud y 76 cm de diámetro.

Figura 10. Horno de calcinación de yeso en INYESA Ltda.



Fuente: Autores del proyecto

- **Molienda final:** En esta etapa el mineral calcinado, es llevado hasta un tamaño adecuado para su posterior comercialización, esta etapa se realiza en un molino de martillos de 30 HP y 3600 rpm.
- **Empacado:** El producto terminado se empaqueta en bolsas de papel de 25 Kg mediante procedimiento manual. El operador dosifica el producto en la bolsa hasta que la balanza registra el valor exacto del peso, posteriormente se sella con una cosedora manual.⁶

Las emisiones del proceso se resumen en la tabla 3 y se encuentran ubicadas en el figura 31 que describe el proceso actual de beneficio de yeso en la planta industrial. Los cálculos de emisiones se elaboraron teniendo en cuenta factores de emisión reportados por EPA (Environmental Protection Agency) y el inventario de emisiones atmosféricas realizado por la CORINAIR (European Environmental Agency).

⁶ Solicitud de permisos de emisión atmosférica industria yesera santandereana INYESA Ltda. Bucaramanga 2004.

Tabla 3. Cálculo de emisiones de material particulado en INYESA Ltda.

OPERACIÓN	EMISIÓN	FACTOR DE EMISIÓN (Kg Emisión/ Tn de alimentación)	FUENTE
<i>Transporte de mineral</i>	E-1	0,53	EPA
<i>Secado</i>	E-2	0,02	EPA
<i>Molienda</i>	E-3	0,06	EPA
<i>Transporte molino-horno calcinador</i>	E-4	0,15	CORINAIR
<i>Calcinación</i>	E-5	1,4	CORINAIR
<i>Transporte horno-molino</i>	E-6	0,15	CORINAIR
<i>Molienda final</i>	E-7	0,01	EPA
<i>Embalaje</i>	E-8	0,04	EPA

Fuente: Solicitud de permisos de emisión atmosférica industria yesera santandereana INYESA Ltda. Bucaramanga 2004

1.5.1 Diagrama de bloques del proceso de beneficio de yeso en Inyesa Ltda.

El proceso de beneficio de minerales de yeso en Inyesa Ltda., esta descrito por la figura 11, en donde se presentan cada una de las etapas realizadas y el orden respectivo de las mismas.

Figura 11. Diagrama de bloques Inyesa Ltda.



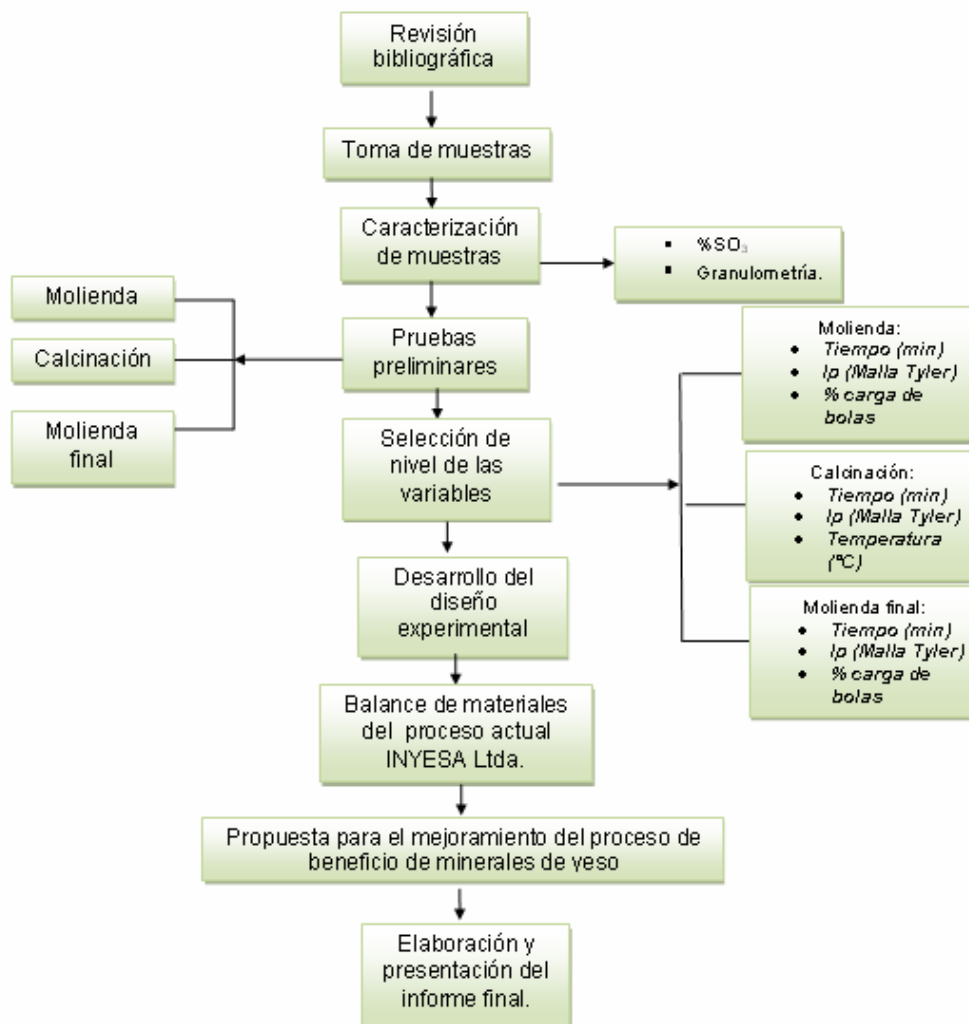
Fuente: Autores del proyecto

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del presente proyecto, la cual comprende las siguientes fases (Ver figura 12).

- Revisión y análisis de la bibliografía consultada.
- Muestreo en la planta industrial de INYESA Ltda.
- Caracterización de muestras
 - ✚ Determinación de porcentaje de SO_3 .
 - ✚ Análisis granulométrico.
- Pruebas preliminares del beneficio en el mineral de yeso (molienda, calcinación y remolienda).
- Selección de los niveles más adecuados de las variables independientes en las etapas de molienda, calcinación y remolienda para el desarrollo del diseño experimental.
- Desarrollo del diseño experimental para las etapas de molienda, calcinación y molienda final con los niveles seleccionados de las variables independientes.
- Balance de materiales para el proceso actual de beneficio de minerales de yeso en INYESA Ltda.
- Diseño básico de planta del beneficio de minerales de yeso simulado a nivel de laboratorio con las condiciones operativas seleccionadas de los resultados obtenidos en el diseño experimental.
- Elaboración y presentación del informe final.

Figura 12. Diagrama de flujo para la metodología experimental.



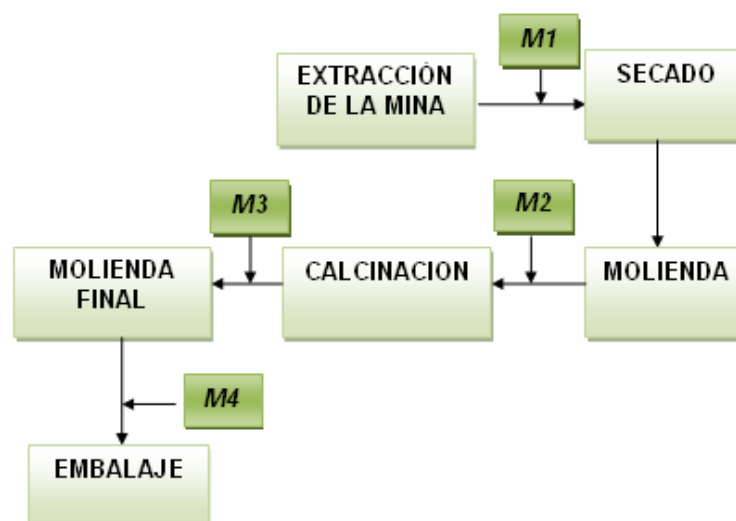
Fuente: Autores del proyecto

2.1 MUESTREO EN LA PLANTA INDUSTRIAL.

En esta etapa se visitó la planta industrial de INYESA Ltda para realizar el muestreo en las diferentes etapas del proceso de producción de yeso. Se tomaron muestras en 4 puntos dentro del circuito, la primera muestra fue tomada del mineral proveniente de la mina, la segunda después de la etapa de molienda, la

tercera después de la calcinación y la última al producto final. Las muestras se denominaron como M1, M2, M3 y M4 respectivamente. Todas las muestras fueron sometidas a análisis físico (distribución granulométrica) y químico (determinación del porcentaje de SO_3). Las muestras tomadas fueron utilizadas para la realización de las pruebas preliminares y de los ensayos del diseño experimental. La figura 13 muestra los 4 puntos del circuito en los cuales se realizó el muestreo. El peso de muestra tomado en cada uno de los puntos del circuito fue de aproximadamente 5 kilogramos. Durante esta etapa se tomaron las temperaturas de los hornos de secado y calcinación en la planta industrial.

Figura 13. Puntos del circuito de producción de yeso en INYESA LTDA, donde se realizó el muestreo.



Fuente: Autores del proyecto

2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL MINERAL.

La caracterización del mineral de yeso se realizó con el fin de conocer la composición química y propiedades físicas de la muestra inicial (M1).

Además se realizó el mismo análisis para las demás muestras tomadas en los diferentes puntos del circuito, indicados en la figura 11: M2, M3 y M4.

2.2.1 Caracterización química

Se determino el porcentaje de SO_3 presente en cada una de las muestras, siguiendo el procedimiento descrito en el anexo A (Determinación gravimétrica de SO_3 en una muestra de yeso).

2.2.2 Caracterización física

Se realizo el análisis de la distribución granulométrica de cada una de las muestras, para esto se tomo una muestra de 200 gramos y se utilizó una serie de tamices estándar Tyler conformada por los tamices N° 10m, 20m, 35m, 50m, 100m, 140m y 200m. Para el análisis granulométrico se utilizo el Rotap ubicado en la planta de acero UIS (ver figura 14).

Figura 14. Rotap y serie de tamices.



Fuente: Autores del proyecto

2.3 BALANCE DE MATERIALES PARA EL PROCESO ACTUAL DE BENEFICIO DE YESO EN LA PLANTA INDUSTRIAL INYESA LTDA.

El balance de materiales de la planta industrial se realizó con base en el conocimiento del proceso de beneficio de yeso llevado a cabo en la planta industrial, teniendo en cuenta las condiciones operativas a las cuales se realizan cada una de las etapas. Además se utilizaron los resultados obtenidos en la caracterización de las diferentes muestras tomadas en los puntos del circuito de la empresa con el fin de conocer las propiedades físicas y químicas del mineral a estudiar (Ver figura 13). También se tuvieron en cuenta las emisiones del proceso (Ver tabla 3) y las pérdidas de mineral por la acción del calor. Estas últimas fueron denominadas P_c y fueron calculadas en el laboratorio por gravimetría.

2.4 ENSAYOS PRELIMINARES

Con el propósito de determinar el nivel más adecuado para las variables de entrada utilizadas en el diseño experimental, se desarrollaron pruebas preliminares en cada una de las etapas a estudiar que son: Molienda, Calcinación y molienda final.

El procedimiento para la selección de los niveles de las variables independientes en las etapas de molienda, calcinación y molienda final se encuentran a continuación:

2.4.1 Etapa de molienda

Los niveles de las variables a determinar son el tiempo de molienda, diámetro de partícula y carga de bolas del molino. Las pruebas preliminares de molienda se desarrollaron en las siguientes fases:

2.4.1.1 Tiempo de molienda. Este ensayo se realizó para determinar el efecto que tiene el tiempo de molienda sobre la variable respuesta: % peso de -100m (Tyler), utilizando diferentes tiempos de molienda en progresión geométrica (0,1, 2, 4, 8,16 y 32 minutos) empleando una muestra de mineral (M1) cuya distribución granulométrica se encuentra en el anexo C. Se mantuvieron constantes parámetros como carga de bolas= 7% del volumen total del molino (distribución de bolas ver Anexo B) debido a que este valor corresponde al promedio de las cargas de bolas empleadas en el diseño experimental de las etapas de conminución, peso de las muestras= 200 gramos y rpm del molino= 1725.

De los resultados obtenidos en este ensayo se tomaron los tiempos que se utilizaran en el diseño experimental para la etapa de molienda.

- **Procedimiento de operación para la determinación de los tiempos de molienda empleados en el diseño experimental de esta etapa.**

Para cada uno de los ensayos se tomo una muestra (M1) de 200 gramos, luego con las condiciones operativas constantes y variables ya establecidas se realizó el proceso de conminución. Este proceso de conminución se realizó en el molino de bolas (Ver figura 15) ubicado en la planta de aceros de la UIS. Para analizar el comportamiento de la variable respuesta se realizó un análisis granulométrico de la muestra final, utilizando únicamente la malla 100m (Tyler) con el fin de determinar la cantidad de mineral retenido y pasante en dicha malla. Solo se empleo una malla teniendo en cuenta las condiciones operativas y económicas de la empresa, en donde no existe la posibilidad de adquirir una serie de tamices ni tampoco un Rotap para realizar un análisis granulométrico detallado del producto de molienda. Posteriormente se realizo un análisis de los resultados obtenidos.

