

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**METALÚRGICA**



**TESIS**

**Evaluación de las calizas para el diseño de la planta de calcinación en**

**la concesión Calquipa – Junín - 2018**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Metalurgista**

**Autor: Bach. Jean Carlos AVELINO ROMUALDO**

**Asesor: Mg. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO**

**Cerro de Pasco – Perú – 2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**METALÚRGICA**



**TESIS**

**Evaluación de las calizas para el diseño de la planta de calcinación en**

**la concesión Calquipa – Junín - 2018**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

Mg José Elí CASTILLO MONTALVAN

**PRESIDENTE**

---

Ms. Sc. Ramiro SIUCE BONIFACIO

**MIEMBRO**

---

Mg Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRÚZ

**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

a Dios fundamentalmente  
y a mis padres por haberme  
dado el regalo más preciado  
al igual que la vida mi profesión, por la  
cual viviré eternamente agradecido.

## **RECONOCIMIENTO**

Primeramente, agradecer a Dios por bendecirme, por guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Mi reconocimiento especial de inmensa gratitud a mi madre Anamelba Romualdo Chaca, por sus consejos, los valores y principios que me dio desde muy pequeño, ya que sin ella nada hubiera sido posible.

Asimismo, mis reconocimientos de gratitud a los docentes de la Escuela de formación profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial, al asesor del presente proyecto de investigación quien ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente.

## RESUMEN

Esta investigación determina la problemática que son las propiedades físicas de las calizas que inciden en el diseño de una planta de calcinación, para formularlo en preguntas, objetivos que se pretende alcanzar, justificando la presente investigación, dada la importancia que significa llevarlo a explotar el yacimiento en forma sostenible.

Los estudios desarrollados a través de las calicatas realizadas confirman la presencia de apreciables reservas en toda la concesión y resulta prometedor para su explotación.

El objetivo general fue determinar el método de calcinación a desarrollar; después de tener la certeza de las reservas cubicadas probables de calizas y sobre la formación geológica, elaborar el sistema de extracción y procesamiento.

Este estudio se aborda desde el enfoque cuantitativo, del tipo aplicado y un diseño de investigación experimental y tiene cuatro etapas de desarrollo de la investigación del siguiente modo: el primero después de realizar las calicatas para obtener las muestras representativas, se determinó la muestra compósito para desarrollar las pruebas experimentales.

Las pruebas experimentales realizadas demuestran que a menor diámetro (1”), 10 horas de calcinación (entre 850°C y 950°C), se obtiene el más alto porcentaje de CaO (84,40 y 84,90% respectivamente), a mayor diámetro (3”), se obtiene (53,45 y 77,10 % CaO), lo que indica que la reacción química se da parcialmente, quedando el núcleo sin reaccionar, por tener reacciones endotérmicas.

Se concluyó que en una primera fase se desarrollara pruebas de pilotaje con una planta a instalar pequeña y a esa escala que pague sus costos de procesamiento de las calizas.

**Palabras clave:** Cubicación de reservas, calcinación de calizas, desarrollo sostenible.

## ABSTRACT

This investigation determines the problem of the physical properties of limestones that affect the design of a calcination plant, to formulate it in questions, objectives that are intended to be achieved, justifying the present investigation, given the importance of taking it to exploit the deposit sustainably.

The studies carried out through the pits carried out confirm the presence of significant reserves throughout the concession and are promising for their exploitation.

The general objective was to determine the calcination method to be developed; After having the certainty of the probable cubed limestone reserves and of the geological formation, elaborate the extraction and processing system.

This study is approached from the quantitative approach, of the applied type and an experimental research design and has four stages of development of the investigation as follows: the first after making the pits to obtain the representative samples, the composite sample was determined for develop the experimental tests.

The experimental tests carried out show that at a smaller diameter (1 ”), 10 hours of calcination (between 850 ° C and 950 ° C), the highest percentage of CaO is obtained (84.40 and 84.90% respectively), at greater diameter (3 ”), is obtained (53.45 and 77.10% CaO), which indicates that the chemical reaction occurs partially, leaving the nucleus unreacted, due to having endothermic reactions.

It was concluded that in a first phase pilot tests would be carried out with a small plant to be installed and at that scale that pays its limestone processing costs.

**Keywords:** Reservoir cubing, calcination of limestone, sustainable development.

## INTRODUCCIÓN

Una de las funciones básicas de la universidad es la investigación. La generación de conocimiento es una preocupación esencial de las universidades, es su razón de ser. Todos los programas en el mundo proponen un modelo curricular por competencias destinado a la formación del nuevo profesional capaz de resolver problemas sustanciales de la sociedad e innovar el conocimiento.

La tesis es la prueba “de fuego” que demuestra las competencias requeridas para obtener el grado académico. Se espera de ella una evidencia indiscutible de las competencias de investigación aprendidas en las aulas universitarias y se aplique al campo profesional.

El presente proyecto, titulado “Evaluación de las calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018”, es interesante porque se trata de una roca que tiene múltiples usos después del ácido sulfúrico y requiere una explotación ecológica y sostenible.

Los estudios desarrollados a través de las calicatas realizadas confirman la presencia de apreciables reservas en toda la concesión y resulta prometedor para su explotación. Se encuentra dividido en cuatro capítulos; sigue una secuencia lógica propia de los proyectos de investigación, del siguiente modo:

**CAPÍTULO I.** Se determina la problemática, para formularlo en preguntas, objetivos que se pretende alcanzar, justificando la presente investigación, dada la importancia que significa llevarlo a explotar el yacimiento en forma sostenible.

**CAPÍTULO II.** Se expone cuatro antecedentes referidos al tema, dos investigaciones nacionales y dos internacionales, plasmados en tesis, seguido de una descripción de las bases teóricas desde una perspectiva general a específica de las calizas; se expone los métodos de cubicación y explotación; se plantea las hipótesis y se define las variables de operación.

CAPÍTULO III. Comprende el método de investigación, desarrollo experimental; sobre una población en 4 cuadrículas y muestreo aleatorio simple; con calicatas en la concesión, donde inicialmente se pretende diseñar el método de explotación a seguir.

CAPÍTULO IV. Los cálculos procesados en el capítulo anterior se presentan en tablas y ecuaciones, para luego la hipótesis ser contrastada, demostrándose que el nivel de aceptación de los datos es correcto al no rechazar la hipótesis nula.

CONCLUSIONES. Se concluye que el yacimiento es prometedor; las reservas existentes demostradas en las calicatas desarrolladas y la etapa de calcinación sugieren llevar adelante el proyecto.

El autor.

# INDICE

|                |  |
|----------------|--|
| DEDICATORIA    |  |
| RECONOCIMIENTO |  |
| RESUMEN        |  |
| ABSTRACT       |  |
| INTRODUCCIÓN   |  |
| INDICE         |  |

## CAPÍTULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

|      |   |   |
|------|---|---|
| 1.1. | Identificación y determinación del problema ..... | 1 |
| 1.2. | Delimitación de la investigación.....             | 2 |
|      | 1.2.1.Espacial.....                               | 2 |
|      | 1.2.2.Temporal.....                               | 2 |
| 1.3. | Formulación del problema .....                    | 2 |
|      | 1.3.1. Problema principal.....                    | 3 |
|      | 1.3.2.Problemas específicos.....                  | 3 |
| 1.4. | Formulación de objetivos.....                     | 3 |
|      | 1.4.1.Objetivo general.....                       | 3 |
|      | 1.4.2.Objetivos específicos.....                  | 3 |
| 1.5. | Justificación de la Investigación .....           | 4 |
| 1.6. | Limitaciones de la investigación.....             | 4 |

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1. | Antecedentes de estudio.....                    | 5  |
|      | 2.1.1.Antecedentes internacionales.....         | 5  |
|      | 2.1.2.Antecedentes nacionales.....              | 6  |
| 2.2. | Bases teóricas - científicas .....              | 7  |
|      | 2.2.1.Rocas calcáreas.....                      | 7  |
|      | 2.2.2.Características petrográficas.....        | 8  |
|      | 2.2.3. Tipos.....                               | 9  |
|      | 2.2.4. Otras rocas carbonatadas.....            | 12 |
|      | 2.2.5.Principales derivados de las calizas..... | 15 |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.6. Propiedades.....                                      | 16 |
| 2.2.7. Condiciones y ambientes de formación.....             | 18 |
| 2.2.8. Unidades geológicas favorables en el país.....        | 19 |
| 2.2.9. Canteras en el Perú.....                              | 20 |
| 2.3. Definición de términos básicos.....                     | 24 |
| 2.4. Formulación de hipótesis .....                          | 25 |
| 2.4.1. Hipótesis general.....                                | 25 |
| 2.4.2. Hipótesis específicas.....                            | 25 |
| 2.5. Identificación de variables .....                       | 25 |
| 2.5.1. Variables independientes.....                         | 25 |
| 2.5.2. Variable dependiente.....                             | 26 |
| 2.6. Definición operacional de variables e indicadores ..... | 26 |

### CAPÍTULO III

#### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Tipo de Investigación.....  | 27 |
| 3.1.1. Tipo de investigación.....  | 27 |
| 3.1.2. Nivel de investigación.....   | 27 |
| 3.2. Métodos de Investigación .....  | 27 |
| 3.3. Diseño de investigación .....   | 27 |
| 3.4. Población y muestra.....  | 28 |
| 3.4.1. Población.....  | 28 |
| 3.4.2. Muestra.....  | 28 |
| 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....                           | 29 |
| 3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....                             | 32 |
| 3.7. Tratamiento estadístico .....   | 32 |
| 3.8. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación...34 |    |
| 3.9. Orientación ética .....   | 34 |

### CAPÍTULO IV

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

|  |    |
|--|----|
| 4.1. Descripción del trabajo de campo.....                       | 36 |
| 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados ..... | 36 |
| 4.3. Prueba de hipótesis .....                                   | 54 |
| 4.4. Discusión de resultados .....                               | 55 |

CONCLUSIONES  
RECOMENDACIONES  
BIBLIOGRAFIA  
ANEXOS

## CAPÍTULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Identificación y determinación del problema

Durante décadas la evaluación de los yacimientos carbonatados ha sido una prioridad importante para los investigadores y especialmente por productores de petróleo y gas, pero los retos que plantean estas rocas tan heterogéneas son infinitos, desde la exploración inicial hasta las etapas más avanzadas de producción. Geocientíficos, petrofísicos e ingenieros trabajan en conjunto para obtener mayores datos posibles, para producir múltiples productos.

Las calizas son rocas sedimentarias, constituido por granos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y/o dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), cuyo tamaño de cristales varía entre 0 a 0.25 mm y cuya dureza media es 2.2 de la escala de Mohs, se encuentra en apreciable cantidad en el mundo.

Los carbonatos de calcio pueden emplearse directamente o calcinadas como cal viva ( $\text{CaO}$ ) y agregando agua, “lechada de cal” ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

La calcinación de la cal generalmente se efectúa cerca de las canteras.

La cal es el segundo insumo usado en la industria y tiene múltiples aplicaciones que dependen de su composición química, textura, color, dureza, gravedad específica, finura, etc.

El yacimiento de calizas ubicado a 10 Km. al este de la ciudad de Junín, recientemente ha sido concesionado por el estado peruano a la empresa Calquipa S.A.; conformado por 42 cuadrículas que abarca los distritos de Junín y San Pedro de Cajas, quienes tienen la firme intención de iniciar sus operaciones industriales.

La particularidad del yacimiento a investigar, se debe a su elevada concentración de calizas, resultado de su formación; en el pasado fue un fondo continental donde todos los animales marinos de caparazón micro y macroscópico murieron al descender las aguas, en el terciario y cuaternario y en su mayoría está compuesto de oolitos, peloides y pisolitos.

Estas cualidades determinan que las leyes químicas superan el 80% de CaO, por ello se hace importante el desarrollo de trabajos de investigación para diseñar el plan de explotación y calcinación.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

### **1.2.1. Espacial**

El desarrollo del presente trabajo se ejecutará en el escenario de la concesión Calquipa – Junín.

### **1.2.2. Temporal**

El trabajo de investigación comprende diez meses (marzo – diciembre del 2018).

## **1.3. Formulación del problema**

A nivel nacional la mayor producción de calizas se obtiene por extracción en canteras; por lo que requiere investigar el diseño de explotación y calcinación, a

fin de determinar cuáles son las variables que inciden. Para ello planteamos las siguientes interrogantes.

### **1.3.1. Problema principal**

¿Qué propiedades físicas de las calizas inciden en el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018?

### **1.3.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál será la granulometría adecuada de las calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018?
- ¿Cuál será el porcentaje mínimo de calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018?
- ¿Cuál será el tiempo y temperatura adecuada para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018?

## **1.4. Formulación de objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar las propiedades físicas de las calizas que inciden en el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Determinar la granulometría adecuada de las calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018
- Calcular el porcentaje mínimo de calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018.
- Determinar el tiempo y temperatura adecuada para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018

### **1.5. Justificación de la investigación**

Se justifica porque la minería es una actividad industrial que presenta elevados riesgos e incertidumbres y requiere grandes inversiones, por lo que todo proyecto minero debe evaluarse técnica y económicamente, cubriendo sucesiva e iterativamente las fases de prospección, exploración y enriquecimiento (investigación), ya que solo si sus resultados (evaluación de reservas, concentración y estudios de factibilidad) son positivos, se proyecta el desarrollo del mismo en sus etapas de explotación, beneficio, fundición, refinación y comercialización, para concluir al final de su vida útil con el cierre de la mina, implementando el diseño de explotación, acorde a las características geológico-mineras y minero-metalúrgicas del yacimiento a fin de garantizar el aprovechamiento total, racional y sustentable del recurso minero disponible, así como de los importantes montos de divisas que deben dirigirse a mejorar las condiciones de vida de la comunidad.