Figura 15. Molino de bolas del laboratorio



Fuente: Autores del proyecto

2.4.1.2 Intervalo de tamaños de partícula. Para la determinación de los niveles de esta variable, se realizó el análisis granulométrico de la muestra M1 (Ver anexo C). El análisis granulométrico se realizó con muestras de 200 gramos y se utilizó el Rotap y serie de tamices estándar Tyler ASTM conformada por los tamices N° 10m, 20m, 35m, 50m, 100m, 140m y 200m (Ver figura 14) ubicado en la planta de aceros de la UIS, siguiendo las recomendaciones dadas por la norma ASTM D422.⁷

2.4.1.3 Carga de bolas. La selección de los niveles para esta variable, se realizó basándose en la bibliografía estudiada, la cual recomienda que las bolas empleadas no sean de un diámetro único sino que correspondan a una familia de diámetros de las bolas. Además se tuvo en cuenta los diámetros de bolas disponibles en el laboratorio para el desarrollo de las pruebas preliminares y el diseño experimental.

2.4.2 Etapa de calcinación

Los niveles de las variables a determinar son el tiempo, temperatura y diámetro de partícula. Para la determinación de estos niveles se realizaron las siguientes fases:

⁷ ASTM D422- 63 (2007). STANDARD TEST METHOD FOR PARTICLE- SIZE ANALYSIS OF SOILS.

2.4.2.1 Intervalo de tamaños de partícula. Para la determinación de los niveles de esta variable, se realizó el análisis granulométrico de la muestra M2 (Ver anexo D). Este se realizó con muestras de 200 gramos y se utilizó el Rotap y serie de tamices estándar Tyler conformada por los tamices N° 10m, 20m, 35m, 50m, 100m, 140m y 200m (Ver figura 14) ubicado en la planta de aceros de la UIS, siguiendo las recomendaciones dadas por la norma ASTM D422.⁷

2.4.2.2 Determinación de tiempo de calcinación. Este ensayo se realizó para determinar el efecto que tiene el tiempo de calcinación sobre la variable respuesta: %SO₃, utilizando diferentes tiempos de calcinación (0, 20, 30, 40 y 50 minutos) empleando una muestra de mineral (M2) cuya distribución granulométrica se encuentra en el anexo D. Se mantuvieron constantes parámetros como peso de la muestras=200 gramos, temperatura=110°C, la cual permite la transformación de yeso dihidrato (CaSO₄* 2H₂O) a hemihidratado (CaSO₄* ½ H₂O). De los resultados obtenidos en este ensayo se tomaron los tiempos empleados para el diseño experimental de la etapa de calcinación.

- **Procedimiento de operación para la determinación de los tiempos de calcinación empleados en el diseño experimental de esta etapa.**

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra (M2) de 30 gramos, luego con las condiciones operativas constantes y las variables ya establecidas se realizó el proceso de calcinación. Los ensayos se realizaron en una mufla tipo D8 (ver figura 16), ubicada en el laboratorio de Pirometalurgia de la Universidad Industrial de Santander. Para analizar el comportamiento de la variable respuesta se realizó un análisis del porcentaje de SO₃ de cada una de las muestras obtenidas, siguiendo los pasos indicados por la marcha para determinación gravimétrica del porcentaje de SO₃ en una muestra de yeso. (Ver anexo A), con el fin de observar la cantidad de sulfato obtenido a diferentes tiempos de calcinación.

Figura 16. Mufla tipo D8 del laboratorio



Fuente: Autores del proyecto

2.4.2.3 Temperatura de calcinación. Este ensayo se realizó para determinar el efecto que tiene la temperatura de calcinación sobre la variable respuesta: %SO₃, utilizando diferentes temperaturas de calcinación (25, 100, 120,140°C) manteniendo constantes los demás variables: granulometría (Ver anexo D), peso de las muestras= 30 gramos, tiempo= 30 minutos. De los resultados obtenidos en este ensayo se tomaron los rangos de temperatura que se utilizaran en el diseño experimental para la etapa de calcinación. Las muestras utilizadas para el desarrollo de estas pruebas provienen de la muestra M2 tomada en la planta industrial en INYESA Ltda.

- **Procedimiento de operación para la determinación de las temperaturas de calcinación empleadas en el diseño experimental de esta etapa.**

El procedimiento de operación utilizado es similar al realizado para la determinación de los tiempos de calcinación.

2.4.3 Etapa de molienda final.

Los niveles de las variables a determinar en esta etapa son el tiempo de molienda, diámetro de partícula y porcentaje de carga de bolas del molino. Las pruebas preliminares de molienda final se desarrollaron en las siguientes fases:

2.4.3.1 Tiempo de molienda final. Para la selección de los niveles de esta variable, se observó el efecto que tiene el tiempo de molienda sobre la variable respuesta: % peso de -200m (Tyler), utilizando diferentes tiempos de molienda en progresión geométrica (0, 1, 2, 4, 8 y 16 minutos) empleando una muestra de mineral (M3) cuya distribución granulométrica se encuentra en el anexo D. Se mantuvieron constantes parámetros como carga de bolas= 7% del volumen total del molino (distribución de bolas ver Anexo B) debido a que este valor corresponde al promedio de las cargas de bolas empleadas en el diseño experimental de las etapas de conminución, peso de las muestras= 200 gramos y rpm del molino= 1725.

De los resultados obtenidos se tomaron los tiempos que se utilizarán para el diseño experimental en la etapa de molienda final. Los ensayos se realizaron en un molino de bolas (ver figura 15), ubicado en la planta de aceros de la Universidad Industrial de Santander.

- **Procedimiento de operación para la determinación de los tiempos de remolienda empleados en el diseño experimental de esta etapa.**

El proceso de operación utilizado en esta etapa se realizó de manera análoga que para la etapa de molienda. Para analizar el comportamiento de la variable respuesta se realizó un análisis granulométrico de la muestra final, utilizando únicamente la malla 200m (Tyler) con el fin de determinar la cantidad de mineral retenido y pasante en dicha malla. Solo se empleó una malla teniendo en cuenta las condiciones operativas y económicas de la empresa, en donde no existe la

posibilidad de adquirir una serie de tamices ni tampoco un Rotap para realizar un análisis granulométrico detallado del producto de molienda. Posteriormente se realizó un análisis a los resultados obtenidos.

2.4.3.2 Intervalo de tamaños de partícula. Para la determinación de los niveles de esta variable, se realizó el análisis granulométrico de la muestra M3 (Ver anexo D). Este se realizó con muestras de 200 gramos y se utilizó el Rotap y serie de tamices estándar Tyler conformada por los tamices N° 10m, 20m, 35m, 50m, 100m, 140m y 200m (Ver figura 14) ubicado en la planta de aceros de la UIS, siguiendo las recomendaciones dadas por la norma ASTM D422.⁷

2.4.3.3 Carga de bolas. La selección de los niveles para esta variable, se realizó basándose en la bibliografía estudiada, la cual recomienda que las bolas empleadas no sean de un diámetro único sino que correspondan a una familia de diámetros de las bolas. Además se tuvo en cuenta los diámetros de bolas disponibles en el laboratorio para el desarrollo de las pruebas preliminares y el diseño experimental.

2.5 DESARROLLO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LAS ETAPAS DE MOLIENDA, CALCINACION Y MOLIENDA FINAL.

El diseño experimental permite planificar las actividades a desarrollar, obteniéndose de este modo la información necesaria en un número de experimentos ahorrando costos y tiempo. El diseño experimental está caracterizado por la manipulación de una o más variables, a las cuales se les asignan valores para generar cambios en las variables dependientes, para luego medir el efecto que este valor ejerce sobre la variable dependiente. Debido a que la observación del efecto se realiza con la medición de la variable dependiente,

esta debe ser válida y confiable, para asegurar resultados que permitan un posterior análisis.

Finalmente, en el desarrollo experimental debe existir control o validez interna dentro de la situación experimental, es decir, controlar la influencia de otras variables extrañas en las variables dependientes, para poder determinar realmente si las variables independientes tienen o no efecto sobre las dependientes.

Selección de variables:

La importancia de realizar la selección de variables en el diseño experimental radica en que en esta etapa es posible establecer las variables que se desean evaluar, conocer de que tipo son y de acuerdo con esto, asignar el nivel que tiene cada una de ellas. En el presente estudio se pretende utilizar un sistema multivariable el cual cuenta con dos tipos de variables: de entrada y salida.

2.5.1 Variables de entrada

Son aquellas variables conocidas como independientes dentro del sistema y afectan el comportamiento de la variable dependiente o de salida. Sobre este tipo de variables se asignan los niveles, los cuales tendrán un efecto sobre la variable de salida.

En este estudio se definieron 3 variables de entrada en cada una de las etapas analizadas: molienda, calcinación y molienda final. De acuerdo con los resultados arrojados en las pruebas preliminares se le asignaron 2 niveles a cada una de ellas. Las variables escogidas en cada etapa son:

Etapa de Molienda:

- Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)
 - Tiempo (min)

- Carga de bolas (%)

Etapa de Calcinación:

- Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)
- Tiempo (min)
- Temperatura (°C)

Etapa de molienda final:

- Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)
- Tiempo (min)
- Carga de bolas (%).

2.5.2 Variables de salida

Son las variables dependientes y su valor dependerá del nivel asignado a las variables independientes. Para cada una de las etapas del proceso de beneficio de yeso estudiadas se definió la variable respuesta o de salida.

Etapa de Molienda:

- % Peso de -100m (Tyler)

Etapa de Calcinación:

- %SO₃

Etapa de molienda final

- % Peso de -200m (Tyler)

La selección de la variable de salida para la etapa de molienda se realizó teniendo en cuenta que debe obtenerse un tamaño adecuado para la siguiente etapa que corresponde a la calcinación del mineral.

Para la etapa de calcinación un adecuado porcentaje de SO₃ garantiza las propiedades necesarias para los fines comerciales del mineral.

Para la etapa de molienda final, es necesario obtener una finura suficiente representada por el porcentaje en peso pasante de mineral en la Malla Tyler N°200 con el fin de alcanzar requerimientos comerciales del producto.

2.5.3 Condiciones operativas constantes diseño experimental

Durante el desarrollo del diseño experimental para las etapas de molienda, calcinación y molienda final se mantuvieron constantes algunas variables teniendo en cuenta los requerimientos de cada una de estas etapas. Para las etapas de molienda y remoleinda se mantuvieron constantes parametros como peso de la muestra=200 gramos, el equipo utilizado y las condiciones operativas del mismo. En la etapa de calcinacion solo se mantuvo constante el peso de las muestras: 30 gramos.

En el presente estudio se utiliza un diseño de experimentos correspondiente al factorial 2^n , donde la base 2 concierne al nivel que toma cada una de las variables independientes y n al número de variables independientes, por lo anterior cada etapa a estudiar utiliza un diseño factorial de 2^3 . Este diseño permite estudiar el comportamiento de las variables de salida con respecto al cambio en las variables de entrada en cada una de las etapas estudiadas, asignando posibles combinaciones que incluyen todos los valores asigandos a las variables de entrada. Los valores asigandos a cada una de las variables de entrada fueron seleccionados a partir de las pruebas preliminares realizadas para cada etapa. Este diseño arroja entonces un total de 8 experimentos para cada etapa, por lo cual el número total de experimentos a realizar es de 24, repitiendo cada ensayo una vez.

Los niveles de las variables independientes para las etapas de molienda, remolienda y calcinación se obtuvieron analizando los resultados obtenidos durante las pruebas preliminares y las condiciones operativas empleadas en la

planta industrial. Los niveles seleccionados para las etapas de molienda, calcinación y remolienda se encuentran a continuación:

- **ETAPA DE MOLIENDA.**

Tabla 4. Variables y Niveles de variables independientes en la etapa de molienda.

Variable independiente		Niveles	
Ip	Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)	-1"/+10m	-10m/ +35m
t	Tiempo (minutos)	16	32
Cb	Carga de Bolas (% del volumen total del molino)	J ₁ = 10%	J ₂ = 5%

Fuente: Autores del proyecto

Nota: Distribución de carga de bolas J₁ y J₂ ver anexo B.

Tabla 5. Combinación de variables para la etapa de molienda.

prueba	COMBINACIONES		
	t	%Cb	Ip
MOL 01	32	J ₁ = 10	20
MOL 02	16	J ₂ = 5	10
MOL 03	32	J ₂ = 5	10
MOL 04	32	J ₂ = 5	20
MOL 05	16	J ₁ = 10	20
MOL 06	16	J ₁ = 10	10
MOL 07	32	J ₁ = 10	10
MOL 08	16	J ₂ = 5	20

Fuente: Autores del proyecto

- **ETAPA DE MOLIENDA FINAL.**

Tabla 6. Variables y Niveles de variables independientes en la etapa de molienda final.

Variable independiente		Niveles	
Ip	Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)	-35m/+140m	-10m/+35m
t	Tiempo (minutos)	4	8
Cb	Carga de Bolas (% del volumen total del molino)	J ₁ = 10%	J ₂ = 5%

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 7. Combinación de variables para la etapa de molienda final.

prueba	COMBINACIONES		
	T	%Cb	Ip
REM 01	4	J ₁ = 10	20
REM 02	4	J ₂ = 5	20
REM 03	4	J ₁ = 10	100
REM 04	8	J ₂ = 5	20
REM 05	8	J ₂ = 5	100
REM 06	4	J ₂ = 5	100
REM 07	8	J ₁ = 10	100
REM 08	8	J ₁ = 10	20

Fuente: Autores del proyecto

- **ETAPA DE CALCINACIÓN**

Tabla 8. Variables y Niveles de variables independientes en la etapa de calcinación.

Variable independiente		Niveles	
Ip	Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)	-35m/+140m	-10m/+35m
t	Tiempo (minutos)	20	40
T	Temperatura (°C)	110	140

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 9. Combinación de variables para la etapa de calcinación.

prueba	COMBINACIONES		
	T	t	Ip
CAL 01	140	20	100
CAL 02	140	40	100
CAL 03	110	20	100
CAL 04	140	40	20
CAL 05	110	40	100
CAL 06	110	20	20
CAL 07	140	20	20
CAL 08	110	40	20

Fuente: Autores del proyecto

2.5.4 Análisis de resultados del diseño experimental.

El análisis de resultados se realizará con la ayuda del paquete estadístico STATGRAPHICS el cual permite obtener graficas y diagramas, que permiten analizar el efecto de las variables independientes sobre la variable respuesta.

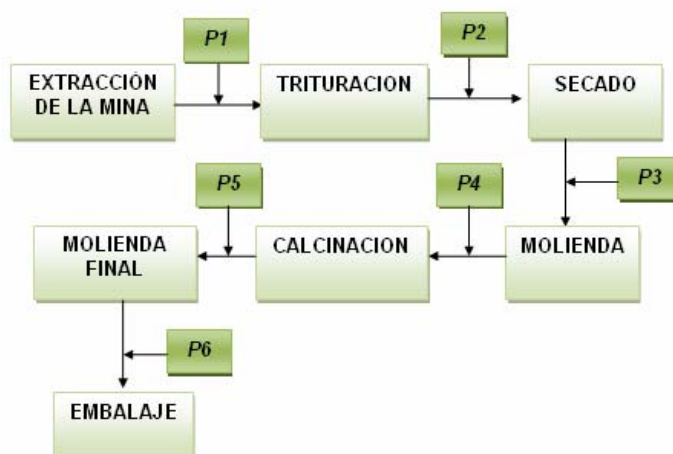
Además se generará una ecuación empírica que permite obtener los niveles más favorables de las variables para el efecto deseado sobre la variable respuesta.

2.6. PROPUESTA PARA EL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO.

De acuerdo con los valores obtenidos en el diseño experimental, se seleccionaran los niveles de las variables independientes a los cuales se observen los mejores resultados para la variable respuesta para cada una de las etapas.

Posteriormente se llevará a cabo un proceso de beneficio de minerales de yeso a nivel de laboratorio incluyendo todas las etapas. Una vez finalizado se analizará el comportamiento del mineral en todos los puntos de muestreo del circuito, con lo que se elaborará un diseño básico de planta para el proceso de beneficio de minerales de yeso. La ubicación y denominación respectiva de las muestras tomadas para el desarrollo de esta propuesta se encuentran en la figura 17.

Figura 17. Propuesta para el circuito de producción de yeso y puntos donde se realizó el muestreo.



Fuente: Autores del proyecto

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL.

3.1.1 Determinación del porcentaje de SO₃ en las muestras tomadas en la planta industrial INYESA Ltda.

Este análisis se realizó mediante la determinación del porcentaje de SO₃ (Ver anexo A) a cada una de las muestras tomadas en la planta industrial, repitiendo cada ensayo una vez. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de SO₃ para las muestras tomadas en la planta industrial.

Muestra	REPETICIONES		
	%SO ₃ (1)	%SO ₃ (2)	%SO ₃ (Promedio)
M1	42,817	43,977	43,397
M2	46,850	45,390	46,120
M3	49,130	50,510	49,820
M4	49,130	50,510	49,820

Fuente: Autores del proyecto

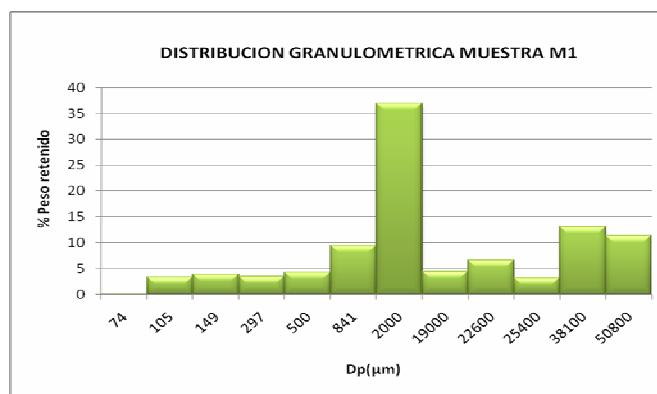
Los resultados obtenidos para las muestras M3 y M4 no tienen variación en el %SO₃ porque no ocurre ninguna transformación química; solo hay una reducción en el tamaño de partícula de mineral.

3.1.2 Determinación de la distribución granulométrica de las muestras tomadas la planta industrial INYESA Ltda.

Los resultados obtenidos para el análisis granulométrico de cada una de las muestras tomadas en la planta industrial se muestran a continuación. La distribución granulométrica correspondiente a las muestras M1, M2, M3 y M4 se encuentran en los anexos C, D, E respectivamente.

Muestra M1. Distribución granulométrica (Ver figura 18, anexo C)

Figura 18. Distribución Granulométrica de la muestra M1.

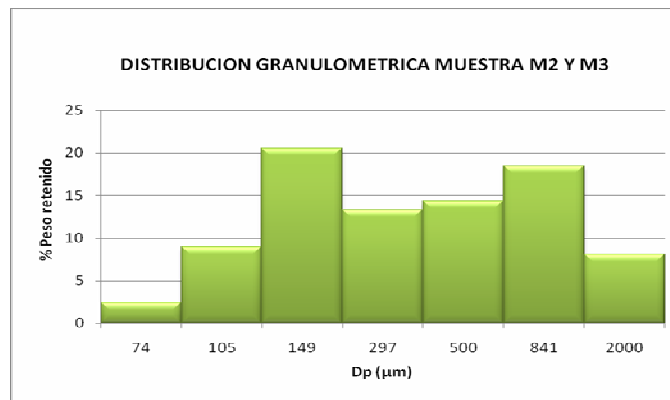


Fuente: Autores del proyecto

Para la distribución granulométrica representada por la figura 18 el d_{80} corresponde a un tamaño de partícula de 4,3040 cm.

- **Muestra M2 y M3.** Distribución granulométrica (Ver figura 19, anexo D)

Figura 19. Distribución Granulométrica de la muestra M2 y M3

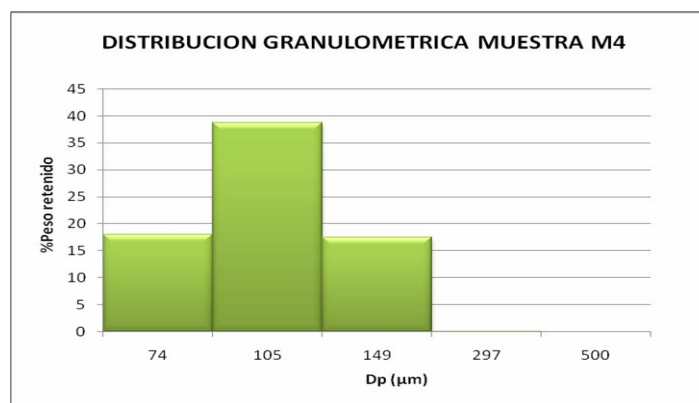


Fuente: Autores del proyecto

Para la distribución granulométrica representada por la figura 19 el d_{80} corresponde a un tamaño de partícula de 1211 μm .

- **Muestra M4.** Distribución granulométrica (Ver figura 20, anexo E)

Figura 20. Distribución granulométrica muestra M4



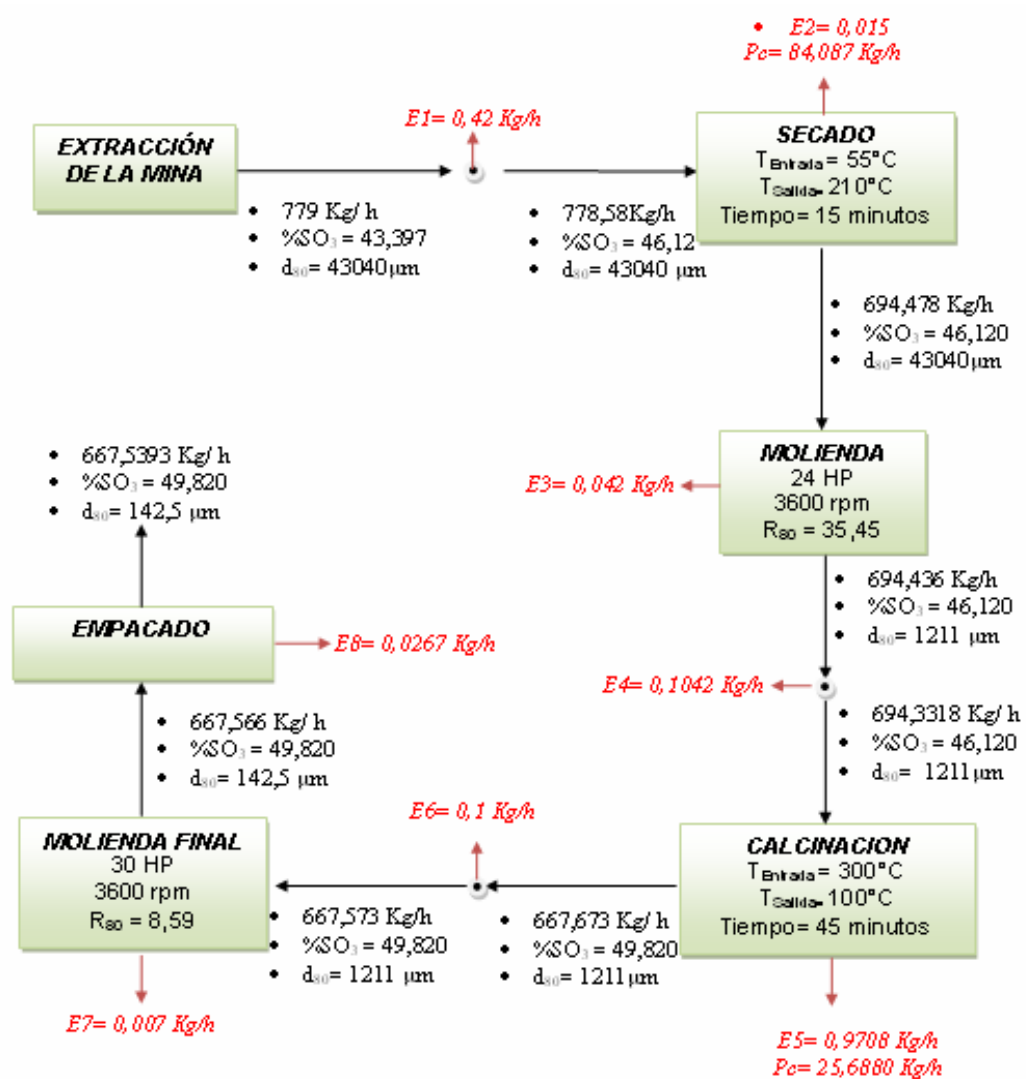
Fuente: Autores del proyecto

Para la distribución granulométrica representada por la figura 20 el d_{80} corresponde a un tamaño de partícula de 142,5 μm .

3.2 BALANCE DE MATERIALES DEL PROCESO ACTUAL EN LA PLANTA INDUSTRIAL INYESA Ltda.

El estudio realizado a las muestras tomadas en la planta industrial permitió obtener el diseño básico de planta que describe el proceso actual de producción en INYESA Ltda (Ver figura 21).