### **1.6. Limitaciones de la investigación**

El alcance de esta investigación, se limitará al yacimiento en mención y las pruebas experimentales realizadas corresponde a la muestra obtenida del mismo y a 4100 msnm.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de estudio

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

- Acevedo, Hernán (2005) en su tesis “*Factibilidad técnica y económica de la explotación de un yacimiento de Caliza en la Región Metropolitana*”, Universidad de Chile; tiene por objetivo demostrar la conveniencia o inconveniencia económica de asignar recursos escasos de inversión a la explotación de un yacimiento de caliza localizado en la Región Metropolitana, aplicando para ello las técnicas de preparación de proyectos.

**Concluye:** Los resultados obtenidos mediante el análisis por calcinación dejan de manifiesto que el contenido de  $\text{CaCO}_3$  en la caliza analizada se encuentra entre 94,3% y 96,3%.

Este rango de composición de  $\text{CaCO}_3$  comparado con el de otros Yacimientos de caliza, tales como: Pampa Tana (93-94%), ubicado en la I Región, Colina Larga (92-95%) ubicado en la II Región, La Perlita (90-94%) y Lo Valdés (90-95%) ubicados en la Región Metropolitana, permiten

inferir que las rocas de caliza de la Minera Doña Emilia pueden ser utilizadas a nivel industrial en la fabricación de cemento, cal y como fundente en procesos metalúrgicos y para enmienda de suelos.

- Cuenca, Edwin (2015) en la tesis “*Diseño de explotación de las calizas existentes en el yacimiento Isimanchi*”, Universidad Central del Ecuador, tiene como objetivo, Estructurar el Diseño de explotación de las calizas existentes en el yacimiento “Isimanchi”, adjudicado a la Empresa Pública Cementera del Ecuador, EPCE. Y **concluye:** Para el yacimiento de calizas Isimanchi, el sistema apropiado de explotación es a cielo abierto ya que se trata de un depósito calcáreo superficial del grupo canteras, que por su morfología corresponde al de tipo “ladera” el cual se caracteriza por tener un gran número de bancos donde el frente de excavación será en dirección descendente y abandono del talud final en bancos, esto es desde los bancos superiores hasta los de menor cota.

El potencial mineral asociado al yacimiento Isimanchi es de 67 000 000 ton de caliza, cuya explotación tiene una vida útil de 155 años con una producción de 1 800 ton/día y 432 000 ton caliza/año.

En base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio se tiene que las calizas Isimanchi presentan las siguientes propiedades físico-mecánicas: peso específico de 2,69 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la compresión de 515 kg/cm<sup>2</sup> resistencia a la tracción inversa de 10,43 g/cm<sup>3</sup>.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

- Silva, Ingrid (2015) en la tesis “*Estudio de factibilidad para la implementación de una planta de explotación de piedra caliza en el distrito*”

*de Callalli, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa -2015*”, tiene como objetivo Determinar la factibilidad técnica, económica y financiera para la implementación de una planta extractora de piedra caliza en el distrito de Callalli, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa. Y concluye: El estudio desarrollado, demuestra la viabilidad de instalar una planta de producción de cal viva, para satisfacer la demanda de los centros mineros de polimetálicos que operan en la actualidad en el sur del Perú.

• Castillo, Ángel (2016) en la tesis “Parámetros energéticos de un horno continuo para la producción de cal a partir de la capacidad de producción”, Universidad Nacional de Trujillo, tiene por objetivo; Determinar el efecto de la capacidad de producción de cal en los parámetros energéticos para el diseño de horno de tipo continuo. Concluye: Se determinó que la capacidad de producción de cal influye directamente en los parámetros energéticos para el diseño de un horno de tipo continuo. - Se determinó experimentalmente que se requiere 0,115 kg de carbón (combustible) para producir un kilogramo de CaO. - Se demostró que se requiere 7,5 m<sup>3</sup> de aire para la combustión de un kilogramo de carbón antracita, el cual tiene un promedio energético de 6800 kcal / kg. - Se calculó que el horno continuo de cal requiere 781180 kcal para producir una tonelada de de CaO. - Se determinó que la eficiencia térmica del horno de cal continuo es del 61,11%.

## **2.2. Bases teóricas - científicas**

### **2.2.1. Rocas calcáreas**

Díaz, Alejandra (2009), define a los carbonatos como sustancias formadas por dos o más elementos, en una proporción fija por peso. Contiene los

elementos de carbono (C) y oxígeno (O) en su forma de CO<sub>3</sub>, conteniendo un átomo de carbono y tres átomos de oxígeno. Según la clasificación elaborada por Struz, los carbonatos se dividen en anhidros, hidratados y con o sin aniones extraños. Las especies minerales forman dos grupos; en el primero están la calcita y dolomita y en el segundo el aragonito. Dentro de estos minerales la calcita y la dolomita son los más importantes por su abundancia y usos, ya que forman parte de muchas rocas y minerales.

Tabla 1. Composición química de la calcita y dolomita

| Mineral  | Fórmula                             | Componentes     | Porcentaje (%) |
|----------|-------------------------------------|-----------------|----------------|
| Calcita  | CaCO <sub>3</sub>                   | CaO             | 56,2           |
|          |                                     | CO <sub>2</sub> | 43,8           |
| Dolomita | CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | CaO             | 30,4           |
|          |                                     | MgO             | 21,7           |
|          |                                     | CO <sub>2</sub> | 47,9           |

Fuente: Betejtin, A., Curso de Mineralogía

Las principales rocas carbonatadas utilizadas por la industria son las calizas y dolomías. Las calizas son rocas sedimentarias compuestas principalmente por calcita (CaCO<sub>3</sub>) y las dolomías (MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). Otros carbonatos como el aragonito (CaCO<sub>3</sub>), la siderita (FeCO<sub>3</sub>), la ankerita (Ca<sub>2</sub>MgFe(CO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>) y la magnesita (MgCO<sub>3</sub>), son comúnmente asociados con calizas y dolomías, pero generalmente en menor cantidad.

### 2.2.2. Características petrográficas

La caliza es una roca que tiene origen químico y orgánico. Los carbonatos de origen químico se formaron por precipitación de disoluciones bicarbonatadas o carbonatadas con dióxido de carbono y agua. A este grupo pertenecen las pisolitas, calizas litográficas, calizas fibrosas y tobas calcáreas. Méndez (1995).

Los carbonatos de origen orgánico están formados por caparazones de animales acuáticos y las oolitas por pequeños granos esféricos que tienen por núcleo restos de conchas o granitos de arena.

Tabla 2. Composición química de la caliza

| Componentes                    | %      |
|--------------------------------|--------|
| CaCO <sub>3</sub>              | 97,8   |
| MgCO <sub>3</sub>              | 1,25   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,095  |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,56   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,23   |
| Ni                             | < 0,02 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | < 0,01 |
| SrO                            | 0,03   |
| MnO                            | < 0,01 |

Fuente: Betejtin, A., Curso de Mineralogía

### 2.2.3. Tipos

#### Calizas

Peltijohn clasifica a las rocas calizas como autóctonas y alóctonas. Las autóctonas se forman in situ por una acumulación de calizas orgánicas no transportadas y se puede subdividir a su vez en dos: bioermales si son de extensión restringida y bioestromales si son de carácter extendido. Las calizas alóctonas están constituidas por materiales formados en otros sitios y depositados en el lugar.

También existen dos clasificaciones; de Folk (1959) que denomina a los constituyentes esenciales de las calizas como aloquímicos y ortoquímicos y de Dumham (1962) que considera la textura depositacional sobre la base de

la presencia o ausencia de todo carbonatado y signos de ligadura o unión entre las estructuras orgánicas.

La utilización de las calizas está relacionada principalmente con el contenido de carbonato, especialmente de grado químico, como se muestra en la tabla siguiente. Tal definición de pureza química es relativamente simple y puede ser usada para ilustrar la distribución de la pureza de la caliza y permite los datos químicos de diferentes calizas.

Tabla 3. Clasificación porcentual de calizas

| Categoría       | CaCO <sub>3</sub> (%) |
|-----------------|-----------------------|
| Muy alta pureza | > 98,5                |
| Alta pureza     | 97,0 – 98,5           |
| Media pureza    | 93,5 – 97,0           |
| Baja pureza     | 85,0 – 93,5           |
| Impura          | < 85,0                |

Fuente: Mineralogy and Petrology Group, British Geological Survey

En la tabla siguiente presentamos los resultados de los análisis de algunas muestras de calizas del territorio peruano y es importante resaltar que contamos con materiales calcáreos de alta calidad que con un mayor tratamiento pueden sustituir la importación total del carbonato de calcio.

Tabla 4. Leyes de CaCO<sub>3</sub> y CaO en el Perú

| Cantera             | Región       | Provincia    | CaCO <sub>3</sub> + Yeso (%) | CaO (%) |
|---------------------|--------------|--------------|------------------------------|---------|
| Romacha             | Junín        | Jauja        | 99,98                        | 54,70   |
| Chacapalpa          | Junín        | Jauja        | 99,99                        | 54,63   |
| Nueva Nora<br>Sofía | Huancavelica | Huancavelica | 99,62                        | 54,50   |
| Pucapampa           | Huancavelica | Huancavelica | 99,79                        | 54,61   |
| Palloc              | Cajamarca    | Celendín     | 95,59                        | 53,41   |
| Otuzco              | Cajamarca    | Cajamarca    | 98,28                        | 52,27   |

Fuente: Compendio de Rocas y Minerales Industriales, 2009

Estos resultados revelan que en el Perú existen calizas de rango entre medio alto y alto, y por sus propiedades físicas, mineralógicas y químicas son muy utilizadas en los diversos sectores industriales de la economía, siendo sus principales derivados por su importancia comercial: la roca triturada, usada como agregado en la construcción o en la producción de cal, el cemento y el carbonato de calcio usado en distintas industrias.

### **Dolomía**

Cuando prevalece la dolomita se denomina dolomía, en donde la fracción carbonato contiene 90% o más de la dolomita, lo cual representa un poco más del 50% de la roca. En general las dolomitas presentan mejor uniformidad de granos que las calizas. Folk (1969).

Es una roca calcárea formada por mineral de dolomía (carbonato de calcio y magnesio). Esta roca se presenta estrechamente asociada a la caliza, pudiendo estar interestratificada e incluso puede pasar gradualmente a caliza. La mayor parte de estas rocas son calizas reemplazadas debido a la contaminación de aguas cargadas de sales magnesianas.

### **Margas**

Estas rocas son mezcladas semifriables de materiales arcillosos y carbonato de calcio, tienen de 35% a 65% de carbonato y un contenido complementario

de arcilla (normalmente 22%). Las margas son rocas intermedias entre calizas y arcillas; cuando contienen aproximadamente igual cantidad de ambas sustancias constituyen la materia prima para la fabricación del cemento portland.

### **Travertino**

El travertino proviene de rocas carbonatadas que son disueltas y redepositadas por las aguas. Normalmente estas rocas son translúcidas, con tonos blancos, grises o ligeramente amarillos.

El contenido de calcio en los travertinos permite utilizarlo en diferentes industrias, también se utiliza como roca ornamental.

## **2.2.4. Otras rocas carbonatadas**

### **Rocas carbonatadas detríticas**

Se originan por erosión y transporte de calizas anteriores. Son semejantes a los conglomerados, areniscas o arcillas, pero compuestas por clastos y cemento calcáreo. Las calizas oolíticas (son esféricas) están formadas por pequeñas concreciones de carbonato denominadas oolitos y están cementadas por el mismo carbonato. Cuando las concreciones son mayores (pisolitos) se denominan calizas pisolíticas. Entre las calizas litográficas, muy compactas. En ellas se han conservado impresiones de fósiles, como la del *Archaeopteryx lithographica*, primera ave fósil conocida. (Tomado y modificado de Mount, 1985)

### **Rocas carbonatadas químicas**

Se forman por precipitación del carbonato insoluble, al desprenderse el CO<sub>2</sub>, son los travertinos y las tobas calizas. Asimismo, la coquina que son

fragmentos calcáreos poco consolidados formado por caparzones de moluscos que están unidas por arena y carbonatos. Los caliches son costras calcáreas formadas sobre el suelo, en las regiones secas, cuando el agua asciende por capilaridad y precipita el carbonato en la superficie.

### **Rocas carbonatadas bioquímicas**

Se forman por precipitación del carbonato de calcio debido a la actividad de algas y bacterias. En conjunto son de relativa importancia los esqueletos u otras partes duras de diversos grupos de animales: moluscos, corales, esponjas, equinodermos, etc.

La creta es una variedad de caliza no consolidada, formada fundamentalmente por microorganismos.

### **Carbonatitas**

Las carbonatitas son rocas ígneas volcánicas del tipo ultrabásico que se producen por procesos químicos de concentración de carbonatos a temperaturas de 700 a 500°C a altas presiones.

Las rocas carbonatíticas, se relacionan con las kimberlitas y se conocen algunos centenares de ellas en diversos lugares del mundo. Algunos son cilíndricos, aunque de sección muy irregular, a manera de chimenea, con zoneamiento concéntrico muy bien desarrollado; otras son irregulares y no presentan ningún tipo de zoneamiento. Todas las carbonatitas están compuestas de carbonatos, entre los que predomina la calcita, la dolomita y la siderita, sin embargo, son de origen ígneo. La terminología de las carbonatitas es difícil y compleja, depende de su composición química y no solo del carbonato predominante, sino también de los elementos accesorios que contenga y de sus asociaciones.

Algunas carbonatitas son ricas en magnetita, apatito, otras en tierras raras, flúor y bario. También se les clasifica en alcalinas y ricas en hierro, circonio y magnesio. Se les divide en cuatro grupos principales:

- Complejos de diques anulares alcalinos.
- Complejos alcalinos no anulares.
- No asociados a rocas alcalinas.
- Corrientes y rocas piroclásticas.

Las carbonatitas son explotadas para la obtención de minerales metálicos y no metálicos, incluyendo a las valiosas tierras raras, niobio, tantalio, circonio, apatito, hafnio, hierro, titanio, vanadio, uranio, torio, vermiculita y barita. En algunas ocasiones las concentraciones de cobre encontradas en las carbonatitas son gigantescas, considerándose casi como pórfidos cupríferos; algunas carbonatitas se asocian a sienitas y rocas alcalinas. Las más jóvenes se relacionan a rifts en el interior de zonas cratónicas, lo que sugiere procesos corticales profundos o del manto superior.

### **Clasificación de las rocas carbonatadas según su uso**

Tomando como base la composición química, las rocas de carbonatos pueden dividirse en cinco grupos principales:

- Caliza con alto calcio; que puede portar sobre el 95% de  $\text{CaCO}_3$  y es adecuada para la producción de cal.
- Roca calcárea. Existen cinco tipos diferentes (I a V) de cemento portland. El ingrediente alúmina se puede ajustar mediante la adición de arcilla; y si el contenido de carbonato de calcio es bastante bajo se puede agregar algo de caliza con alto calcio.

- Dolomita para fundente. La selección de dolomías para su uso como fundente metalúrgico deberá ser muy cuidadosa y tomar en cuenta que las impurezas críticas perjudiciales son sílice, azufre y fósforo, para las cuales las tolerancias son bastantes bajas.
- Roca calcárea para concreto, agregado, roca dimensionada y propósitos químicos diversos. Aun cuando los requerimientos para agregados y piedra dimensionada son más de orden físico que químico, es importante considerar la ausencia de nódulos de chert y de pirita.
- Roca calcárea para empedrado metálico (*road metal*), balasto de línea de ferrocarril y uso general. Las especificaciones para tales rocas son más de orden físico que químico.

### **2.2.5. Principales derivados de las calizas**

El principal derivado de la caliza es la cal, que es el producto que se obtiene calcinando la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio.

#### **Cal**

La cal es un producto que se obtiene calcinando las calizas por debajo de 903°C, descomponiéndose en  $\text{CaO} + \text{CO}_2$ . Denominándose cal viva y si se añade agua se convierte en hidróxido de calcio, llamándose cal apagada. En base a los pesos atómicos, 100 kilos de caliza pura producen 56 kilos de cal viva. En el mercado se comercializan mayormente 3 tipos de cal.

#### **Cal viva**

Material obtenido de la calcinación de la caliza que al desprender anhídrido carbónico se transforma en óxido de calcio. La cal viva debe ser capaz de

combinarse con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido y una vez apagada (hidratada) se aplique en la construcción, principalmente en la elaboración del mortero de albañilería.

### **Cal apagada**

Se conoce con el nombre comercial de la cal hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, la cual es una base fuerte formada por el metal calcio unido a dos grupos hidróxidos. El óxido de calcio al combinarse con el agua se transforma en hidróxido de calcio.

### **Cal hidráulica**

Cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio, sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua.

### **Cal hidratada**

Es el hidróxido de calcio, resultado de la adición de agua a denominada la cal viva.

### **Carbonato cálcico**

El carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$  es muy abundante en la naturaleza. Aparece en forma de roca caliza, fácilmente erosionable por la acción del viento y la lluvia. El carbonato de calcio puro existe como calcita (trigonal) y aragonito (rómico) que son formas prácticamente puras. Este compuesto tiene numerosas aplicaciones en la industria.

## **2.2.6. Propiedades**

Entre las principales propiedades se cuentan:

### **Color**

La coloración de las calizas ricas en calcio y de las calizas dolomíticas es blanco cuando son puras, pero cambia de color entre el gris y el negro a consecuencia de las impurezas carbonosas que contienen. Así, el óxido férrico le da un color amarillento, rojo, pardo; los sulfuros tales como la pirita, la marcasita y la siderita alteran el color superficial de la roca al oxidarse bajo la influencia de los agentes atmosféricos, dando un color rojizo.

### **Resistencia**

La resistencia de la caliza es una propiedad importante a la compresión, al aplastamiento que oscila entre 98,4 y 583,5 Kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a la tracción no es tan importante y es más difícil de determinar, su variación es de 26 a 63 kg/cm<sup>2</sup>.

### **Densidad**

La densidad bruta de la caliza es el peso de un decímetro cúbico, que varía según el contenido de humedad, la textura y la porosidad de la roca.

La caliza comercial secada al aire en condiciones ordinarias tiene una densidad de 1,922 kg/dm<sup>3</sup>. En condiciones de humedad, la densidad bruta puede ser de 2,242 kg/dm<sup>3</sup>.

La densidad real prescindiendo de los poros llenos de aire oscila entre 2,2 y 2,9 kg/dm<sup>3</sup>. La caliza rica en calcio tiene una densidad de 2,65 a 2,75 kg/dm<sup>3</sup>, y las calizas dolomíticas de 2,8 a 2,9 kg/dm<sup>3</sup>.

Otras características son:

Absorción de agua: 2 a 8% en peso.

Desgaste al rozamiento: 30 a 40 cm<sup>3</sup> y al chorro de arena de 7 a 10 cm<sup>3</sup>.

### **2.2.7. Condiciones y ambientes de formación**

Las calizas son rocas originarias por un proceso de sedimentación directa. Esta sedimentación puede tener diversos orígenes, si bien la más común es la denominada precipitación bioquímica. El carbonato cálcico se fija (en general, en forma de aragonito) en las conchas o esqueletos de determinados organismos, ya sean microscópicos (foraminíferos) o macroscópicos (lamelibranquios, braquiópodos, gasterópodos) y a su muerte, estas conchas o esqueletos se acumulan, originando un sedimento carbonatado.

El aragonito, inestable en condiciones atmosféricas, se va transformando en calcita y la disolución parcial y reprecipitación del carbonato cementa la roca, dando origen a las calizas. Otra forma de depósito es la fijación del carbonato sobre elementos extraños, como granos de cuarzo o pequeños fragmentos de fósiles, dando origen a los oolitos (calizas oolíticas). También las algas fijan este compuesto, dando origen a mallas de algas o estromatolitos, si se fragmentan y ruedan originan los pisolitos (calizas pisolíticas). Todas estas posibilidades dan origen a los diversos tipos de calizas. Dunham (1962).

Folk y Dunham afirman que las grandes formaciones de caliza están relacionadas principalmente a depósitos de costa mixta y plataforma y a arrecifes.

#### **Costas mixtas**

Se definen las costas mixtas como aquellas donde la sedimentación de carbonatos ocurre tan cerca de tierra firme que contribuyen no solo en las facies del mar abierto, sino a los depósitos costeros de plataforma: costas de carbonatos y depósitos. Existen muchas áreas en el mundo recubiertas por secuencias de calizas relativamente finas (en general menos de 600 m) de

miles de kilómetros cuadrados, con una gran estratigrafía fácilmente correlacionable en forma de capas sucesivas parecidas a un pastel. La paleontología indica que estos depósitos se formaron en condiciones marinas abiertas de poca profundidad, en extensas plataformas de muy suave pendiente (Selley, 1976).

### **Arrecifes**

Son estructuras geológicas de origen biológico, sólidas, masivas y con formas variadas, que cubren la matriz rocosa de algunos fondos marinos tropicales y subtropicales. Estos son creados por organismos fijados al fondo que forman esqueletos pétreos de carbonato de calcio (principalmente corales pétreos). La mayoría de los arrecifes crecen en aguas poco profundas de mares tropicales, su crecimiento óptimo se lleva a cabo en aguas de menos de 50 m. Los sedimentos de la laguna están compuestos por pellets, arenas de foraminíferos y lodos calcáreos finos. Los arrecifes están compuestos por el armazón calcáreo resistente, formado por esqueletos orgánicos, la parte superior es plana. Dicho armazón puede ser muy poroso, con porosidades registradas hasta el 50%. Los geólogos denominan arrecife a las lentículas formadas por los esqueletos calcáreos de organismos.

#### **2.2.8. Unidades geológicas favorables en el país**

El territorio peruano cuenta con varios grupos y formaciones geológicas constituidas por calizas. Estas rocas se explotan por medio de canteras, la mayoría de ellas trabajadas artesanalmente, también existen canteras mecanizadas que pertenecen generalmente a las empresas cementeras.

Tabla 5. Génesis de las calizas

| Origen       |               | Tipo de caliza     |                        |                 |
|--------------|---------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| Magmático    | Autoctono     | Precipitado        | Carbonatita            |                 |
|              | (No           | químicamente       | Calcita (en parte)     |                 |
| Sedimentario | Redepositado) |                    | Caliza espeleotemática |                 |
|              |               |                    | Travertino             |                 |
|              |               |                    | Calcita                |                 |
|              |               |                    | Calcrete               |                 |
|              |               |                    | Calcilutita            |                 |
|              |               | Biogenico          | Caliza coralina        |                 |
|              |               |                    | Caliza de arrecife     |                 |
|              |               |                    | Caliza foraminífera    |                 |
|              |               |                    | Creta                  |                 |
|              |               |                    | Caliza de algas        |                 |
|              |               |                    | Caliza fosilífera      |                 |
|              |               |                    | Calcilutita            |                 |
|              |               |                    | Creta lacustre         |                 |
|              |               | Aloctono           | (Distinción entre      | Arena calcárea  |
|              |               | (Redepositado)     | Origen por             | Caliza oolítica |
|              |               |                    | Precipitación y        | Calcirudita     |
|              |               | Biogénico difícil) | Conglomerado de caliza |                 |
|              |               |                    | Brecha de caliza       |                 |
|              |               |                    | Lumaquelas             |                 |

Mármol

Fuente: Lorenz, W. & Gwosdz, W. (2004), Manual para la evaluación geológica – técnica de minerales de construcción

### 2.2.9. Canteras en el Perú

Las calizas son las más abundantes entre todas las rocas carbonatadas y los yacimientos de la costa son las más accesibles.

Tabla 6. Canteras de rocas calcáreas en el Perú

| Región       | N°<br>Canteras | Región       | N°<br>Canteras |
|--------------|----------------|--------------|----------------|
| Ancash       | 49             | La libertad  | 26             |
| Apurímac     | 5              | Lambayeque   | 7              |
| Arequipa     | 25             | Lima         | 32             |
| Ayacucho     | 2              | Moquegua     | 9              |
| Cajamarca    | 25             | Pasco        | 7              |
| Cusco        | 8              | Piura        | 4              |
| Huancavelica | 12             | Puno         | 10             |
| Huánuco      | 2              | San Martín   | 1              |
| Ica          | 33             | Tacna        | 7              |
| Junín        | 73             | <b>Total</b> | <b>337</b>     |

Fuente: Díaz, A. INGEMMET (1999 – 2005)

### **Explotación por canteras**

La explotación por canteras se diseña a tajo abierto, por varios motivos; reducción de los costos de producción, deposición de material calcáreo, la selección del programa de extracción de mena y ganga y por la decisión técnica del modelo de explotación a seguir.

- **Caracterización del yacimiento**

Según SME (1992), la caracterización de recursos se define como “la determinación de la forma, tamaño, calidad, cantidad y variabilidad de la entidad geológica e, igualmente importante, determinar los límites de las características geológicas variables”.

La caracterización del yacimiento es importante porque servirá de soporte para estudios definitivos de exploración, diseño y explotación de la cantera.

Para caracterizar un yacimiento es necesario disponer de ciertos datos, como los siguientes:

- ✓ Datos de contacto superficial y tipología de elementos litológicos.

- ✓ Datos estructurales tomados en superficie (fracturas, diaclasas, fallas)
- ✓ Perforaciones exploratorias en la zona y sus respectivos análisis de testigos.
- ✓ Datos sobre nivel freático de la zona.
- ✓ Topografía actualizada de la zona.
- ✓ Caracterización química de las perforaciones y muestras de campo.

De todo lo enunciado, lo más importante son las perforaciones exploratorias, porque proporcionan datos directos del subsuelo, que analizados por geólogos expertos otorgan confiabilidad del yacimiento, aunque son costosos.

El modelo geológico final del yacimiento tiene como objetivo fundamental proporcionar una imagen geológica tridimensional de numerosas características del yacimiento. Los planos y secciones usados para desarrollar el modelo forman “toda la base para la estimación de recursos en los esquemas de cálculo de reserva convencionales” (SME, 1992).

- **Cubicación de reservas**

La cubicación de reservas es una actividad fundamental para cualquier proyecto minero. Permite la búsqueda y apalancamiento de flujos de inversión de acuerdo al volumen de reservas cubicadas. Sin embargo, se debe tener un alto grado de exactitud y conocimiento de la cantidad de mineral a ser extraído y determinar el grado de beneficio a ser alcanzado con el proyecto.

El cálculo de reservas es la evaluación cuantitativa y cualitativa del mineral que puede ser extraído con beneficio y legalmente del depósito mineral durante la explotación minera. Según el SME (1977), la estimación o cálculo de reservas involucra “no sólo la evaluación del tonelaje del depósito, también se considera los aspectos técnicos y legales para la minería del depósito, beneficio mineral y venta del producto”.

El cálculo de reservas extraíbles depende de los aspectos legales y técnicos actuales y futuros. Es por esto que los proyectos mineros tienen altos niveles de riesgo. Por ejemplo, un proyecto minero se puede iniciar actualmente bajo un determinado marco legal nacional; sin embargo, este marco legal puede variar a futuro, a medio o largo plazo, afectando negativamente la cantidad de reservas extraíbles o las condiciones operativas del proyecto.

Lo mismo sucede con el aspecto tecnológico. Actualmente se están desarrollando proyectos en minas que hasta hace unos años se consideraban poco rentables por las dificultades técnicas que representaban. En el presente, los avances tecnológicos en equipos, sistemas y procesos han logrado mejorar la productividad y rentabilidad de los proyectos mineros.