Figura 21. Diseño básico de planta del proceso actual de beneficio de minerales de yeso INYESA Ltda



Fuente: Autores del proyecto

La figura 21 muestra el proceso de producción actual en INYESA Ltda.

El mineral extraído de la mina inicia el proceso con un %SO₃ de 43,397 y un d₈₀ de 4,3040 cm. Durante el proceso de secado ocurre un aumento de %SO₃ hasta 46,120% sin cambios en el tamaño de partícula del mineral. Posteriormente ocurre

la primera etapa de reducción de tamaño donde obtiene un radio de reducción (R_{80}) que corresponde a la relación entre el d_{80} de alimentación y el d_{80} de salida de 35,45. Una vez obtenido un tamaño adecuado después de la molienda el mineral ingresa al horno de calcinación en donde ocurre la reacción de deshidratación alcanzando un %SO₃ de 49,820. Para dar el tamaño final al producto ingresa a una segunda etapa de molienda en donde se obtiene un radio de reducción (R_{80}) de 8,59. El producto final sale al mercado con un d_{80} de 142,5 μ m y un %SO₃ de 49,820.

Para el balance de materiales del proceso se tuvieron en cuenta todas las pérdidas por emisión en todas las etapas del proceso (Ver tabla 3) y también las pérdidas producidas por la acción del calor en las etapas de secado y calcinación del mineral.

Los resultados obtenidos para las pérdidas por la acción del calor en la etapa de secado se obtuvieron en el laboratorio simulando condiciones operativas (tiempo=15 minutos, temperatura = 130°C), obteniéndose una pérdida de peso de mineral de 10,8%.

Para la etapa de calcinación los resultados de las pérdidas por la acción del calor se obtuvieron en el laboratorio simulando condiciones operativas (tiempo=45 minutos, temperatura = 150°C), obteniéndose una pérdida de peso de mineral de 3,7%.

Teniendo en cuenta lo anterior, la eficiencia del proceso es de 85,69 %.

3.3 DETERMINACION DE LOS NIVELES DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES PARA LAS ETAPAS DE MOLIENDA, CALCINACION Y MOLINDA FINAL A PARTIR DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES.

Se realizó un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares en cada una de las etapas a estudiar y de acuerdo con lo anterior se seleccionaron los niveles a utilizar en el diseño experimental.

3.3.1 Etapa de molienda

Los niveles de las variables determinadas fueron el tiempo de molienda, intervalo de tamaños de partícula y carga de bolas.

- **Tiempo.**

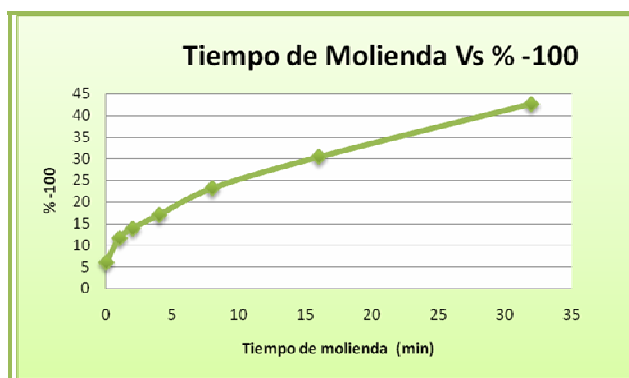
Tomando como base de análisis la tabla 11 y figura 22, es posible afirmar que el porcentaje de mineral pasante de la malla 100m (Tyler), aumenta de manera proporcional con el tiempo de molienda. Se observó un aumento significativo en la pendiente de la gráfica obtenida para los tiempos de molienda. La selección de los niveles de esta variable se realizó teniendo en cuenta las condiciones operativas manejadas en la empresa y observando el comportamiento mostrado en la figura 22 para los tiempos de molienda de 16 y 32 minutos en donde se obtienen tamaños adecuados para la etapa posterior del proceso. No se tuvieron en cuenta tiempos mayores de molienda con el fin de no generar costos adicionales en el proceso productivo de la empresa.

Tabla 11. Peso y porcentaje de mineral retenido y pasante de la malla 100m (Tyler)

Tiempo de molienda (minutos)	Peso mineral pasante (gr)	Peso mineral retenido (gr)	% Peso (-100m)
0	11,86	188,14	5,93
1	23,26	176,74	11,63
2	27,84	172,16	13,92
4	34,14	165,86	17,07
8	46,36	153,64	23,18
16	60,82	139,18	30,41
32	85,42	114,58	42,71

Fuente: Autores del proyecto

Figura 22. Variación del porcentaje de mineral pasante en la malla 100m (Tyler) respecto al tiempo de molienda.



Fuente: Autores del proyecto

- **Intervalo de tamaños de partícula.**

De acuerdo con distribución granulométrica obtenida para la muestra M1 (ver anexo C) y la figura 18 se escogieron los intervalos de tamaños de partículas empleados en el diseño experimental de esta etapa los cuales corresponden a (1"/10mallas) y (-10mallas/35mallas) donde el primer rango representa los tamaños más grandes dentro de la distribución granulométrica y el segundo los más finos.

- **Carga de bolas.**

Para el desarrollo del diseño experimental se tomaron dos distribuciones de bolas, para lo cual se combinaron los 3 diferentes diámetros de bolas disponibles: 1,93cm, 2,60cm y 3,68 cm. La primera distribución denominada J_1 (Ver anexo B) corresponde al 10% del volumen total del molino y contiene en su mayoría bolas del mayor diámetro utilizado. La segunda distribución denominada J_2 (Ver anexo B) corresponde al 5% del volumen total del molino y contiene en su mayoría bolas del menor diámetro utilizado. Estas distribuciones se utilizaron con el fin de observar el efecto del diámetro de las bolas empleadas sobre los intervalos de tamaños de partícula en el mineral obtenido luego del proceso de conminución.

3.3.2 Etapa de calcinación

Los niveles de las variables determinadas son el tiempo, temperatura e intervalo de tamaños de partícula de mineral.

- **Tiempo.**

La figura 23 y la tabla 12 representan la variación del porcentaje de SO_3 obtenido en una muestra de yeso como función del tiempo de calcinación a una temperatura constante dada ($110^\circ C$). El comportamiento describe una relación directa del % SO_3 con el tiempo de calcinación, por lo anterior y teniendo en cuenta los intervalos de tiempo manejados en la planta industrial se seleccionaron tiempos entre 20 y 40 minutos con el fin de no generar costos adicionales en el proceso productivo.

Tabla 12. Porcentaje de SO₃ obtenido en el mineral después de calcinación a diferentes tiempos. (T=110°C).

Prueba N°	Tiempo (min)	%SO ₃
1	0	43.397
2	20	45.53
3	30	46.10
4	40	46.60
5	50	48.10

Fuente: Autores del proyecto

Figura 23. Porcentaje de SO₃ Vs. Tiempo de Calcinación (T= 110°C)



Fuente: Autores del proyecto

- **Temperatura**

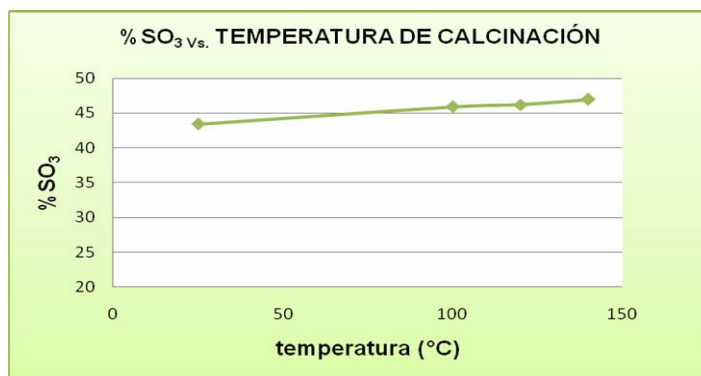
De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 13 y figura 24, se analizó el comportamiento del %SO₃ como función de la temperatura de operación. La selección de la temperaturas a utilizar en el diseño experimental se realizó teniendo en cuenta las condiciones operativas de la empresa, los requerimientos en el %SO₃ del producto para su fin comercial que corresponde a %SO₃≥46, temperaturas que permitan la reacción de deshidratación del mineral y finalmente no generar costos adicionales en el proceso productivo. De acuerdo con lo anterior, las temperaturas empleadas para el diseño experimental de esta etapa son 110 y 140 °C.

Tabla 13. Porcentaje de SO₃ obtenido en el mineral después de calcinación a diferentes temperaturas. (30 minutos).

Prueba N°	Temperatura (°C)	%SO ₃
1	25	43.397
2	100	45.89
3	120	46.20
4	140	46.94

Fuente: Autores del proyecto

Figura 24. Porcentaje de SO₃ Vs. Temperatura de Calcinación (t= 30 min).



Fuente: Autores del proyecto

- **Intervalo de tamaños de partícula.**

De acuerdo con distribución granulométrica obtenida para la muestra M2 (ver anexo D) y la figura 19 se escogieron los intervalos de tamaños de partículas empleados en el diseño experimental de esta etapa los cuales corresponden a (-10m/+35mallas) y (-35mallas/+140mallas) donde el primer rango representa los tamaños más grandes dentro de la distribución granulométrica y el segundo los más finos.

3.3.3 Etapa de molienda final

Los niveles de las variables determinadas fueron el tiempo de remolienda, intervalo de tamaños de partícula y % carga de bolas.

- **Tiempo.**

Tomando como base de análisis la tabla 14 y figura 25, es posible afirmar que el porcentaje de mineral pasante de la malla 200m (Tyler), aumenta de manera proporcional con el tiempo de molienda. Se observó un aumento significativo en la pendiente de la gráfica obtenida para los primeros tiempos de molienda. La selección de los niveles de esta variable se realizó teniendo en cuenta las condiciones operativas manejadas en la empresa y de acuerdo con el comportamiento mostrado en la figura 25 donde se obtienen tamaños adecuados para el empaclado del producto final. Se tomaron tiempos de 4 y 8 minutos con el fin de garantizar la finura adecuada del producto final de acuerdo con los requerimientos comerciales del mismo.

**Tabla 14. Peso y porcentaje de mineral retenido y pasante de la malla 200m
Tyler**

TIEMPO DE MOLIENDA	PESO PASANTE (gr)	PESO RETENIDO (gr)	% Peso (-200m)
0	27.84	172.16	13.92
1	33.7	166.3	16.85
2	55.76	144.24	27.88
4	97.22	102.78	48.61
8	100.26	99.74	50.13
16	96.2	96.2	51.9

Fuente: Autores del proyecto

Figura 25. Variación del porcentaje de mineral pasante en malla 200m Tyler respecto al tiempo de molienda



Fuente: Autores del proyecto

- **Intervalo de tamaños de partícula.**

De acuerdo con distribución granulométrica obtenida para la muestra M2 (ver anexo D) y la figura 19 se escogieron los intervalos de tamaños de partículas empleados en el diseño experimental de esta etapa los cuales corresponden a (-10m/+35mallas) y (-35mallas/+140mallas) donde el primer rango representa los tamaños más grandes dentro de la distribución granulométrica y el segundo los más finos.

- **Carga de bolas.**

Para el desarrollo del diseño experimental se tomaron dos distribuciones de bolas, para lo cual se combinaron los 3 diferentes diámetros de bolas disponibles: 1,93cm, 2,60cm y 3,68 cm. La primera distribución denominada J_1 (Ver anexo B) corresponde al 10% del volumen total del molino y contiene en su mayoría bolas del mayor diámetro utilizado. La segunda distribución denominada J_2 (Ver anexo B) corresponde al 5% del volumen total del molino y contiene en su mayoría bolas del menor diámetro utilizado. Estas distribuciones se utilizaron con el fin de observar el efecto del diámetro de las bolas empleadas sobre los intervalos de tamaños de partícula en el mineral obtenido luego del proceso de conminución.

3.4 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN PRUEBAS DE LABORATORIO.

El análisis de los resultados obtenidos para las etapas de molienda, calcinación y remolienda se realizó con ayuda del paquete estadístico STATGRAPHICS, con el cual se observó el comportamiento de la variable respuesta de cada una de las etapas estudiadas a diferentes condiciones operativas.

3.4.1 Etapa de molienda

Las combinaciones correspondientes para cada una de las pruebas realizadas y los niveles de las variables utilizadas en cada caso se encuentran en la tabla 5 y tabla 4 respectivamente. Los resultados obtenidos para el porcentaje de mineral pasante en la malla 100m (Tyler) se encuentran en la tabla 15.

Tabla 15. % Peso (-100m) obtenido en la etapa de molienda.