### **Métodos de cubicación de reservas**

Para cubicar las reservas de un yacimiento se requiere de ciertas características físicas inferidas del depósito mineral a partir de la colección de datos, análisis de datos y modelo geológico. Algunos de los elementos relevantes para la evaluación del yacimiento (SME, 1977) son:

- El tamaño, forma y continuidad de las zonas del yacimiento.
- Distribución de frecuencia de mineralización similar (zonas de mineralización continua vertical u horizontal).
- La variación espacial de mineralización (desarrollo de modelos de bloques con mineralización específica).
- Elementos estructurales y geológicos como fallas, morfología del yacimiento, contactos, entre otros.

### 2.3. Definición de términos básicos

**Caliza dolomítica:** Roca formada por carbonato de calcio y carbonato de magnesio  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$  en la que el carbonato de magnesio está presente en una cantidad mayor un 5% en peso.

**Estructura cristalina:** Disposición de los átomos y grupos de una molécula en estado sólido de la materia.

**Gradiente:** Grado de variación de una magnitud, por ejemplo, temperatura, presión, altura, concentración, etc.

**Gravedad específica:** Número que expresa la relación entre el peso de una substancia y el de un volumen igual de otra (generalmente el agua) que sirvió como un tipo de comparación.

**Interacción:** Influencia recíproca, por ejemplo, dos moléculas en una reacción química.

**Ortorrómico:** Sistema cristalino que posee tres ejes desiguales en longitud que se cortan en el ángulo recto.

**Polimorfos:** Propiedad de algunas sustancias de cristalizar en más de una forma cristalina, como por ejemplo el carbonato de calcio.

## **2.4. Formulación de hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Las variables que intervienen en la calcinación de calizas influyen en el diseño de la planta en la concesión Calquipa – Junín – 2018

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- La granulometría adecuada de las calizas influye en el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018
- El grado de concentración mínima de calizas influye en el diseño planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018
- El tiempo y temperatura adecuada influye en el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018

## **2.5. Identificación de variables**

### **2.5.1. Variables independientes**

- a. Granulometría de partícula
- b. Temperatura de calcinación
- c. Tiempo de residencia

### 2.5.2. Variable dependiente

a. Obtención de CaO

### 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

| VARIABLE  | DEFINICIÓN CONCEPTUAL   | DEFINICIÓN OPERACIONAL  | DIMENSIONES                     | INDICADORES        |
|---|---|---|---------------------------------|--------------------|
| <b>Variable independiente</b><br><br>Evaluación de calizas            | Las calizas son rocas sedimentarias, compuestas básicamente por carbonato de calcio y con algunas impregnaciones de otros elementos   | Para la industrialización de las calizas, se requiere saber las propiedades físico químicas; esto permitirán la descomposición química en óxido de calcio y dióxido de carbono, ambos útiles. | Granulometría CaCO <sub>3</sub> | Diámetro medio (μ) |
|   |   |   | Tiempo de residencia            | Horas (Hr)         |
|   |   |   | Temperatura de calcinación      | °C                 |
| VARIABLE  | DEFINICIÓN CONCEPTUAL   | DEFINICIÓN OPERACIONAL  | DIMENSIONES                     | INDICADORES        |
| <b>Variable Dependiente</b><br><br>Diseño de la planta de calcinación | Las calizas, son utilizados para infinidad de actividades tanto industriales, agrícolas, ganaderas, humanas entre otras y para eso requiere diseñar el proceso productivo y la posterior construcción de la planta. | Entendiendo el comportamiento de las variables que se controla en la descomposición de las calizas, se diseña la planta y elige los materiales adecuados para construirlos.                   | Óxido de calcio                 | %                  |

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de Investigación**

##### **3.1.1. Tipo de investigación**

- Según su finalidad, es del tipo aplicada.
- Por la fuente de datos es de campo.
- Según su naturaleza de la investigación es cuantitativa.

##### **3.1.2. Nivel de investigación**

Según Caballero y Romero (2009:83 al 85), el nivel de investigación desarrollado es experimental

#### **3.2. Métodos de investigación**

El método de investigación desarrollado es analítico – sintético según Hernández et al (2015).

#### **3.3. Diseño de Investigación**

El diseño de investigación desarrollado es EXPERIMENTAL, Hernández et al (2015).

### 3.4. Población y muestra

#### 3.4.1. Población

Área a explotar inicialmente es una cuadrícula (100 hectáreas); se observa que las calizas se encuentran depositadas en forma de estratos superpuestos con una altitud variable.

#### 3.4.2. Muestra

Para la obtención de la muestra representativa se realizó calicatas bajo el método de muestreo aleatorio simple, determinándose el tamaño de la muestra por la siguiente fórmula:

$$n = \frac{Z^2(P)(Q)N}{E^2 * (N - 1) + (Z)^2 * (P)(Q)}$$

$$n = \frac{1,65^2 * (0,50)(0,50)(200)}{0,1^2 * (N - 1) + (1,65)^2 * (0,50)(0,50)}$$

$$n = 50,971 \text{ muestras} = 50$$

n = Número de elementos de la muestra

N = Número de elementos de la población = 200

P = Probabilidad que M<sub>1</sub> sea = 0.50

Q = Probabilidad que M<sub>2</sub> sea = 0.50

Z<sup>2</sup> = Valor crítico correspondiente al nivel de confianza elegido.

Z = 1.65 al 90% de nivel de confianza.

E = Margen de error al 10% = 0.1

Se eligió 50 puntos, donde se extrajo la muestra representativa realizando la excavación con una perforadora manual hasta un metro de profundidad.

Con la muestra obtenida se realizó un composito, para después de sucesivas etapas de cono y cuarteado se obtuvo la muestra representativa de 100 kg con los cuales se realizó las pruebas experimentales de laboratorio.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la recolección de datos se realizó las pruebas experimentales del modo siguiente:

- a. Colocar las muestras de caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) en crisoles dentro de un horno mufla en sus diferentes granulometrías (1; 1.5; 2 y 3 pulgadas).
- b. Para calcinar las calizas ( $\text{CaCO}_3$ ), aumentar en forma manual la temperatura del horno mufla hasta  $500^\circ\text{C}$  (temperatura de precalentamiento) en un tiempo de 20 minutos con el fin de absorber la humedad de la caliza.
- c. Una vez pasado el tiempo de 20 min aumentar la temperatura del horno mufla manualmente hasta  $850^\circ\text{C}$ . Esperar el tiempo transcurrido de  $500^\circ\text{C}$  hasta  $950^\circ\text{C}$
- d. Controlar tiempos de calcinación fijados los cuales son de 4, 6, 8 y 10 horas.
- e. Retirar las calizas calcinadas a 4, 6, 8 y 10 horas con sus respectivas granulometrías (1; 1.5; 2 y 3 pulgadas).
- f. Disminuir manualmente la temperatura a  $500^\circ\text{C}$  del horno mufla (temperatura de enfriamiento). Para realizar la siguiente prueba.
- g. Para la temperatura de calcinación a  $950^\circ\text{C}$  seguir los pasos 1, 2, 3, 4, 5 y 6.
- h. Rotular las muestras y mantener en un lugar hermético para sus análisis posteriores.
- i. Tener presente la hoja de seguridad cuando se presente algún incidente.
- j. Terminada la calcinación se pasa al siguiente ítem que se especifica como preparación de muestra (del producto obtenido).

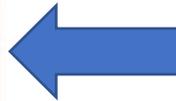
Calizas



Horno de mufla



CaO obtenido



Las pruebas desarrolladas fueron los siguientes:

Tabla 7. Ensayos a experimentar

| N° ensayos | granulometria<br>(Pulgadas) | Tiempo<br>(Horas) | T° calcinación<br>(°C) |
|------------|-----------------------------|-------------------|------------------------|
| 1          | 1                           | 4                 | 850                    |
| 2          | 1.5                         | 6                 |                        |
| 3          | 2                           | 8                 |                        |
| 4          | 3                           | 10                |                        |
| 5          | 1                           | 4                 |                        |
| 6          | 1.5                         | 6                 |                        |
| 7          | 2                           | 8                 |                        |
| 8          | 3                           | 10                |                        |
| 9          | 1                           | 4                 |                        |
| 10         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 11         | 2                           | 8                 |                        |
| 12         | 3                           | 10                |                        |
| 13         | 1                           | 4                 |                        |
| 14         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 15         | 2                           | 8                 |                        |
| 16         | 3                           | 10                |                        |
| 17         | 1                           | 4                 | 950                    |
| 18         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 19         | 2                           | 8                 |                        |
| 20         | 3                           | 10                |                        |
| 21         | 1                           | 4                 |                        |
| 22         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 23         | 2                           | 8                 |                        |
| 24         | 3                           | 10                |                        |
| 25         | 1                           | 4                 |                        |
| 26         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 27         | 2                           | 8                 |                        |
| 28         | 3                           | 10                |                        |
| 29         | 1                           | 4                 |                        |
| 30         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 31         | 2                           | 8                 |                        |
| 32         | 3                           | 10                |                        |

La medición de los datos se obtuvo de acuerdo a la técnica desarrollada para cada variable investigada y se describe en la siguiente tabla:

Tabla 8. Técnicas e instrumentos de medición de cada variable

| Variable independiente | Unid. Medida | Técnicas    | Instrumentos |
|------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Granulometría          | Pulg         | Cubicación  | Mallas       |
| CaCO <sub>3</sub>      | %            | Anal. Quím. | Varios       |
| Temperatura            | °C           | Pirometría  | Pirómetro    |
| Tiempo                 | Hr           | Horómetro   | Cronómetro   |

| Variable dependiente | Unid. Medida | Técnicas    | Instrumentos |
|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| CaO                  | %            | Anal. Quím. | Varios       |

### 3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- Después de realizar las pruebas de calcinación, las muestras de CaO, fueron analizadas por el método ASTM C25-96 (Standard Terminology Relating to Lime and Limestone).
- Para el procesamiento de datos se utilizó el software SPSS y la hoja de cálculo Excel.

### 3.7. Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico se desarrolló del siguiente modo:

- Resultado promedio del CaCO<sub>3</sub> obtenido: 92,52 %
- Cálculo de la media muestral de CaCO<sub>3</sub> para ser calcinada.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$\bar{X} = 1,45 \text{ gr}$$

- Cálculo de la varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

| Unidad | $X_i$ | $(X_i - \bar{X})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ |
|--------|-------|-------------------|---------------------|
| 1      | 1.43  | -0.02             | 0.00026136          |
| 2      | 1.05  | -0.40             | 0.15694803          |
| 3      | 1.16  | -0.29             | 0.08189136          |
| 4      | 1.47  | 0.02              | 0.00056803          |
| 5      | 1.12  | -0.33             | 0.10638469          |
| 6      | 1.13  | -0.32             | 0.09996136          |
| 7      | 1.91  | 0.46              | 0.21514136          |
| 8      | 1.65  | 0.20              | 0.04154803          |
| 9      | 1.66  | 0.21              | 0.04572469          |
| 10     | 1.73  | 0.28              | 0.08056136          |
| 11     | 1.87  | 0.42              | 0.17963469          |
| 12     | 1.15  | -0.30             | 0.08771469          |
| TOTAL  | 17.33 | -0.02             | 1.09633967          |

$$\sigma^2 = 0,09136164$$

- Cálculo de la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = 0,30226088$$

- Cálculo de la media poblacional

Siendo  $\bar{X}$  es la media de la muestra aleatoria de tamaño  $n$  obtenida de una población normal con varianza poblacional  $\sigma^2$ , entonces:

$$\left[ \bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

El intervalo de confianza es  $(1 - \alpha)$  100% para la media poblacional  $\mu$ .

En este caso la distribución de probabilidad normal es el soporte para realizar la inferencia mediante la estimación por intervalo de confianza.

Sus límites son:

$$\text{Límite inferior} : \bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{Límite superior} : \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Reemplazando en la ecuación se tiene:

Datos:

$$\bar{X} = 1,45$$

$$Z_{\alpha} = 1,96 \text{ (95\% de confianza)}$$

$$\sigma = 0,30226088$$

$$\sqrt{n} = 3,46410162$$

$$\text{Límite inferior: } \bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 1,45 - 1,96 * \frac{0,30226088}{3,46410162} = \mathbf{0,76868265}$$

$$\text{Límite superior: } \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 1,45 + 1,96 * \frac{0,30226088}{3,46410162} = \mathbf{2,13131735}$$

Con un 95% de confianza, la calificación promedio para todas las muestras obtenidas de cada calicata, toma valores entre 0,76868265 y 2,13131735 gramos de CaCO<sub>3</sub>.

### **3.8. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación**

En cuanto a la validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación, han sido validados con los estándares desarrollados dentro de los laboratorios de la empresa, que regularmente aplica para sus actividades rutinarias de flotación.

### **3.9. Orientación ética**

La aprobación o la desaprobación se basa en la aceptabilidad ética de la investigación, incluyendo su valor tecnológico y su validez científica, un índice aceptable de beneficios potenciales frente a los riesgos de daño, la minimización de los riesgos, los procedimientos adecuados de consentimiento informado (incluyendo la adecuación cultural y los mecanismos para garantizar la investigación), los procedimientos para la selección de las variables, y la consideración de la repercusión de la investigación sobre la rentabilidad y

economía de la empresa de donde procede el mineral, tanto durante la investigación como después de que esta finalice. La revisión tiene en cuenta la revisión científica previa y las leyes aplicables.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

El trabajo de campo realizado permitió acopiar las muestras, siguiendo la técnica de redes o mallas de 20 metros de sección cuadrada y en cada punto excavaciones de sección cuadrada de 1,00 m x 1,00 m y profundidad que varía entre 1,50 a 2,00 metros.

Obtenido el material de cada calicata o trinchera, se procedió a realizar la homogenización de la muestra para obtener una muestra de aproximadamente 1,5 toneladas

#### **4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados**

- **Variables evaluadas**

- ✓ Granulometría de calizas

Es muy importante en la etapa de calcinación de las calizas, con granulometrías muy grandes, la temperatura no llega a calcinar hasta el núcleo de la piedra caliza lo cual generan crudos, las granulometrías

pequeñas se recalcinan es decir hay presencia de CaO quemado; es muy importante controlar esta variable para evitar estos defectos mencionados.

Los valores de la granulometría de la caliza se tomaron teniendo en cuenta datos reportados en la mayoría de los casos consultados, las cuales, por lo general se encuentran en un intervalo de 1 – 3 pulgadas.

✓ Concentración de  $\text{CaCO}_3$

En la obtención de cal viva se utilizan piedras calizas con un porcentaje de concentración de  $\text{CaCO}_3$  mayores al 92%, ya que la investigación está sujeta a evaluar la influencia de las variables de la calcinación para mejorar el rendimiento en la obtención de cal viva.

Los valores de la concentración de carbonato de calcio preferentemente serán de 92 % y 94 %.

✓ Tiempo de residencia

El tiempo es un factor importante en la calcinación de la caliza, siendo recomendable determinarlo para asegurar una calcinación uniforme (tanto en la superficie como en el interior de la caliza). Teniendo esto presente, nos centraremos en el tiempo de residencia en el horno de mufla.

Hay un tiempo de referencia en el cual se trabaja a nivel industrial dependiendo del tipo de horno que se maneja; pero siendo muy extenso se optó lo que corresponde a nivel de laboratorio los cuales son 4, 6, 8 y 10 horas.

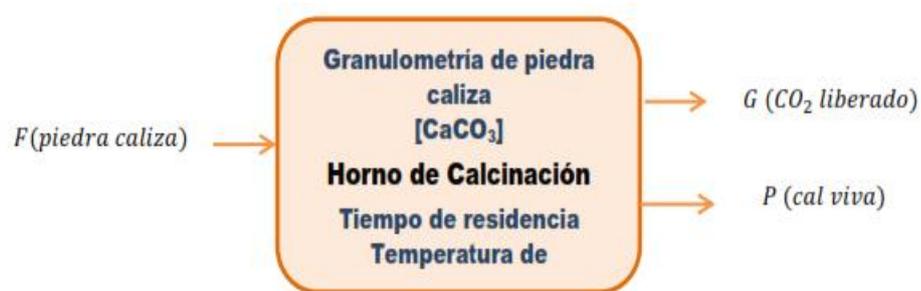
✓ Temperatura de calcinación

En la calcinación de calizas, el control de la temperatura favorecerá un mejor rendimiento en la obtención de óxido de calcio (cal viva).

Con el empleo de temperaturas bajas, la calcinación es lenta lo que puede ocasionar crudos en la cal, las altas temperaturas pueden ocasionar óxido de calcio quemado dependiendo del tiempo de residencia en el horno.

La temperatura de calcinación se tomó teniendo en cuenta datos reportados en la mayoría de los casos consultados, las cuales, por lo general se encontraban en un intervalo de 850 - 950 °C y a este nivel del mar.

- **Balance de masa**



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Balance general

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{PRODUCCIÓN}$$

$$F (\text{piedra caliza}) - G(\text{CO}_2 \text{ liberado}) = P (\text{cal viva})$$

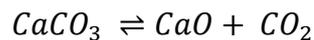


Tabla 9 Datos para el cálculo del balance general

| CALIZAS                     |         |           |
|-----------------------------|---------|-----------|
| Alimentación (F)            | 100 Kg  |           |
| Componentes                 | %       | masa (Kg) |
| Pureza (CaCO <sub>3</sub> ) | 94      | 94        |
| Impurezas                   | 6       | 6         |
| CAL VIVA (P)                |         |           |
| CaO                         | 81,87 % |           |
| PPC                         | 3,00 %  |           |

a) Cálculo de Cao y CO<sub>2</sub> total en la caliza por estequiometría:

Peso molecular del CO<sub>2</sub>: 44 gr.

Peso molecular del  $\text{CaCO}_3$ : 100 gr.

Peso molecular de  $\text{CaO}$ : 56 gr.

$$94 \text{ kg} * \frac{56}{100} = 52,64 \text{ kg CaO total}$$

$$94 \text{ kg} * \frac{44}{100} = 41,36 \text{ kg CO}_2 \text{ total}$$

b) Cálculo de masa de  $\text{CaO}$

$$P(\text{CaO}) = \text{CaO}_{\text{total}} + \text{CO}_2 + \text{Impurezas}$$

$$P(\text{CaO}) = 52,64 \text{ kg} + 3\% * (P \text{ CaO}) + 6 \text{ Kg}$$

$$P(\text{CaO}) = 60,22 \text{ kg}$$

c) Cálculo de masa de  $\text{CO}_2$  liberado en la calcinación:

$$F(\text{CaCO}_3) = P(\text{CaO}) + G(\text{CO}_2 \text{ liberado})$$

$$100 \text{ kg} = 52,64 \text{ kg} + G(\text{CO}_2 \text{ liberado})$$

$$G(\text{CO}_2 \text{ liberado}) = 47,36 \text{ kg}$$

✓ Balance de masa por componentes

a) Cálculo de masa de  $\text{CO}_2$  en  $\text{CaO}$ :

$$\text{CO}_2 = 3\% * 52,64 \text{ kg}$$

$$\text{CO}_2 = 1,58 \text{ kg}$$

b) Cálculo de masa y porcentaje de  $\text{CaO}$  crudo en cal viva:

$$\text{CaO}_{\text{crudo}} = 1,58 \text{ kg} * \left(\frac{56}{44}\right)$$

$$\text{CaO}_{\text{crudo}} = 2,01 \text{ kg}$$

$$\text{CaO}_{\text{crudo}} = 2,01 \text{ kg} * \left(\frac{100\%}{52,64 \text{ kg}}\right)$$

$$CaO_{crudo} = 3,82 \%$$

c) Cálculo del peso de CaO disponible:

$$CaO_{disponible} = 52,64 \text{ kg} * \left( \frac{81,87 \%}{100 \%} \right)$$

$$CaO_{disponible} = 43,09 \text{ kg}$$

d) Cálculo de masa y porcentaje de CaO requerido:

$$P(CaO) = CaO_{disponible} + CaO_{crudo} + CaO_{requemado} + CO_2 \text{ cal viva} + impurezas$$

$$60,22 \text{ kg} = 43,09 \text{ kg} + 2,01 \text{ kg} + CaO_{requemado} + 1,58 \text{ kg} + 6 \text{ kg}$$

$$CaO_{requemado} = 7,54 \text{ kg}$$

$$CaO_{requemado} = 7,54 \text{ kg} * \left( \frac{100}{60,22 \text{ kg}} \right)$$

$$CaO_{requemado} = 12,52 \%$$

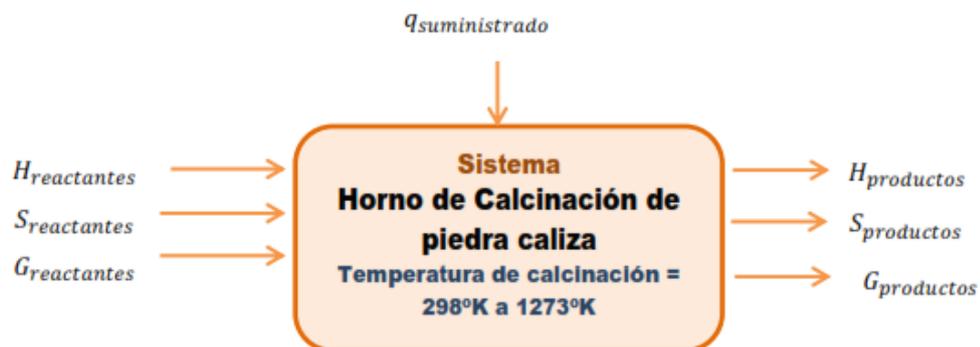
e) Cálculo del porcentaje de impurezas:

$$Impurezas = 6 * \left( \frac{100}{60,22 \text{ kg}} \right)$$

$$Impurezas = 9,96 \%$$

- **Balance de energía**

En el gráfico siguiente se observa el sistema del balance de energía en la calcinación de las calizas



Fuente: Elaboración propia



$$q_{\text{suministrado}} = (H_{\text{productos}} - H_{\text{reactantes}}) + (S_{\text{productos}} - S_{\text{reactantes}}) + (G_{\text{productos}} - G_{\text{reactantes}})$$

$$q_{\text{suministrado}} = \Delta H_{\text{reacción}} + \Delta S_{\text{reacción}} + \Delta G_{\text{reacción}}$$

✓ Balance de entalpia de reacción

a) Datos termodinámicos a  $25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$  para  $\Delta H_{rx}^o$

$$(\Delta H_f^o)_{\text{CaO}} = -151,9 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

$$(\Delta H_f^o)_{\text{CO}_2} = -94,052 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

$$(\Delta H_f^o)_{\text{CaCO}_3} = -288,45 \text{ kcal/mol}$$

b) Determinación de  $\Delta H_{rx(T=298^\circ\text{K})}^o$

$$\Delta H_{rx(T=298^\circ\text{K})}^o = \sum n \Delta H_{rx}^o \text{ productos} - \sum n \Delta H_{rx}^o \text{ reactantes}$$

$$\Delta H_{rx}^o = (1 * (\Delta H_f^o)_{\text{CaO}} + 1 * (\Delta H_f^o)_{\text{CO}_2}) - (1 * (\Delta H_f^o)_{\text{CaCO}_3})$$

$$\Delta H_{rx}^o = \left( 1 \text{ mol} * \left( -151,9 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) + 1 \text{ mol} * \left( -94,052 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) - \left( 1 \text{ mol} * \left( -288,45 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \right) \right)$$

$$\Delta H_{rx(T=298^\circ\text{K})}^o = 42\,498 \text{ cal} > 0$$

c) Tablas termodinámicas: capacidades caloríficas de las sustancias Cp:

cal/mol  $^\circ\text{K}$

$$Cp_{\text{CO}_2}^o = 6,85 + 8,5 * 10^{-3} T$$

$$Cp_{\text{CaO}}^o = 10,0 + 4,8 * 10^{-3} T$$

$$Cp_{\text{CaCO}_3}^o = 19,7 + 11,9 * 10^{-3} T$$

$$\Delta C_p^o = \sum n C_{p_{\text{productos}}} - \sum n C_{p_{\text{reactantes}}}$$

$$\Delta C_p^o = (6,85 + 8,5 * 10^{-3} T + 10,0 + 4,8 * 10^{-3} T) - (19,7 + 11,9 * 10^{-3} T)$$

$$\Delta C_p^o = -2,85 + 1,4 * 10^{-3} T$$

d) Determinación del calor de reacción a 1273°k

$$\Delta H_{RT}^o = \Delta H_{T_o}^o + \int_{T_o}^T \Delta C_p dT$$

$$\Delta H_{R(T=298^{\circ}K)}^o = \Delta H_{T=0}^o + \int_{T=0}^T \Delta C_p dT$$

$$42\,498 = \Delta H_o^o + \int_{T=0}^T (-2,85 + 1,4 * 10^{-3} T) dT$$

$$\Delta H_o^o = 42\,498 + 2,85 * (298) - \frac{1,4 * 10^{-3}}{2} * (298)^2$$

$$\Delta H_o^o = 43\,285,14 \text{ cal}$$

$$\Delta H_{R(T=1273^{\circ}K)}^o = \Delta H_{T_o}^o + \int_{T_o}^{T=1273^{\circ}K} \Delta C_p dT$$

$$\Delta H_{R(T=1273^{\circ}K)}^o = 43\,285,14 + (-2,85 * 1273 + \frac{1,4 * 10^{-3}}{2} * (1273)^2)$$

$$\Delta H_{R(T=1273^{\circ}K)}^o = 40\,791,46 \text{ cal}$$

✓ Balance de entropía de reacción

a) Determinación de  $\Delta S_{RX(T=298^{\circ}K)}^o$

$$(S_f^o)_{CaO} = 9,5 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \text{ } ^{\circ}K$$

$$(S_f^o)_{CO_2} = 51,061 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \text{ } ^{\circ}K$$

$$(S_f^\circ)_{CaCO_3} = 22,2 \frac{cal}{mol} \text{ } ^\circ K$$

$$\Delta S_{rx}^\circ(T=298^\circ K) = \sum n \Delta S_{rx}^\circ \text{ productos} - \sum n \Delta S_f^\circ \text{ reactantes}$$

$$\Delta S_{rx}^\circ = \left( 1 \text{ mol} * \left( 9,5 \frac{cal}{mol \text{ } ^\circ K} \right) + 1 \text{ mol} * \left( 51,061 \frac{cal}{mol \text{ } ^\circ K} \right) \right) - \left( 1 \text{ mol} * \left( 22,2 \frac{cal}{mol \text{ } ^\circ K} \right) \right)$$

$$\Delta S_{rx}^\circ(T=298^\circ K) = 38\,361 \frac{cal}{^\circ K} > 0$$

b) Determinación de la  $\Delta S_{RT}^\circ = 1273^\circ K$

$$\Delta S_{R(T=1273^\circ K)}^\circ = \Delta S_{T=0}^\circ + \int_{T=0}^{T=1273^\circ K} \frac{\Delta C_p}{T} dT$$

$$38\,361 \frac{cal}{^\circ K} = \Delta S_o^\circ + \int_0^{T=298^\circ K} \frac{(-2,85 + 1,4 * 10^{-3} T)}{T} dT$$

$$38\,361 \frac{cal}{^\circ K} = \Delta S_o^\circ - 2,85 \ln T + 1,4 * 10^{-3} T$$

$$38\,361 \frac{cal}{^\circ K} = \Delta S_o^\circ - 2,85 \ln(298) + 1,4 * 10^{-3} (298)$$

$$\Delta S_o^\circ = 54,18 \frac{cal}{^\circ K}$$

Entropía a 1273°K

$$\Delta S_{R(T=1273^\circ K)}^\circ = \Delta S_{T=0}^\circ + \int_{T=0}^{T=1273^\circ K} \frac{\Delta C_p}{T} dT$$

$$\Delta S_{R(T=1273^\circ K)}^\circ = \Delta S_{T=0}^\circ - 2,85 \ln T + 1,4 * 10^{-3} T$$

$$\Delta S_{R(T=1273^\circ K)}^\circ = 54,18 \frac{cal}{^\circ K} - 2,85 \ln(1273) + 1,4 * 10^{-3} (1273)$$

$$\Delta S_{R(T=1273^\circ K)}^\circ = 35,59 \frac{cal}{^\circ K}$$

✓ Cálculo de la energía libre de Gibbs

$$\Delta G_{R(T=298^\circ K)} = \Delta H - T \Delta S$$

$$\Delta G_{R(T=298^{\circ}K)} = 42\,498 \text{ cal} - 298^{\circ}K * 38\,361 \frac{\text{cal}}{^{\circ}K}$$

$$\Delta G_{R(T=1273^{\circ}K)} = 31\,066,42 \text{ cal}$$

$$\Delta G_{R(T=1273^{\circ}K)} = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G_{R(T=1273^{\circ}K)} = 40\,791,46 \text{ cal} - 1273^{\circ}K * 35,59 \frac{\text{cal}}{^{\circ}K}$$

$$\Delta G_{R(T=1273^{\circ}K)} = -4\,514,61 \text{ cal}$$

- ✓ Cálculo de calor suministrado al sistema para llegar a la temperatura de 1273°K

$$q_{\text{suministrado}} = \Delta H_{\text{reacción}} + \Delta S_{\text{reacción}} + \Delta G_{\text{reacción}}$$

$$q_{\text{suministrado}} = 40\,791,46 \text{ cal} + 35,59 \frac{\text{cal}}{^{\circ}K} * 1273^{\circ}K - 4\,514,61 \text{ cal}$$

$$q_{\text{suministrado}} = 81\,582,92 \text{ cal} = 81,58 \text{ Kcal}$$

- En la tabla siguiente se muestra los resultados del % CaO obtenidos después de realizar las pruebas de calcinación.