PRUEBA	REPETICIONES		MEDIA % Peso (-100m)
	% Peso (-100m) (1)	% Peso (-100m) (2)	
MOL 01	49,35	47,41	48,38
MOL 02	32,56	30,92	31,74
MOL 03	55,24	53,12	54,18
MOL 04	50,56	48,71	49,64
MOL 05	40,15	38,78	39,47
MOL 06	45,63	44,18	44,91
MOL 07	60,14	63,21	61,68
MOL 08	35,98	38,23	37,11

Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 15 se observa que los mejores resultados para la variable de respuesta % peso (-100m) se obtuvieron cuando se utilizó el mayor tiempo de molienda y mayor diámetro de partícula para las diferentes cargas de bolas. Los resultados

menos favorables se obtienen bajo menores condiciones de tiempo y carga de bolas $J_2 = 5\%$.

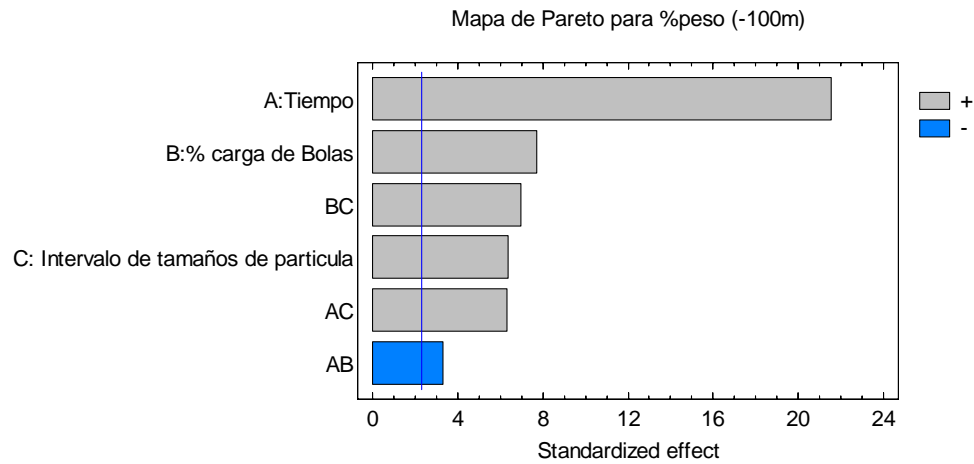
- **Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de molienda.**

Una vez obtenidos los resultados para el porcentaje en peso de mineral pasante de la malla Tyler N°100m, se realizó un análisis de resultados con ayuda del paquete estadístico Statgraphics, el cual permitió obtener una ecuación empírica que representa la influencia de las variables independientes seleccionadas sobre la variable de salida.

La figura 26 representa el mapa de Pareto estandarizado para el % peso (-100m). Esta grafica permite observar la influencia de las variables independientes y la sinergia entre ellas, sobre la variable de salida. La linea vertical en la gráfica representa el nivel de confiabilidad sobre el que se realizo el análisis, de acuerdo con lo anterior el efecto de las variables independientes o su sinergia, será significativo sobre la variable respuesta si se encuentra sobre el lado derecho de dicha linea. Los signos + y – representan el signo que antecede a cada coeficiente (variable o sinergia de variables independientes) dentro del polinomio. La gráfica revela la influencia del tiempo, %carga de bolas e intervalo de tamaños de partícula sobre el % peso (-100m). Además se observa que tienen un efecto significativo sobre la variable respuesta las sinergia entre:

- carga de bolas e intervalo de tamaños de partícula (BC).
- tiempo e intervalo de tamaños de partícula (AC).
- tiempo y carga de bolas (AB).

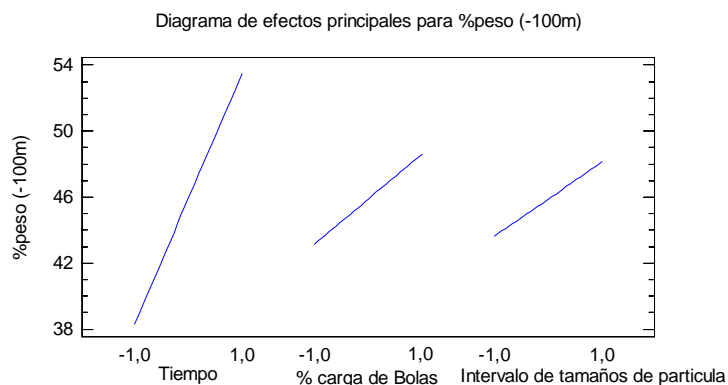
Figura 26. Mapa de Pareto estandarizado para el % peso (-100m).



Fuente: Autores del proyecto

La figura 27 muestra el diagrama de efectos principales sobre el %peso (-100m) para cada una de las variables independientes seleccionadas y su respectivo nivel. En este caso el efecto principal será para la línea que tenga mayor pendiente ya que de este modo se lograra la mayor cantidad de mineral pasante en la malla 100m (Tyler). De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta el comportamiento mostrado por la figura, se puede afirmar entonces que las condiciones más adecuadas para este propósito son un tiempo de 32 minutos, porcentaje de carga de bolas $J_1 = 10\%$ y intervalo de tamaños de partícula (-1"/+10m) que corresponden a los puntos en donde se observan los mayores valores para la variable respuesta.

Figura 27. Diagrama de efectos principales para el %peso (-100m)



Fuente: Autores del proyecto

Con los datos obtenidos experimentalmente y con la ayuda del paquete estadístico se logró obtener la ecuación empírica para el % peso (-100m), la cual se encuentra a continuación:

$$\% \text{Peso} (-100\text{m}) = 45,8856 + 7,58188 * t + 2,72062 * \% \text{Cb} + 2,23938 * l_p - 1,16063 * t * \% \text{Cb} + 2,22062 * t * l_p + 2,44437 * \% \text{Cb} * l_p$$

Donde:

- t: tiempo de molienda
- l_p : diámetro de partícula.
- %Cb: porcentaje de carga de bolas del molino.
- $t * \% \text{Cb}$: sinergia entre tiempo y carga de bolas
- $t * l_p$: sinergia entre tiempo e intervalo de tamaños de partícula.
- $l_p * \% \text{Cb}$: sinergia entre intervalo de tamaños de partícula y carga de bolas.

De acuerdo con el análisis estadístico, todos los términos son significativos dentro de la ecuación empírica y solo es válida para los niveles asignados a cada variable en las pruebas preliminares.

El análisis estadístico también permite obtener los valores óptimos para obtener el mayor porcentaje de mineral pasante de la malla 100m (Tyler), el valor más alto para el %peso (-100m) arrojado por el paquete estadístico corresponde a 61,9319. La tabla 16 muestra las condiciones adecuadas para esta etapa.

Tabla 16. Valores adecuados para el %peso (-100m) en etapa de molienda.

Factor	Bajo	Alto	Adecuado
Tiempo (minutos)	16	32	32
carga de Bolas	J ₂ = 5%	J ₁ = 10%	J ₁ = 10%
Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)	-10m/ +35m	-1"/+10m	-1"/+10m

Fuente: Autores del proyecto

3.4.2 Etapa de calcinación

Las combinaciones correspondientes para cada una de las pruebas realizadas y los niveles de las variables utilizadas en esta etapa se encuentran en la tabla 9 y tabla 8 respectivamente. Los resultados obtenidos para el porcentaje de SO₃ se encuentran en la tabla 17. En la figura 28 se observa una muestra de mineral antes (izquierda) y después (derecha) de la etapa de calcinación.

Tabla 17. Porcentaje de SO₃ obtenido en la etapa de calcinación.

PRUEBA	REPETICIONES		MEDIA (%SO ₃)
	% SO ₃ (1)	%SO ₃ (2)	
CAL 01	47,55	46,90	47,23
CAL 02	48,83	50,50	49,67
CAL 03	46,67	46,78	46,73
CAL 04	48,80	48,10	48,45
CAL 05	46,75	47,34	47,05
CAL 06	45,53	45,61	45,57
CAL 07	47,76	46,15	46,96
CAL 08	46,23	46,33	46,28

Fuente: Autores del proyecto

Figura 28. Muestra de mineral antes y después de la etapa de calcinación.



Fuente: Autores del proyecto

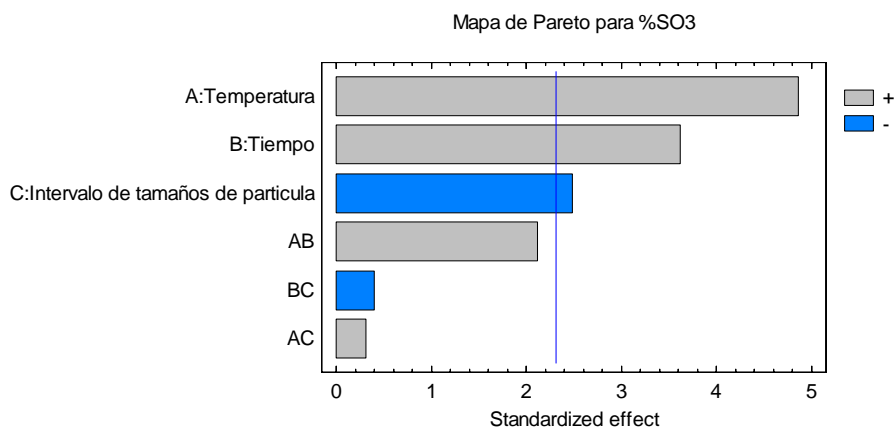
En la tabla 17 se observa que los mejores resultados para la variable de respuesta (%SO₃) se obtuvieron cuando se utilizó el mayor tiempo de calcinación y mayor temperatura, obteniéndose el mayor %SO₃ para el intervalo de tamaños de partícula más fino. Los menores %SO₃ se obtienen cuando se opera con la temperatura más baja y el intervalo de tamaños de partícula más grueso, el menor valor para el %SO₃ se da para el menor tiempo de calcinación utilizado.

- **Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de calcinación.**

Una vez obtenido los resultados para la variable respuesta (%SO₃) en las muestras analizadas, se realizó el mismo análisis que en las etapas anteriores, con ayuda de mismo paquete estadístico, con el fin de analizar el efecto de las variables independientes escogidas sobre la variable respuesta. La figura 29 representa el mapa de Pareto estandarizado para el %SO₃.

La figura revela la influencia significativa unicamente de las variables independientes, mas no de la sinergia existente entre ellas sobre el %SO₃. Además se observa que la variable que presenta el efecto mas significativo sobre la variable respuesta es la temperatura, seguida del tiempo y finalmente el intervalo de tamaños de partícula con el efecto menos significativo. También se observa que esta ultima variable tiene un efecto negativo sobre la variable respuesta, por lo que se espera que para intervalos de tamaños de partícula gruesos existan porcentajes de SO₃ menores, comparado con los intervalos de tamaños de partícula finos.

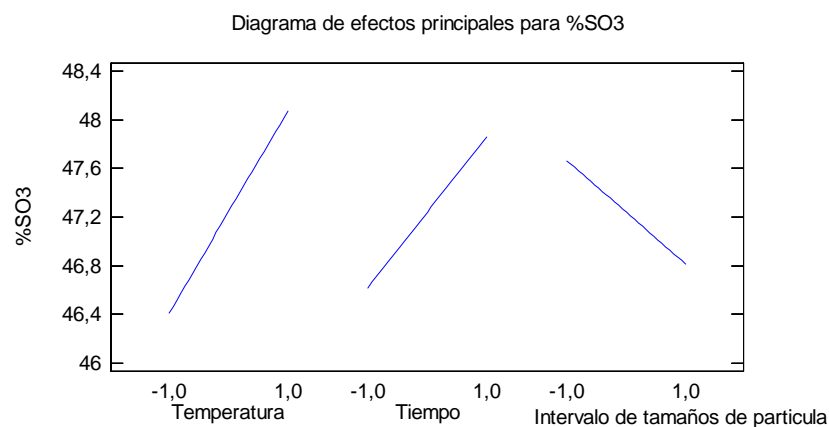
Figura 29. Mapa de pareto estandarizado para %SO3 en calcinación



Fuente: Autores del proyecto

La figura 30 representa el diagrama de efectos principales sobre el porcentaje de SO₃ para cada una de las variables independientes seleccionadas y su respectivo nivel. Debido a que se desea maximizar el %SO₃, el efecto principal de las variables analizadas, se encontrará en el punto donde se presente el mayor valor para la variable respuesta. De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta el comportamiento mostrado por la figura, puede afirmarse entonces que los mejores resultados se encuentran para condiciones de temperatura de 140°C, tiempo de 40 minutos e intervalo de tamaños de partícula de (-35m/+140m).

Figura 30. Diagrama de efectos principales para %SO₃ en calcinación.



Fuente: Autores del proyecto

La ecuación empírica para el porcentaje de SO₃, obtenida a partir de los datos experimentales y con ayuda del paquete estadístico, se encuentra a continuación:

$$\%SO_3 = 47,2394 + 0,834375*T + 0,620625*t - 0,425625*lp + 0,363125*T*t + 0,054375*T*lp - 0,069375*t*lp$$

Donde:

- t: tiempo de calcinación.