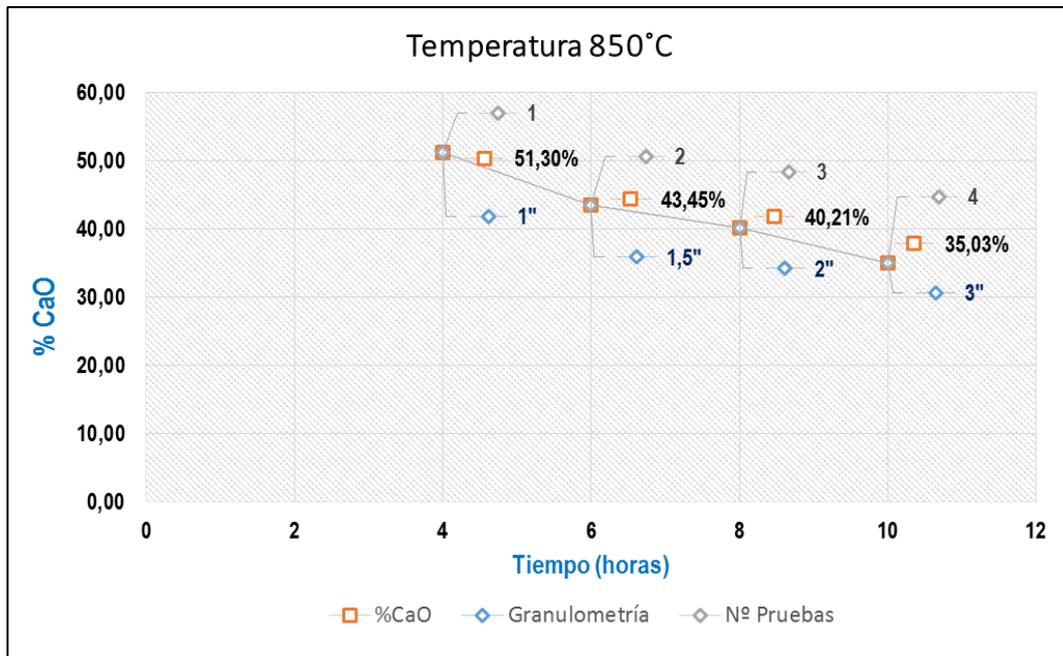
Tabla 10. Resultados de las pruebas de calcinación

| N° Ensayos | Granulometría (Pulg) | Tiempo (Hr) | Temperatura (°C) | CaO (%) |
|------------|----------------------|-------------|------------------|---------|
| 1          | 1                    | 4           | 850              | 51,30   |
| 2          | 1,5                  |             |                  | 43,45   |
| 3          | 2                    |             |                  | 40,21   |
| 4          | 3                    |             |                  | 35,03   |
| 5          | 1                    | 6           |                  | 65,50   |
| 6          | 1,5                  |             |                  | 55,80   |
| 7          | 2                    |             |                  | 54,30   |
| 8          | 3                    |             |                  | 48,20   |
| 9          | 1                    | 8           |                  | 78,10   |
| 10         | 1,5                  |             |                  | 73,80   |
| 11         | 2                    |             |                  | 67,00   |
| 12         | 3                    |             |                  | 61,40   |
| 13         | 1                    | 10          |                  | 84,40   |
| 14         | 1,5                  |             |                  | 82,65   |
| 15         | 2                    |             |                  | 78,25   |
| 16         | 3                    |             |                  | 53,45   |
| 17         | 1                    | 4           | 950              | 45,40   |
| 18         | 1,5                  |             |                  | 42,35   |
| 19         | 2                    |             |                  | 34,70   |
| 20         | 3                    |             |                  | 66,25   |
| 21         | 1                    | 6           |                  | 58,80   |
| 22         | 1,5                  |             |                  | 54,70   |
| 23         | 2                    |             |                  | 48,20   |
| 24         | 3                    |             |                  | 78,90   |
| 25         | 1                    | 8           |                  | 68,00   |
| 26         | 1,5                  |             |                  | 67,65   |
| 27         | 2                    |             |                  | 61,25   |
| 28         | 3                    |             |                  | 85,30   |
| 29         | 1                    | 10          |                  | 84,90   |
| 30         | 1,5                  |             |                  | 79,60   |
| 31         | 2                    |             |                  | 75,80   |
| 32         | 3                    |             |                  | 77,10   |

Fuente: Elaboración propia

- **Análisis estadístico de datos**

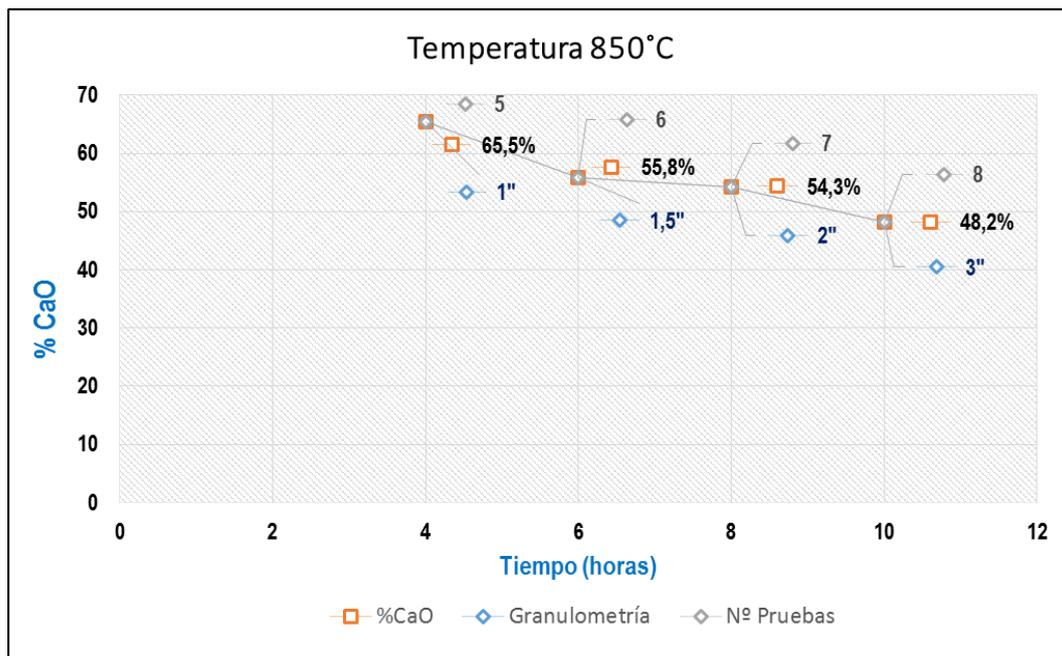
Gráfico 1. Porcentaje de calcinación de caliza a 850°C y 4 horas



Fuente: Elaboración propia

**COMENTARIO:** De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, y el gráfico se puede observar que la granulometría es un factor importante en la calcinación; a menor diámetro la calcinación es mayor (51,30%) y a mayor diámetro (3'') la partícula tarda en calcinar (35,03%).

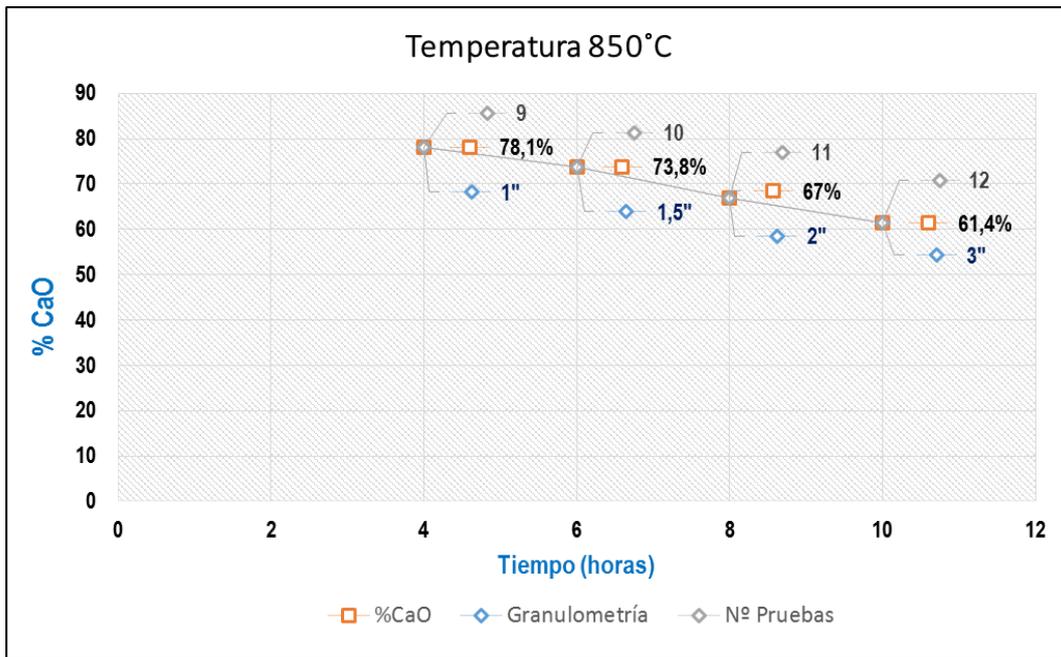
Gráfico 2. Porcentaje de calcinación de caliza a 850°C y 6 horas



Fuente: Elaboración propia

**COMENTARIO:** De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, y el gráfico se puede observar que la granulometría es un factor importante en la calcinación; a menor diámetro la calcinación es mayor (65,50%) y a mayor diámetro (3") la partícula tarda en calcinar (48,20%), a temperatura constante.

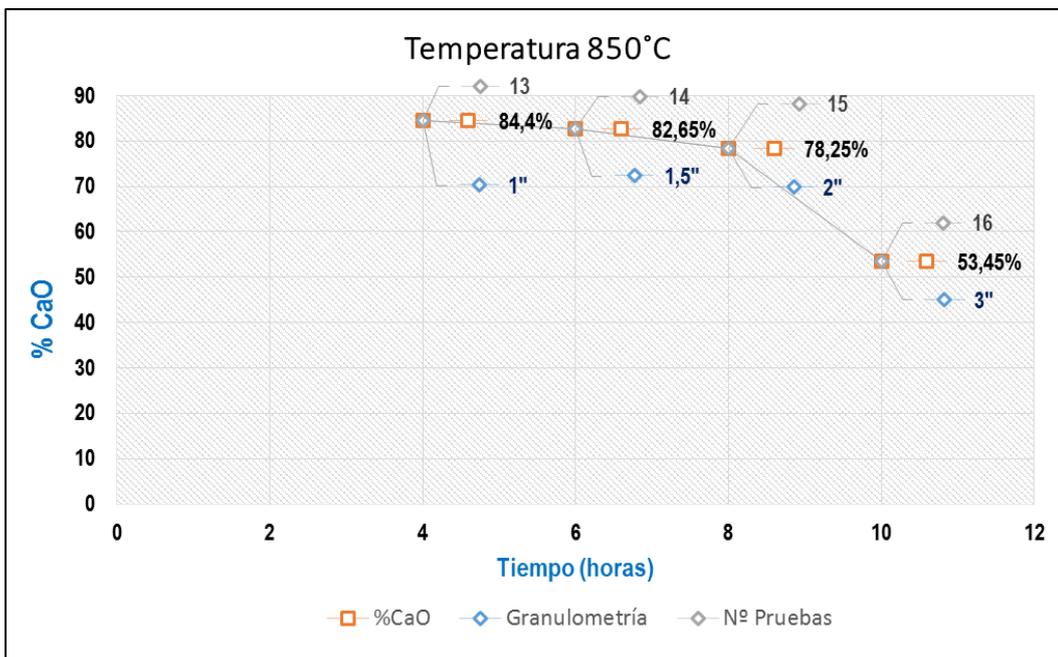
Gráfico 3. Porcentaje de calcinación de caliza a 850°C y 8 horas



Fuente: Elaboración propia

**COMENTARIO:** De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, y el gráfico se puede observar que la granulometría es un factor importante en la calcinación; a menor diámetro la calcinación es mayor (78,10%) y a mayor diámetro (3") la partícula tarda en calcinar (61,40%), a temperatura constante.