- Ip: intervalo de tamaños de partícula.
- T: temperatura.
- t*T: sinergia entre tiempo y temperatura.
- T*Ip: sinergia entre temperatura e intervalo de tamaños de partícula.
- Ip*t: sinergia entre intervalo de tamaños de partícula y tiempo.

Teniendo en cuenta el análisis estadístico realizado sobre los resultados obtenidos y la relación que guardan con la ecuación empírica obtenida, es posible afirmar que los tres últimos términos no son significativos dentro de la ecuación empírica ya que no presentan un efecto significativo sobre la variable respuesta y que la ecuación empírica solo es válida para los niveles asignados a cada variable en las pruebas preliminares.

El análisis estadístico también permite obtener los valores adecuados que permiten maximizar el porcentaje de SO₃ en el mineral. El valor adecuado para el %SO₃ arrojado por el paquete estadístico corresponde a 49,4981. La tabla 18 muestra las condiciones adecuadas para esta etapa.

Tabla 18. Valores adecuados para %SO₃ en etapa de calcinación.

Factor	Bajo	Alto	Adecuado
Tiempo (minutos)	20	40	40
Temperatura (°C)	110	140	140
Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)	-35m/+140m	-10m/+35m	-35m/+140m

Fuente: Autores del proyecto

3.4.3 Etapa de molienda final

Las combinaciones correspondientes para cada una de las pruebas y los niveles de las variables utilizadas en esta etapa se encuentran en la tabla 7 y tabla 6 respectivamente. Los resultados obtenidos para el porcentaje de mineral pasante de la malla 200m (Tyler) se encuentran en la tabla 19.

Tabla 19. % peso (-200m) obtenido en la etapa de molienda final.

PRUEBA	REPETICIONES		MEDIA % peso (-200m)
	% peso (-200m) (1)	% peso (-200m) (2)	
REM 01	19,21	16,26	17,74
REM 02	18,34	16,89	17,62
REM 03	27,18	22,33	24,76
REM 04	26,75	27,36	27,06
REM 05	36,82	34,22	35,52
REM 06	26,68	23,39	25,04
REM 07	33,33	30,64	31,99
REM 08	36,67	34,19	35,43

Fuente: Autores del proyecto

De acuerdo con la tabla 19, los mejores resultados sobre la variable de respuesta %peso (-200m) se registraron cuando se trabajo con el mayor tiempo de molienda y cuando existía una relación entre el intervalo de tamaños de partícula y la carga de bolas. Los resultados menos favorables se encuentran para el menor tiempo utilizado y el intervalo de tamaños de partícula más grueso.

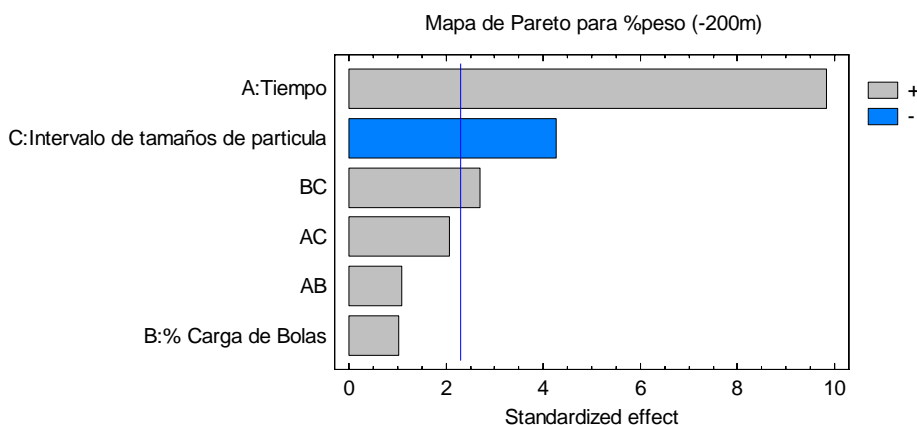
- **Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la etapa de molienda final.**

Una vez obtenidos los resultados para el %peso (-200m), se realizó un análisis de resultados con ayuda del paquete estadístico Statgraphics, el cual permitió obtener

una ecuación empírica que representa la influencia de las variables independientes seleccionadas sobre la variable de salida.

La figura 31 representa el mapa de Pareto estandarizado para el %peso (-200m). La gráfica revela la influencia del tiempo, carga de bolas y diámetro de partícula sobre el %peso (-200m). De acuerdo con la figura se observa que las variables que tienen un efecto más significativo sobre la variable respuesta son el tiempo, diámetro de partícula y la sinergia entre el intervalo de tamaños de partícula y la carga de bolas (BC), siendo el tiempo la variable mas significativa. El tamaño de partícula presenta un efecto indeseable sobre la variable respuesta ya que tamaños de partícula gruesos hay disminución en la cantidad de mineral pasante de la malla 200m (Tyler).

Figura 31. Mapa de Pareto estandarizado para el %peso (-200m).

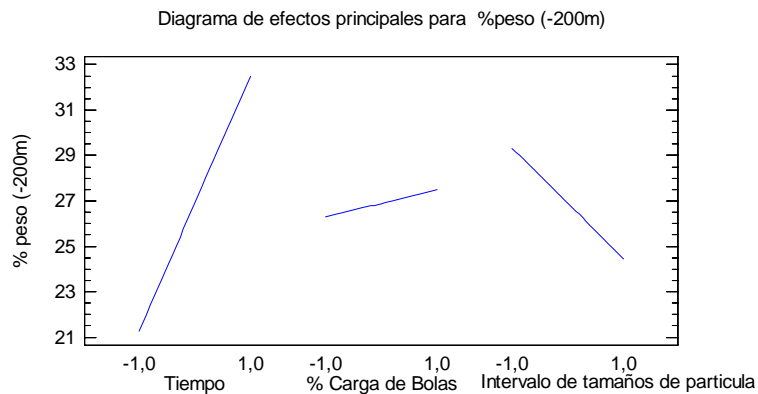


Fuente: Autores del proyecto

La figura 32 muestra el diagrama de efectos principales sobre el % peso (-200m) para cada una de las variables independientes seleccionadas y su respectivo nivel. En este caso el efecto principal será para la línea que tenga mayor pendiente ya que de este modo se lograra la mayor cantidad de mineral pasante

en la malla 200m (Tyler). De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta el comportamiento mostrado por la figura, se puede afirmar entonces que las condiciones más adecuadas para este propósito son un tiempo de 8 minutos, carga de bolas $J_1 = 10\%$ e intervalo de tamaños de partícula de (-35m/+140m), que corresponden a los puntos en donde se observan los mayores valores para la variable respuesta.

Figura 32. Diagrama de efectos principales para el %peso (-200m).



Fuente: Autores del proyecto

Con los datos obtenidos experimentalmente y con la ayuda del paquete estadístico se logró obtener una ecuación empírica para el % peso (-200m), la cual se encuentra a continuación:

$$\% \text{peso} (-200m) = 26,8912 + 5,60625 * t + 0,585 * \% Cb - 2,4325 * Gr + 0,625 * t * \% Cb + 1,1775 * t * Ip + 1,53875 * \% Cb * Ip$$

Donde:

- t: tiempo de molienda
- Ip: intervalo de tamaños de partícula.

- %Cb: porcentaje de carga de bolas del molino.
- t*%Cb: sinergia entre tiempo y carga de bolas
- t*Ip: sinergia entre tiempo e intervalo de tamaños de partícula.
- Ip*%Cb: sinergia entre intervalo de tamaños de partícula y carga de bolas.

De acuerdo con el análisis estadístico, solo son significativos la temperatura, el intervalo de tamaños de partícula y la sinergia entre el intervalo de tamaños de partícula y la carga de bolas, por lo anterior los demás términos son despreciables dentro de la ecuación empírica y solo es válida para los niveles asignados a cada variable en las pruebas preliminares.

El análisis estadístico también permite obtener los valores adecuados para obtener el mayor porcentaje de mineral pasante de la malla 200m (Tyler), el valor adecuado para esta arrojado por el paquete estadístico corresponde a 34,0812. La tabla 20 muestra las condiciones adecuados para esta etapa.

Tabla 20. Valores adecuados para %peso (-200m) en la etapa de molienda final.

Factor	Bajo	Alto	Adecuado
Tiempo (minutos)	4	8	8
carga de Bolas	J ₂ =5%	J ₁ =10%	J ₁ = 10%
Intervalo de tamaños de partícula (Malla Tyler)	-35m/+140m	-10m/ +35m	-35m/+140m

Fuente: Autores del proyecto

3.5 PROPUESTA PARA EL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO.

Luego del análisis de resultados obtenidos en el diseño experimental para las etapas de molienda, calcinación y molienda final, se seleccionaron los niveles de las variables para las condiciones operativas más favorables en el proceso de beneficio de yeso y se simuló a nivel de laboratorio, de acuerdo con las siguientes condiciones operativas seleccionadas:

- Etapa de molienda:
Tiempo= 32 minutos.
Carga de bolas= $J_1 = 10\%$.
- Etapa de calcinación:
Tiempo= 40 minutos.
Temperatura= 140°C
- Etapa de molienda final:
Tiempo= 8 minutos
Carga de bolas= $J_1 = 10\%$

No es posible proponer un intervalo de tamaños de partícula determinado debido a que en el proceso productivo llevado a cabo en la planta industrial desechar parte de la materia prima no es económicamente viable.

Se propone entonces un diseño básico de planta para el beneficio de yeso conformado por 7 etapas, iniciando con la extracción de la mina hasta el empaclado del producto final, con el fin de homogenizar el tamaño del mineral de alimentación a la primera etapa de reducción de tamaño se sugiere una trituración previa, esta trituración se realizó a nivel de laboratorio en el triturador cónico ubicado en la planta de aceros de la universidad industrial de Santander (Figura 33).

Se realizó análisis granulométrico y del porcentaje de SO_3 obtenido en cada una de las muestras tomadas en el circuito simulado en el laboratorio (Ver figura 17), para esto se tomo una muestra de 200 gramos en cada punto del circuito.

Figura 33. Triturador cónico del laboratorio



Fuente: Autores del proyecto

3.5.1 Determinación del porcentaje de SO_3 en las muestras tomadas para el diseño básico de planta propuesta.

Este análisis se realizó mediante la determinación del porcentaje de SO_3 (Ver anexo A) en cada una de las muestras tomadas en la propuesta del proceso, repitiendo cada ensayo una vez. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 21.

Tabla 21. Porcentaje de SO₃ para las muestras tomadas en el diseño básico de planta propuesto para el beneficio de yeso.

Muestra	REPETICIONES		
	%SO ₃ (1)	%SO ₃ (2)	%SO ₃ (Promedio)
P1	42,817	43,977	43,397
P2	42,817	43,977	43,397
P3	44,980	45,620	45,300
P4	44,980	45,620	45,300
P5	49,157	49,423	49,290
P6	49,157	49,423	49,290

Fuente: Autores del proyecto

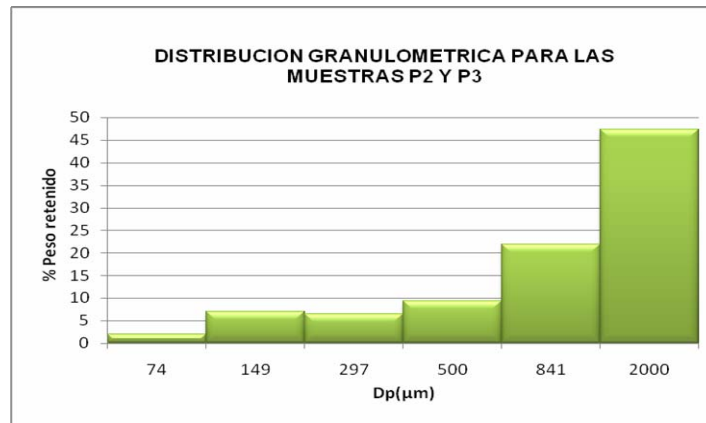
3.5.2 Análisis granulométrico de las muestras tomadas para el diseño básico de planta propuesto

Los resultados obtenidos para el análisis granulométrico de cada una de las muestras tomadas en el diseño básico de planta propuesto para el beneficio de yeso se muestran a continuación:

- **Muestra P1.** Distribución granulométrica (Ver figura 18, Anexo F).
Para la distribución granulométrica representada por la figura 18 el d_{80} corresponde a un tamaño de partícula de 4,3040 cm.

- **Muestra P2 y P3.** Distribución granulométrica (Ver figura 34, Anexo G).