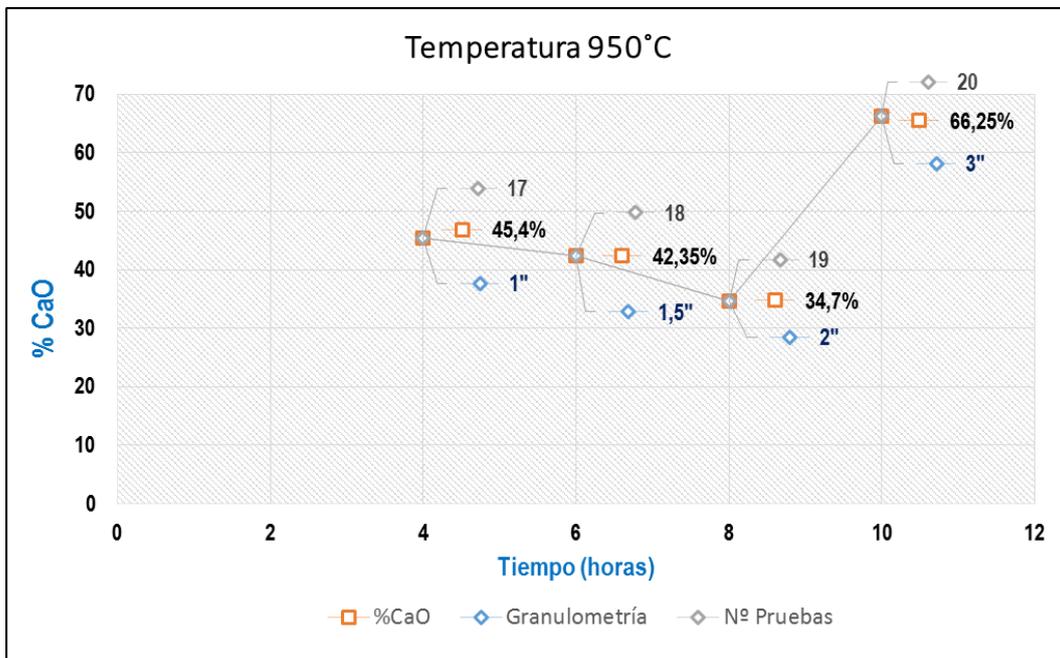
Gráfico 4. Porcentaje de calcinación de caliza a 850°C y 10 horas



Fuente: Elaboración propia

**COMENTARIO:** De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, y el gráfico se puede observar que la granulometría es un factor importante en la calcinación; a menor diámetro la calcinación es mayor (84,40%), alcanzando la mayor reducción química, por cierto, los elementos contaminantes tienen diferente comportamiento térmico y a mayor diámetro (3") la partícula tarda en calcinar (53,45%), a temperatura constante.

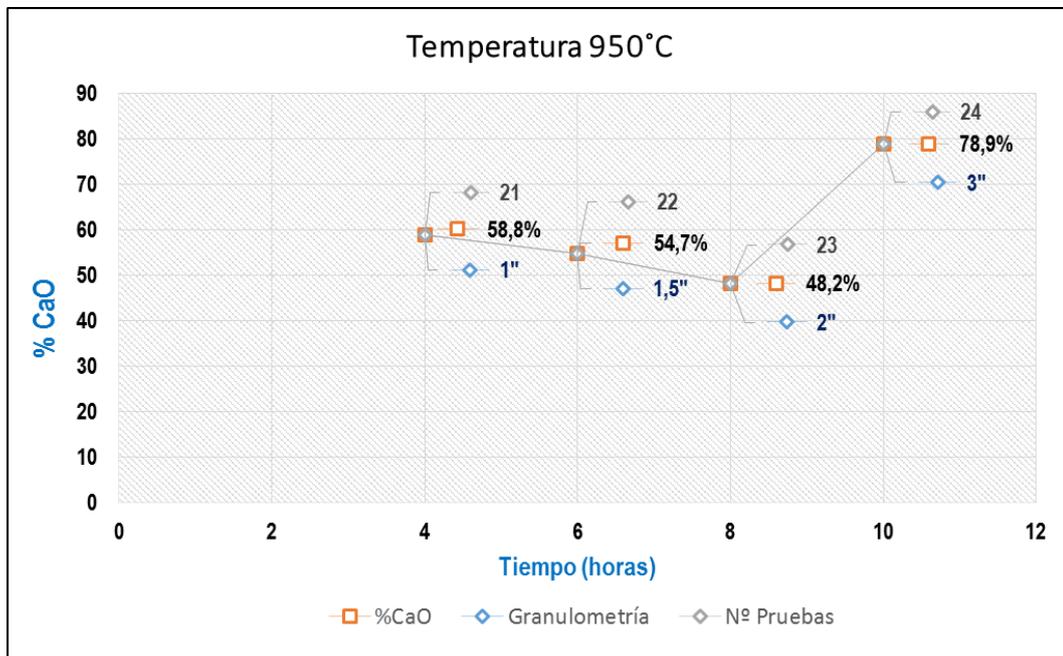
Gráfico 5. Porcentaje de calcinación de caliza a 950°C y 4 horas



Fuente: Elaboración propia

**COMENTARIO:** De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, y el gráfico se puede observar que a mayor temperatura (950°C), la velocidad de calcinación es similar a diferentes granulometrías, observándose que la muestra de partícula de mayor diámetro (3"), adquiere mayor calcinación (66,25%).

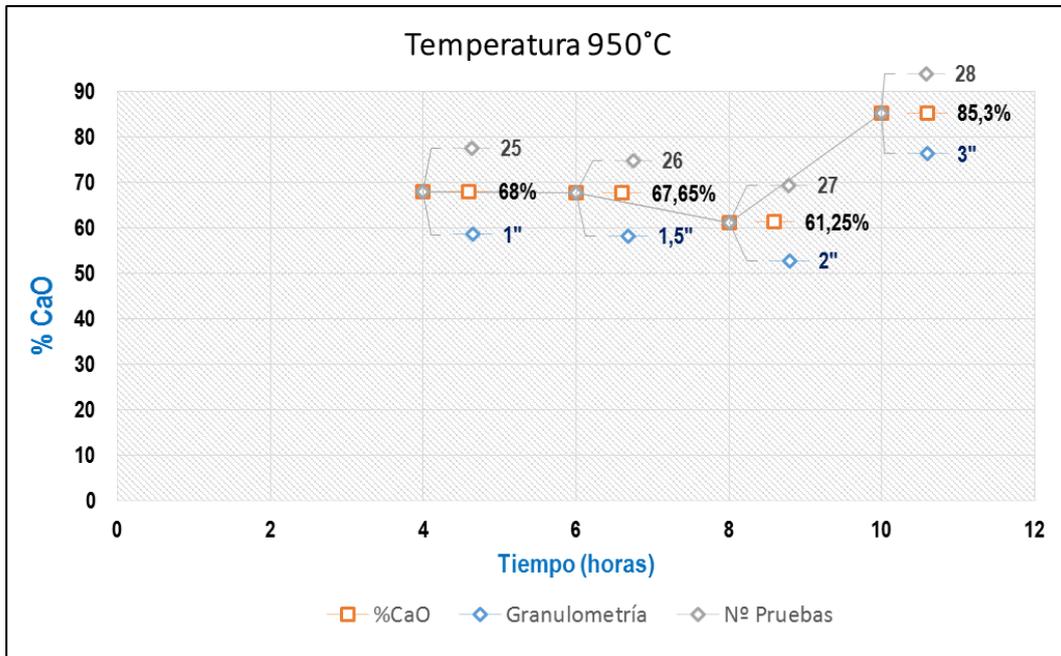
Gráfico 6. Porcentaje de calcinación de caliza a 950°C y 6 horas



Fuente: Elaboración propia

**COMENTARIO:** De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, y el gráfico se puede observar que a mayor temperatura (950°C), la velocidad de calcinación es similar a diferentes granulometrías, observándose que la muestra de partícula de mayor diámetro (3"), adquiere mayor calcinación (78,90%).

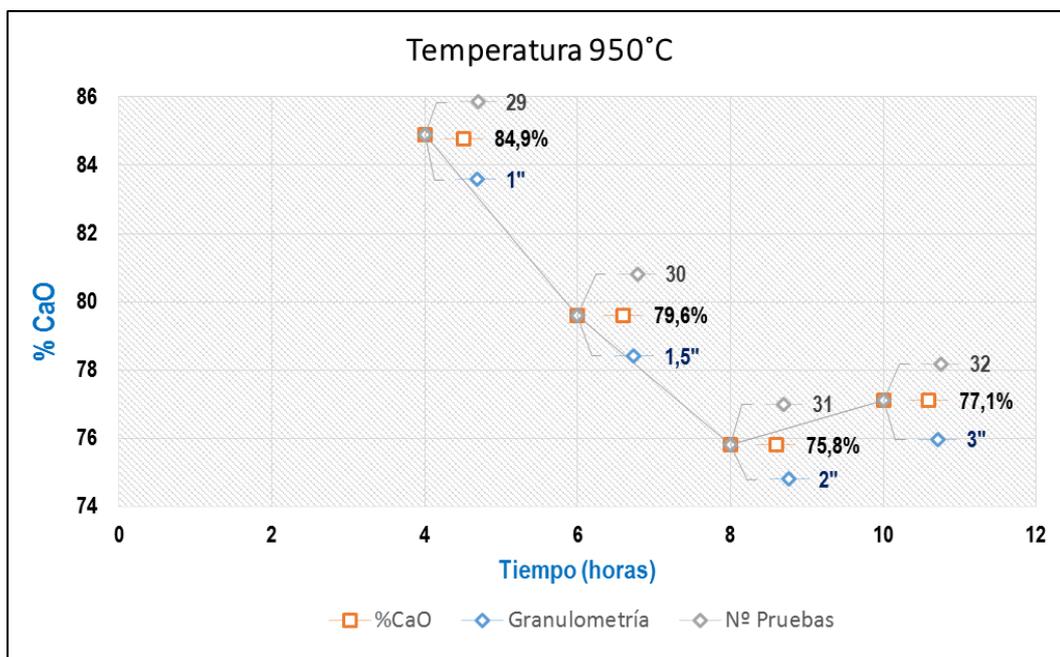
Gráfico 7. Porcentaje de calcinación de caliza a 950°C y 8 horas



Fuente: Elaboración propia

**COMENTARIO:** De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, y el gráfico se puede observar que a mayor temperatura (950°C), la velocidad de calcinación es similar a diferentes granulometrías, observándose que la muestra de partícula de mayor diámetro (3"), adquiere mayor calcinación (85,30%).

Gráfico 8. Porcentaje de calcinación de caliza a 950°C y 10 horas



Fuente: Elaboración propia

**COMENTARIO:** De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio, y el gráfico se puede observar que la granulometría es un factor importante en la calcinación; a menor diámetro la calcinación es mayor (84,90%), alcanzando la mayor reducción química, por cierto, los elementos contaminantes tienen diferente comportamiento térmico y a mayor diámetro (3") la partícula tarda en calcinar (77,10%), a temperatura constante.

Observándose los gráficos 4 y 8, concluimos que la granulometría es un factor importante para la calcinación de calizas (84,40% y 84,90%) respectivamente y el incremento de temperatura influye parcialmente. Demostrándose que la reacción es endotérmica.

### 4.3. Prueba de hipótesis

Sea  $X_1, X_2, \dots, X_n$  la muestra aleatoria simple de tamaño  $n$  obtenido de la población con parámetros  $\mu$  y  $\sigma^2$  (conocidos) para someter a la prueba de hipótesis:

Se tiene  $H_0 =$  Hipótesis nula

$H_1 =$  Hipótesis alterna

$$H_0 = \mu \leq \mu_0$$

$$H_1 = \mu > \mu_0$$

Para determinar la región crítica se utilizó la ecuación:

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (9)$$

Donde:

$$\bar{X} = 1,45$$

$$\mu = 1,20$$

$$\sigma = 0,30226088$$

$$n = 50$$

$$\alpha = 0,05 \text{ (1,65 – De tablas)}$$

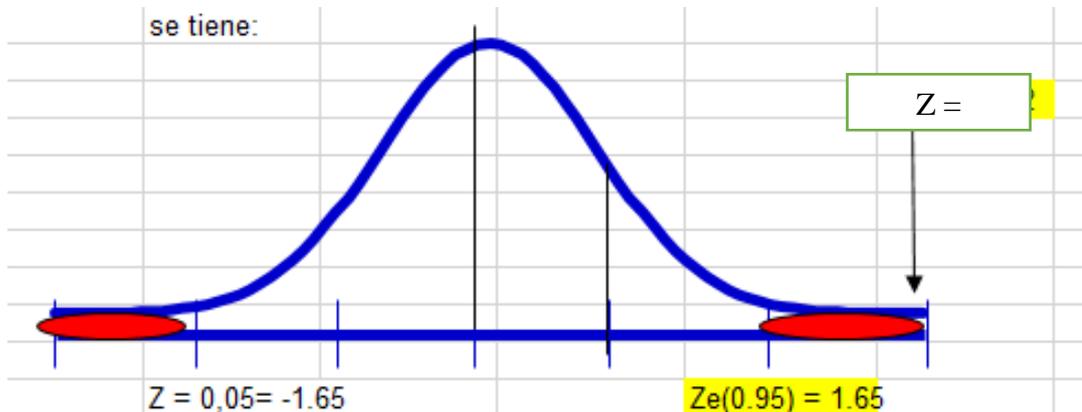
Reemplazando en la ecuación:

$$Z = \frac{2,05 - 2,00}{0,30226088/\sqrt{50}} = \mathbf{8,2710}$$

$$Z = \frac{2,00 - 2,05}{0,30226088/\sqrt{50}} = \mathbf{-8,2710}$$

Se tiene dos casos:

$Z = 8,2710$  es mayor de  $1,65$  y  $Z = -8,2710$  es menor a  $-1,65$ , por tanto, al 5% del nivel de significación NO se rechaza la hipótesis nula.