Figura 34. Distribución granulométrica después de trituración P2 y P3 para el proceso propuesto

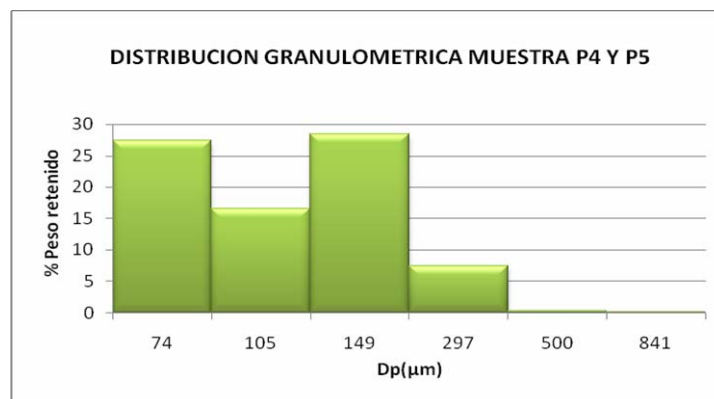


Fuente: Autores del proyecto

Para la distribución granulométrica representada por la figura 34 el d_{80} corresponde a un tamaño de partícula de 3,060 mm.

- **Muestra P4 y P5.** Distribución granulométrica (Ver figura 35, Anexo H).

Figura 35. Distribución granulométrica después de molienda P4 y P5 para el proceso propuesto

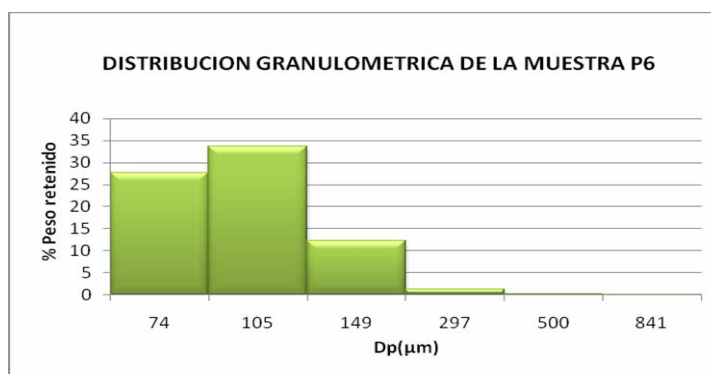


Fuente: Autores del proyecto

Para la distribución granulométrica representada por la figura 35 el d_{80} corresponde a un tamaño de partícula de 221 μm .

- **Muestra P6.** Distribución granulométrica (Ver figura 36, Anexo I).

Figura 36. Distribución granulométrica después de Remolienda P6 para el proceso propuesto

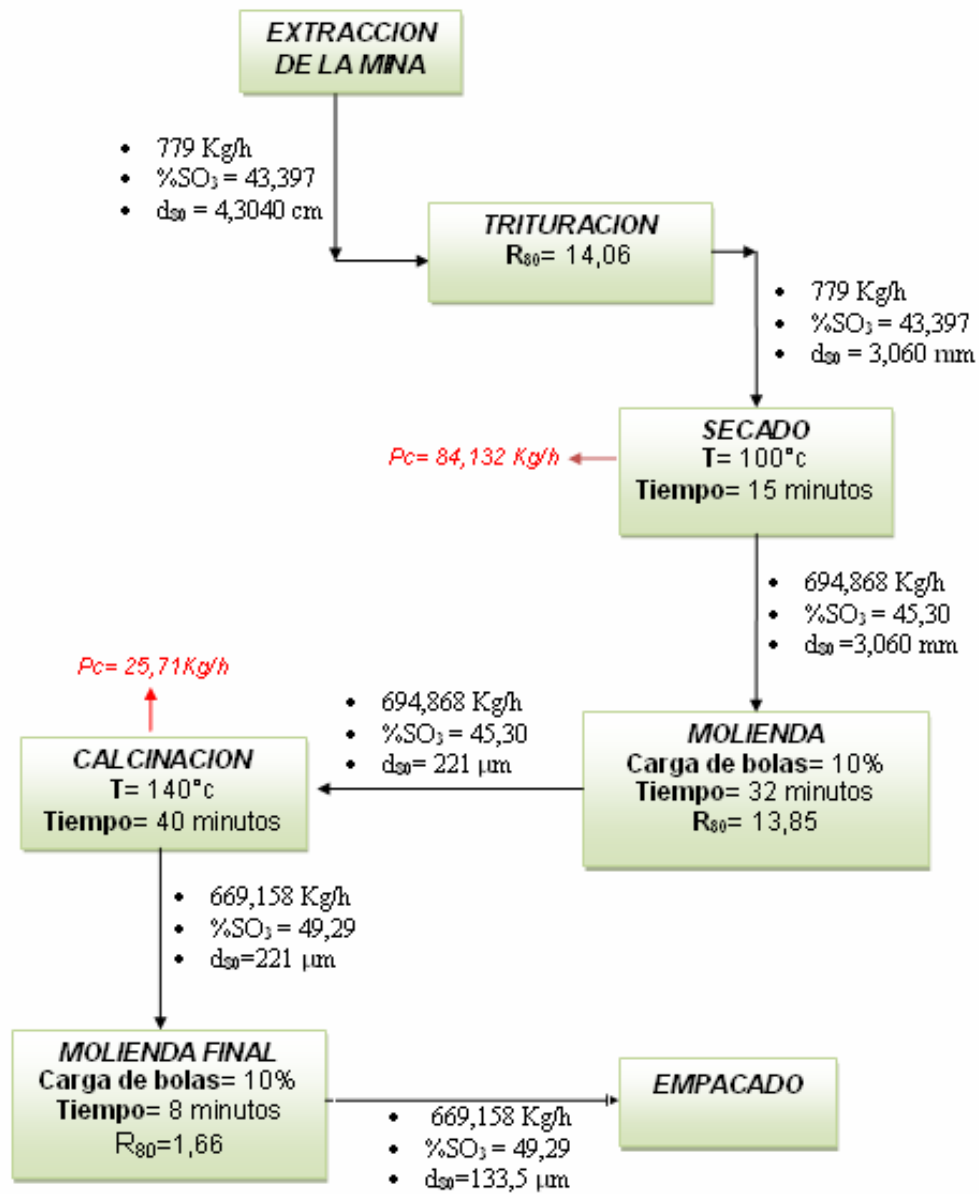


Fuente: Autores del proyecto

Para la distribución granulométrica representada por la figura 36 el d_{80} corresponde a un tamaño de partícula 133,5 μm

Una vez finalizado el análisis granulométrico y de porcentaje de SO_3 en las muestras se propone un diseño básico de planta que describa las etapas del proceso del beneficio de minerales de yeso en INYESA Ltda., con las condiciones operativas más favorables (Ver figura 37).

Figura 37. Diseño básico de planta propuesto para el beneficio de minerales de yeso



Fuente: Autores del proyecto

La figura 37 muestra el proceso de producción propuesto para el beneficio de minerales de yeso..

El mineral extraído de la mina inicia el proceso con un %SO₃ de 43,397 y un d₈₀ de 4,3040 cm. En la etapa de trituración el mineral es reducido de tamaño ingresando con un d₈₀=4,3040cm y finalizando con d₈₀= 3,060mm. Después de la etapa de trituración el mineral ingresa un proceso de secado en donde ocurre un aumento de %SO₃ hasta 46,120% sin cambios en el tamaño de partícula del mineral. Posteriormente el mineral pasa a la siguiente etapa de reducción de tamaño donde obtiene un radio de reducción (R₈₀) de 13,85. El mineral con un d₈₀=221μm ingresa al horno de calcinación en donde ocurre la reacción de deshidratación del mineral alcanzando un % SO₃ de 49,290. Para dar el tamaño final al producto ingresa a una otra etapa de molienda en donde se obtiene un radio de reducción (R₈₀) de 1,66. El producto final saldría al mercado con un d₈₀ de 133,5μm y un %SO₃ de 49,290.

Para el balance de materiales del proceso a nivel de laboratorio no se tuvieron en cuenta las pérdidas por emisión en las etapas del proceso ya que no fue posible realizar una medida de estas; pero si se tuvieron en cuenta las pérdidas producidas por la acción del calor en las etapas de secado y calcinación del mineral. La eficiencia de este proceso propuesto a nivel de laboratorio es de 85,9%.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis estadístico realizado a los datos experimentales es posible determinar que las condiciones operativas más favorables en la etapa de molienda son: tiempo de molienda= 32 minutos, Carga de bolas =10% del volumen total del molino.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado a los datos experimentales es posible determinar que las condiciones operativas más favorables en la etapa de calcinación son: Tiempo= 40 minutos, temperatura = 140 °C y un distribución de tamaño lo más fina posible.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado a los datos experimentales es posible determinar que las condiciones operativas más favorables en la etapa de molienda final son: Tiempo = 8 minutos, Carga de bolas = 10%del volumen total del molino.

Al comparar el %SO₃ obtenido en INYESA Ltda y a nivel de laboratorio, se observa gran similitud entre ellos. De acuerdo con lo anterior, es posible obtener resultados similares implementando condiciones operativas de tiempo y temperatura menores a las empleadas en la planta industrial, lo cual representaría un ahorro en los costos del proceso productivo.

El mayor porcentaje de SO₃ obtenido experimentalmente se presenta para el menor diámetro de partícula y para el mayor tiempo y temperatura empleados en el laboratorio. Esto se debe a que para un diámetro de partícula existe mayor área superficial disponible para que ocurra la reacción de deshidratación del mineral, además el aumento de la temperatura provoca un aumento de la cinética de esta

reacción y finalmente un mayor tiempo de exposición asegura que la transformación ocurra en la mayor parte del mineral.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios posteriores con equipos similares a los empleados en INYESA Ltda empleando un molino de martillos para las etapas conminución y un horno rotatorio para la etapa de calcinación.
- Realizar un análisis por difracción de rayos X y espectrometría de fluorescencia de rayos X para determinar especies cristalinas presentes en el mineral de yeso y el porcentaje de cada elemento.
- Estudiar otras variables de respuesta para el producto final de obtención de yeso como su resistencia mecánica y el tiempo de fraguado.
- Realizar análisis económico comparando el proceso propuesto y el llevado a cabo en INYESA LTDA.

BIBLIOGRAFIA

- “MAPA GEOLÓGICO GENERALIZADO DEPARTAMENTO DE SANTANDER”, Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear, INGEOMINAS, 2000.
- ASTM D422- 63 (2007). STANDARD TEST METHOD FOR PARTICLE- SIZE ANALYSIS OF SOILS.
- CARREÑO CONTRERAS, Agni Yamile MACIAS CHACON, José Fernando. Propuesta de un sistema de beneficio para una arcilla montmorillonítica nacional. Bucaramanga UIS 2007.
- CARRETERO, María Isabel y POZO Manuel. Mineralogía Aplicada, Editorial Thomson Internacional, Madrid España, 2007.
- DA, Luz Benvindo A. Tratamiento de Minerios, 4º Edición Revisada, Ediciones Cetem Brasil, 2004.
- DAZA, Imelda. Minería del yeso en Colombia. Bogotá, Ministerio de Minas Y Petróleos 1972.
- DÍAZ BRAVO, Pablo. Balance de Materia y Energía, Ediciones Arcángel, Lima Perú, 2008.
- FERNANDEZ ZAFRA, Ana Teresa. Factibilidad y estudio técnico de una planta de ácido sulfúrico a partir del yeso de la mesa de los santos con recuperación de subproductos. Bucaramanga UIS 1970.

- FREUND ACUÑA, Antonio Enrique. Utilización del sulfato de calcio (yeso blanco) como carga de papel. Bucaramanga UIS 1989.
- Handbook Of Mineral Dressing; Ores And Industrial Mineral. Taggart, Arthur F. New York: John Wiley, 1945.
- JAMES DWIGHT, Dana. HURLBURT S, Cornelius. Manual de mineralogía. Barcelona. Reverte. 1962. 2 Edición.
- KUEHL, R. Diseño de experimentos. Thomson Learning. Bogotá, Colombia. 2000.
- MANZANEDA CABALA, José. Procesamiento de Minerales, Ediciones San Marcos, Lima Perú, 2000.
- MELO ÁVILA, Martha Elisa y RUEDA PARRA, Jesús David. Fabricación de láminas para la construcción a partir de yeso y desperdicios de papel, Bucaramanga UIS, 1971.
- NOVO DEMIGUEL, Luciano. El yeso en la construcción. Barcelona CEAC 1968.
- ORDUZ CABRERA, Germán. Explotación, administración y comercialización del mineral de yeso de la Mesa de los Santos Santander. Bucaramanga UIS 1975.
- ORJUELA PARRA, Oscar Augusto. Beneficio de Minerales de yeso provenientes de la mina la Nacuma "Municipio De Los Santos". Bucaramanga UIS 2006.

- ORTEGA RENGIFO, Héctor Hugo. Factibilidad técnica y diseño de una planta productora de yeso estuco con capacidad de cinco toneladas diarias.. Bucaramanga UIS 1974.
- OSORIO, Adriana. RESTREPO, Gloria MARIN, Juan. Molienda de clinker de cemento: evaluación de la influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda. DYNA año 76 N° 158,pp 69-77. Medellin, Junio de 2009. ISSN 0012-7353.
- PAEZ, Viviana Isabel. Estudio para el mejoramiento de las operaciones de beneficio de la sociedad minera “El Cuatro”. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2000
- PARDAVÉ LIVIA, Walter. Beneficio de Minerales de Yeso de Mina Nacuma, Los Santos Santander, Rev. Scientia et Técnica Año XIII, N° 36, Septiembre 2007, Páginas 861-866.
- PARDAVÉ LIVIA, Walter. Reciclado Industrial de Metales, ECOE Ediciones, Bogotá Colombia, 2006.
- PEREZ CASTILLA, Judith; PASCUAZA DULCE, Barbará Maricela. Obtención de mortero a partir de residuos del beneficio de gravimétrico de la galena. Bucaramanga UIS 2006.
- QUIROZ NÚÑEZ, I. Ingeniería metalúrgica. Operaciones unitarias en procesamiento de minerales. Universidad Nacional de Ingeniera. Lima Perú. 1986
- RIVERA ZEBALLOS, Juan H. Compendio de conminución. Editorial Consejo Nacional De Ciencia y Tecnología - CONCYTEC. Lima - Perú. 2003.

- TAPIA QUEZADA, Jaime. Preparación Mecánica de Minerales –Universidad Arturo Prat Iquique – Chile Ingeniería en Metalurgia Extractiva
- VILLAS BOAS, R. A review on indicators of Sustainability for the Minerals Extraction Industries, Edited by Cyted, Spain, 2005.
- W. L. Faith, KEYES B., L, Ronald Clark. Industrial Chemicals. John Wiley & Sons, III Edicion 1966.
- Solicitud de permisos de emisión atmosférica industria yesera santandereana INYESA Ltda. Bucaramanga 2004.

ANEXOS

ANEXO A. DETERMINACION GRAVIMETRICA DE SO₃ EN UN YESO

1. REACTIVOS

1.1 Cloruro de Bario 0.5F: Pesar 122.16 gramos de BaCl₂.2H₂O, disolver con agua destilada y diluir hasta 1000 ml.

1.2 Acido clorhidrico solucion (1:5)

Diluir 100 ml de HCl concentrado en 500ml de agua destilada.

2. PREPARACION DE LA MUESTRA

2.1 Triturar y pulverizar la muestra en un mortero hasta que toda pase por un tamiz 80m Tyler.

2.2 Pesar exactamente una muestra que este comprendida entre 0.5-0.6 gramos y pasarla cuantitativamente a un vaso de precipitados, agregar 50ml de HCl (1:5) y llevar a ebullición, añadir 100ml de agua caliente y continuar calentando a ebullición durante 5 minutos. Filtrar inmediatamente en papel franja negra, lavar 5 veces con agua caliente recogiendo el filtrado y las aguas de lavado en el mismo vaso.

3. PRECIPITACION

Calentar a ebullición el filtrado obtenido anteriormente, luego agregar lentamente 20 ml de solución de cloruro de bario, agitar y dejar en reposo una hora. Comprobar que la precipitación ha sido completa, agregando una gota de cloruro de bario por las paredes, si se forma precipitado se debe agregar mas cloruro de bario.

4. FILTRACION

Filtrar el precipitado formado en papel franja azul, lavar 10 veces o mas con agua hasta ausencia de cloruros y desprejar el filtrado.

5. CALCINACION

Lavar y secar un crisol de porcelana, calcinarlo en una mufla a 900°C durante media hora, dejarlo enfriar en un desecador y pesarlo.

Pasar el precipitado junto con el papel al crisol y colocarlo en un calentador eléctrico hasta carbonizar el papel, evitar la formación de llama. Luego calcinar en una mufla a 900°C durante una hora, dejar enfriar en un desecador y pesar.

6. CALCULO

$$\%SO_3 = P \cdot F \cdot 100 / W$$

Donde: P = Peso del precipitado calcinado

F = Factor gravimétrico del BaSO₄

W = Peso de la muestra.

7. REFERENCIAS

- Garcia, J., "Química Analítica cuantitativa", ediciones UIS, Bucaramanga, 1964, paginas 53 y 84.
- D.A. Skoog, y D.M. West, "Fundamentals of analytical chemistry", 2th Ed., Hlat, Remehart and Winston, Inc., New York, 1969, Capitulo 8.
- J.R. Barcelo, "Diccionario terminologico de Química", la Ed., Salvat, Barcelona.

ANEXO B. DISTRIBUCIÓN DE BOLAS PARA PRUEBAS PRELIMINARES

- Carga de bolas: $J_p = 7\%$ del volumen total del molino. (40% Grandes, 40% Pequeñas, 20% Medianas)

Diámetro (cm)	N° de bolas	Peso total de bolas (gramos)	Porcentaje en peso (%)
1,93	8	224,18	11,00
2,60	4	297,02	14,56
3,68	8	1517,60	74,44
Total	20	2038,8	100

DISTRIBUCION DE CARGA DE BOLAS PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL

- Carga de bolas $J_1 = 10\%$ (60% Grandes, 20% Pequeñas, 20% Medianas)

Diámetro (cm)	N° de bolas	Peso total de bolas (gramos)	Porcentaje en peso (%)
1,93	4	107,73	3,83
2,60	4	297,02	10,57
3,68	12	2405,47	85,60
Total	20	2810,22	100

➤ Carga de bolas $J_2 = 5\%$ (20% Grandes, 60% Pequeñas, 20% Medianas)

Diámetro (cm)	N° de bolas	Peso total de bolas (gramos)	Porcentaje en peso (%)
1,93	12	335,58	22,37
2,60	4	297,02	19,80
3,68	4	867,62	57,83
Total	20	1500,22	100

ANEXO C. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LA MUESTRA M1

N° Malla Tyler	Tamaño (µm)	Peso (gr)	%Peso retenido	%Peso acumulado retenido	%Peso acumulado pasante	F(x)
2"	50800	56.415	11.283	11.283	88.717	145.068
1 ½"	38100	65.365	13.073	24.356	75.644	115.91
1"	25400	15.585	3.117	27.473	72.527	84.483
7/8"	22600	32.57	6.514	33.987	66.013	77.127
¾"	19000	22.13	4.426	38.413	61.587	67.364
10	2000	184.53	36.906	75.319	24.681	11.636
20	841	47.105	9.421	84.74	15.26	5.920
35	500	21.525	4.305	89.045	10.955	3.946
50	297	17.3	3.460	92.505	7.495	2.629
100	149	19.655	3.931	96.436	3.564	1.535
140	105	16.625	3.325	99.761	0.239	1.168
200	74	0.375	0.075	99.836	0.164	0.889
-200		0.795	0.159	100	0	0
Total		500				

$$\text{Ecuación de Gaudin-Schumman: } F(x) = \left(\frac{x}{31529.56} \right)^{0.78}$$

Donde:

- F(x)= porcentaje en peso acumulado pasante.
- x= diámetro de partícula en µm

ANEXO D. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LA MUESTRA M2 Y M3

N° Malla	Tamaño (µm)	Peso (gramos)	%Peso retenido	%Peso acumulado retenido	%Peso acumulado pasante	F(x)
10	2000	40.33	8.066	8.066	91.934	116.820
20	841	92.465	18.493	26.559	73.441	69.347
35	500	71.725	14.345	40.904	59.096	50.708
50	297	66.45	13.290	54.194	45.806	37.059
100	149	102.645	20.529	74.723	25.277	24.466
140	105	44.71	8.942	83.665	16.335	19.818
200	74	12.07	2.414	86.079	13.921	16.053
-200		69.595	13.919	100	0	0
Total		500				

Ecuación de Gaudin- Schumman: $F(x) = \left(\frac{x}{1544.8} \right)^{0.602}$

Donde:

- $F(x)$ = porcentaje en peso acumulado pasante.
- x = diámetro de partícula en µm

ANEXO E. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LA MUESTRA M4

N° Malla	Tamaño (µm)	Peso (gramos)	%Peso retenido	%Peso acumulado retenido	% Peso acumulado pasante	F(x)
35	500	0.15	0.030	0.03	99.97	125.92
50	297	0.60	0.119	0.149	99.851	88.179
100	149	87.54	17.508	17.657	82.343	55.0122
140	105	193.76	38.751	56.408	43.592	43.3
200	74	90.08	18.016	74.424	25.576	34.084
-200		127.88	25.575	100	0	0
Total		500				

Ecuación de Gaudin- Schumman:
$$F(x) = \left(\frac{x}{356.97} \right)^{0.684}$$

Donde:

- F(x)= porcentaje en peso acumulado pasante.
- x= diámetro de partícula en µm

**ANEXO F. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA MINERAL INICIAL P1 PARA
EL PROCESO PROPUESTO**

N° Malla Tyler	Tamaño (µm)	Peso (gr)	%Peso retenido	%Peso acumulado retenido	%Peso acumulado pasante	F(x)
2"	50800	22.57	11.283	11.283	88.717	145.068
1 ½"	38100	26.15	13.073	24.356	75.644	115.91
1"	25400	6.23	3.117	27.473	72.527	84.483
7/8"	22600	13.03	6.514	33.987	66.013	77.127
¾"	19000	8.85	4.426	38.413	61.587	67.364
10	2000	73.81	36.906	75.319	24.681	11.636
20	841	18.84	9.421	84.74	15.26	5.920
35	500	8.61	4.305	89.045	10.955	3.946
50	297	6.92	3.460	92.505	7.495	2.629
100	149	7.86	3.931	96.436	3.564	1.535
140	105	6.65	3.325	99.761	0.239	1.168
200	74	0.15	0.075	99.836	0.164	0.889
-200		0.32	0.159	100	0	0
Total		200				

Ecuación de Gaudin- Schumman: $F(x) = \left(\frac{x}{31529.56} \right)^{0.78}$

Donde:

- F(x)= porcentaje en peso acumulado pasante.
- x= diámetro de partícula en µm

**ANEXO G. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DESPUES DE TRITURACION
P2 y P3 PARA EL PROCESO PROPUESTO**

N° Malla Tyler	Tamaño (µm)	Peso (gr)	%Peso retenido	%Peso acumulado retenido	%Peso acumulado pasante	F(x)
10	2000	94.79	47.395	47.395	52.605	53.840
20	841	43.95	21.974	69.369	30.631	29.666
35	500	18.53	9.265	78.634	21.368	20.744
50	297	12.90	6.452	85.086	14.914	14.496
100	149	13.87	6.935	92.021	7.979	9.019
200	74	4.11	2.053	94.074	5.926	5.572
-200		11.85	5.926	100	0	0
Total		200				

Ecuación de Gaudin- Schumman: $F(X) = \left(\frac{x}{4918.815} \right)^{0.688}$

Donde:

- F(x)= porcentaje en peso acumulado pasante.
- x= diámetro de partícula en µm

**ANEXO H. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DESPUES DE MOLIENDA P4
y P5 PARA EL PROCESO PROPUESTO**

N° Malla Tyler	Tamaño (µm)	Peso (gr)	%Peso retenido	%Peso acumulado retenido	%Peso acumulado pasante	F(x)
20	841	0.316	0.158	0.158	99.842	131.302
35	500	0.670	0.335	0.493	99.507	96.909
50	297	14.954	7.477	7.970	92.03	71.488
100	149	56.874	28.437	36.407	63.593	47.78
140	105	33.158	16.579	52.986	47.014	38.947
200	74	54.652	27.326	80.312	19.688	31.748
-200		39.374	19.687	100	0	0
Total		200				

$$\text{Ecuación de Gaudin- Schumman: } F(x) = \left(\frac{x}{527.6036} \right)^{0.5841}$$

Donde:

- F(x)= porcentaje en peso acumulado pasante.
- x= diámetro de partícula en µm

**ANEXO I. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DESPUES DE REMOLIENDA
P6 PARA EL PROCESO PROPUESTO**

N° Malla Tyler	Tamaño (µm)	Peso (gr)	%Peso retenido	%Peso acumulado retenido	%Peso acumulado pasante	F(x)
20	841	0.16	0.08	0.08	99.92	129.015
35	500	0.46	0.23	0.31	99.69	100.692
50	297	2.532	1.266	1.576	98.424	78.546
100	149	24.536	12.268	13.844	86.156	56.529
140	105	67.138	33.569	47.413	52.587	47.841
200	74	55.138	27.569	74.982	25.018	40.490
-200		50.036	25.018	100	0	
Total		200				

Ecuación de Gaudin- Schumman: $F(x) = \left(\frac{x}{492.8823} \right)^{0.4768}$

Donde:

- $F(x)$ = porcentaje en peso acumulado pasante.
- x = diámetro de partícula en µm