#### 4.4. Discusión de resultados

Los estudios realizados por el geólogo Moulin, y los geólogos contratados por la empresa Calquipa, confirman que el yacimiento sedimentario de calizas es de formación orgánica en la última fase del terciario e inicios de cuaternario, con valores altos de CaO.

El diseño geométrico para la explotación es similar, en muchas canteras, solo difiere si el yacimiento presenta cambios estructurales que sugieren modificar las rampas, taludes entre otras partes del diseño de explotación.

En todo prospecto calizo, la planta de calcinación debe estar muy cerca al yacimiento para evitar incremento de costos.

La emanación de polvos calizos al momento de voladura y acarreo no son contaminantes en comparación a sulfuros y otros minerales; muy al contrario, permite regular el pH de los suelos, por cierto, en pequeñas cantidades.

Para hacer el balance de masa teórico, se recopiló datos, alimentación de calizas de 100 kg ( $\text{CaCO}_3 = 94\%$  e impurezas = 6%) y cal viva (CaO disponible: 81.87% y CaO crudo 3.00%).

De acuerdo con el Balance de Energía se deduce que la entalpía de reacción a una temperatura estándar respecto a la temperatura de 1273°K tiene una variación de 1706.54 kcal de calor, esta diferencia de calor es transferido a las calizas para elevar su temperatura de calcinación (950°C). La reacción es endotérmica debido a que  $\Delta H^{\circ} > 0$ .

Evaluando la entropía de reacción a una temperatura estándar comparando con la temperatura de 1273°K hay una diferencia de 2.77 cal/°K, esto nos indica una degradación de energía debido; a la descomposición de la caliza, en CaO y CO<sub>2</sub>.

Respecto a la energía libre de Gibbs a 298°K es 31 066.42 calorías por tanto el proceso no es espontáneo debido a que no hay descomposición de la piedra caliza; pero cuando se aumenta la temperatura a 1 273°K la energía libre de Gibbs es -4 514,61 calorías esto nos da a conocer que el proceso es espontáneo ( $\Delta G^{\circ} < 0$ ) por esta razón la piedra caliza se descompone en sus respectivos coproductos.

## CONCLUSIONES

El yacimiento tiene una formación orgánica, por observarse a la lupa caparazones de oolitos, pisolitos y peloides.

Las pruebas experimentales realizadas demuestran que a menor diámetro (1”), 10 horas de calcinación (entre 850°C y 950°C), se obtiene el más alto porcentaje de CaO (84,40 y 84,90% respectivamente).

A mayor diámetro (3”), 10 horas de calcinación (850°C y 950°C), se obtiene (53,45 y 77,10 % CaO), lo que indica que la reacción química se da parcialmente, quedando el núcleo sin reaccionar, por tener reacciones endotérmicas.

Igualmente, es importante considerar a las calizas con un porcentaje mínimo de concentración (80%); las asociaciones con sílice y otros, disminuirá la calidad de los productos y por ende la rentabilidad.

## **RECOMENDACIONES**

Por las reservas observables del yacimiento, se sugiere realizar la negociación con las comunidades vecinas propietarios del terreno superficial, para continuar con el desarrollo de mayores trabajos geo metalúrgicos.

Desarrollas más pruebas de laboratorio, para confirmar los resultados de la calcinación con las variables operadas.

## BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, H. &. (2005). *tesis: Factibilidad Técnica y Económica de la Explotación de un Yacimiento de Caliza en la Región Metropolitana*. Santiago de Chile: Univ. de Chile.
- Avila Acosta, R. (2008). *Metodología de la Investigación*. Lima: R.A.
- Boyton, R. (1990). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. México: John Willey & Sons, Inc.
- Bunge, M. (2008). *La Investigación Científica*. Barcelona - España: Ariel.
- Carnegie, A. (2015). *Evaluación de Yacimientos Carbonatados*. Nueva Delhi: Centro de Investigaciones.
- Carreo, R. &. (2013). *Tesis: Caracterización Geológica y Cálculo de Volumen de Calizas en una zona ubicada al norte de San Sebastián de los Reyes*. Caracas: Univ. Central de Venezuela.
- CATERPILLAR. (2016). *Manual del rendimiento de Equipos Pesados*. Utha: Caterpillar.
- Díaz Uzueta, R. (2007). *Geoquímica e Isótopos de Stockworks de Calcita en el distrito minero de La Encantada, Aplicación a la Exploración de Yacimientos Calizos*. México: Oficina Regional de México.
- Duda, W. (2002). *Cement Data*. Bauverlag - Alemania: Wiesbaden.
- Junín, C. T. (2015). *Memoria Descriptiva del Estudio Geológico del Departamento de Junín*. Huancayo: DREM-J.
- Folk, R. (1969) *Petrología de las rocas sedimentarias*. México D.F. : Instituto de Geología UNAM.
- MATERIALS, A. S. (2008). *HANDBOOK OF ASTM*. New Yprk: Gypsum.
- Mendez, J. (2009). *Carbonatos, Origen y sedimentación*. Caracas: Universidad Central

- Montes - UPM (2012). *Guía Interactiva de Minerales y Rocas*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Montgomery, D. (2007). *Diseño y Análisis de Experimentos*. México: Iberoamericana.
- Mount, J., (1985) *Mixed siliciclastic and carbonate sediment: a propose First order textural and compositional classification*. *Sedimrntology*, Utha: University.
- Nagel, E. (2007). *La Estructura de la Ciencia - Problemas de la lógica de la Investigación Científica*. Buenos Aires - Argentina: Paidos Ibéricas S.A.
- otros, H. &. (2010). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: McGraw Hill.
- Reyes Castañeda, P. (2009). *Diseño de Experimentos Aplicados*. México: Trillas.
- Suarez Zuñiga, D. (1994). *Rocas Ornamentales y Minerales Industriales*. Lima: Rosel.
- Walpole, R. &. (2007). *Probabilidad y Estadística*. México: McGraw Hill.

# **ANEXOS**

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

### Evaluación de las calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018

| Problema  | Objetivos   | Hipótesis  | Variables  | Dimensiones   | Indicadores              |
|---|---|--|--|---------------|--------------------------|
| <b>General</b><br>¿Qué propiedades físicas de las calizas inciden en el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018?   | <b>General</b><br>Determinar las propiedades físicas de las calizas que inciden en el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018  | <b>General</b><br>Las propiedades físicas de las calizas inciden en el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018  | <b>Independiente</b><br>Evaluación de las calizas        | Granulometría | Diámetro medio ( $\mu$ ) |
|   |   |  |  | Temperatura   | °C                       |
|   |   |  |  | Tiempo        | Hr                       |
| <b>Específicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuál será la granulometría adecuada de las calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018?</li> <li>• ¿Cuál será el porcentaje mínimo de calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018?</li> <li>• ¿Cuál será el tiempo y temperatura adecuada para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018?</li> </ul> | <b>Específicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar la granulometría adecuada de las calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018</li> <li>• Calcular el porcentaje mínimo de calizas para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018.</li> <li>• Determinar el tiempo y temperatura adecuada para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018</li> </ul> | <b>Específicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La granulometría adecuada de las calizas incide en el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018</li> <li>• El grado de concentración mínima de calizas incide para el diseño planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín – 2018</li> <li>• El tiempo y temperatura adecuada incide para el diseño de la planta de calcinación en la concesión Calquipa – Junín - 2018</li> </ul> | <b>Dependiente</b><br>Diseño de la planta de calcinación | Obtención CaO | %                        |

## INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Composición química de la calcita y dolomita

| Mineral  | Fórmula                             | Componentes     | Porcentaje (%) |
|----------|-------------------------------------|-----------------|----------------|
| Calcita  | CaCO <sub>3</sub>                   | CaO             | 56,2           |
|          |                                     | CO <sub>2</sub> | 43,8           |
| Dolomita | CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | CaO             | 30,4           |
|          |                                     | MgO             | 21,7           |
|          |                                     | CO <sub>2</sub> | 47,9           |

Composición química de la caliza

| Componentes                    | %      |
|--------------------------------|--------|
| CaCO <sub>3</sub>              | 97,8   |
| MgCO <sub>3</sub>              | 1,25   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,095  |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,56   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,23   |
| Ni                             | < 0,02 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | < 0,01 |
| SrO                            | 0,03   |
| MnO                            | < 0,01 |

Leyes de CaCO<sub>3</sub> y CaO en el Perú

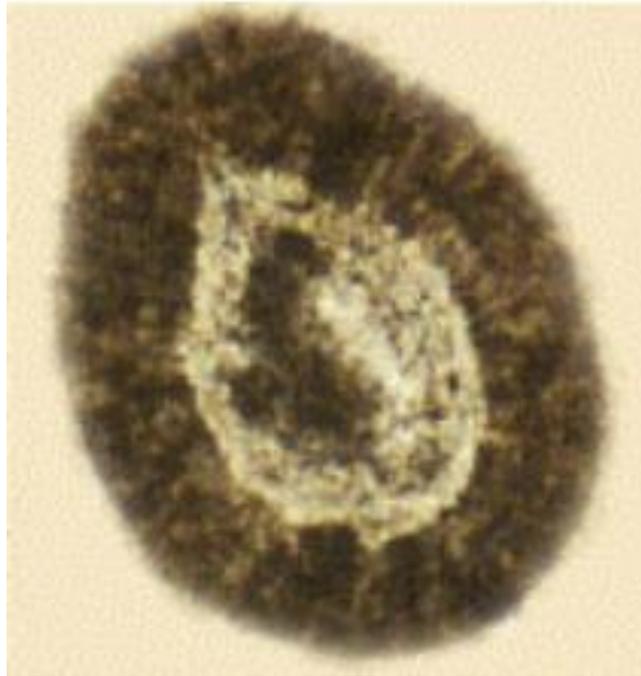
| Cantera             | Región       | Provincia    | CaCO <sub>3</sub> + Yeso (%) | CaO (%) |
|---------------------|--------------|--------------|------------------------------|---------|
| Romacha             | Junín        | Jauja        | 99,98                        | 54,70   |
| Chacapalpa          | Junín        | Jauja        | 99,99                        | 54,63   |
| Nueva Nora<br>Sofía | Huancavelica | Huancavelica | 99,62                        | 54,50   |
| Pucapampa           | Huancavelica | Huancavelica | 99,79                        | 54,61   |
| Palloc              | Cajamarca    | Celendín     | 95,59                        | 53,41   |
| Otuzco              | Cajamarca    | Cajamarca    | 98,28                        | 52,27   |

### Ensayos a experimentar

| N° ensayos | granulometria<br>(Pulgadas) | Tiempo<br>(Horas) | T° calcinación<br>(°C) |
|------------|-----------------------------|-------------------|------------------------|
| 1          | 1                           | 4                 | 850                    |
| 2          | 1.5                         | 6                 |                        |
| 3          | 2                           | 8                 |                        |
| 4          | 3                           | 10                |                        |
| 5          | 1                           | 4                 |                        |
| 6          | 1.5                         | 6                 |                        |
| 7          | 2                           | 8                 |                        |
| 8          | 3                           | 10                |                        |
| 9          | 1                           | 4                 |                        |
| 10         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 11         | 2                           | 8                 |                        |
| 12         | 3                           | 10                |                        |
| 13         | 1                           | 4                 |                        |
| 14         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 15         | 2                           | 8                 |                        |
| 16         | 3                           | 10                |                        |
| 17         | 1                           | 4                 | 950                    |
| 18         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 19         | 2                           | 8                 |                        |
| 20         | 3                           | 10                |                        |
| 21         | 1                           | 4                 |                        |
| 22         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 23         | 2                           | 8                 |                        |
| 24         | 3                           | 10                |                        |
| 25         | 1                           | 4                 |                        |
| 26         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 27         | 2                           | 8                 |                        |
| 28         | 3                           | 10                |                        |
| 29         | 1                           | 4                 |                        |
| 30         | 1.5                         | 6                 |                        |
| 31         | 2                           | 8                 |                        |
| 32         | 3                           | 10                |                        |

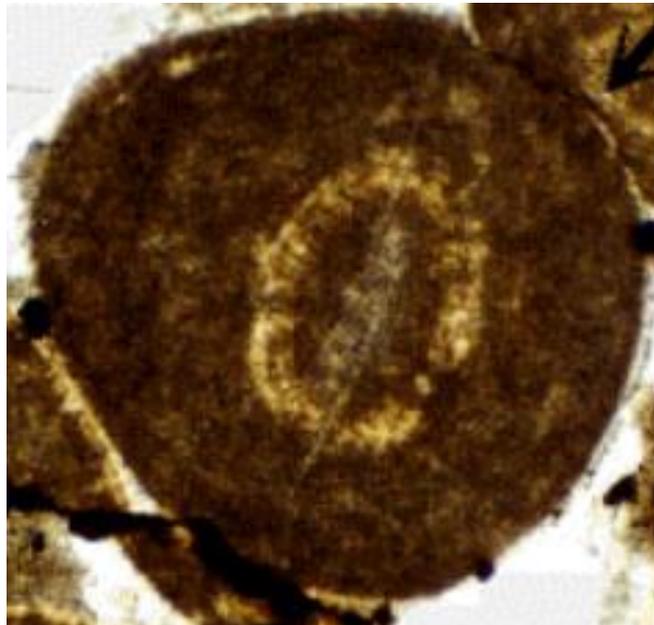
## FOTOGRAFÍAS

Foto 1. Oolitos



Fuente: Carnegie, Andrew – Centro de Investigación Conecticut – USA

Foto 2. Peloides



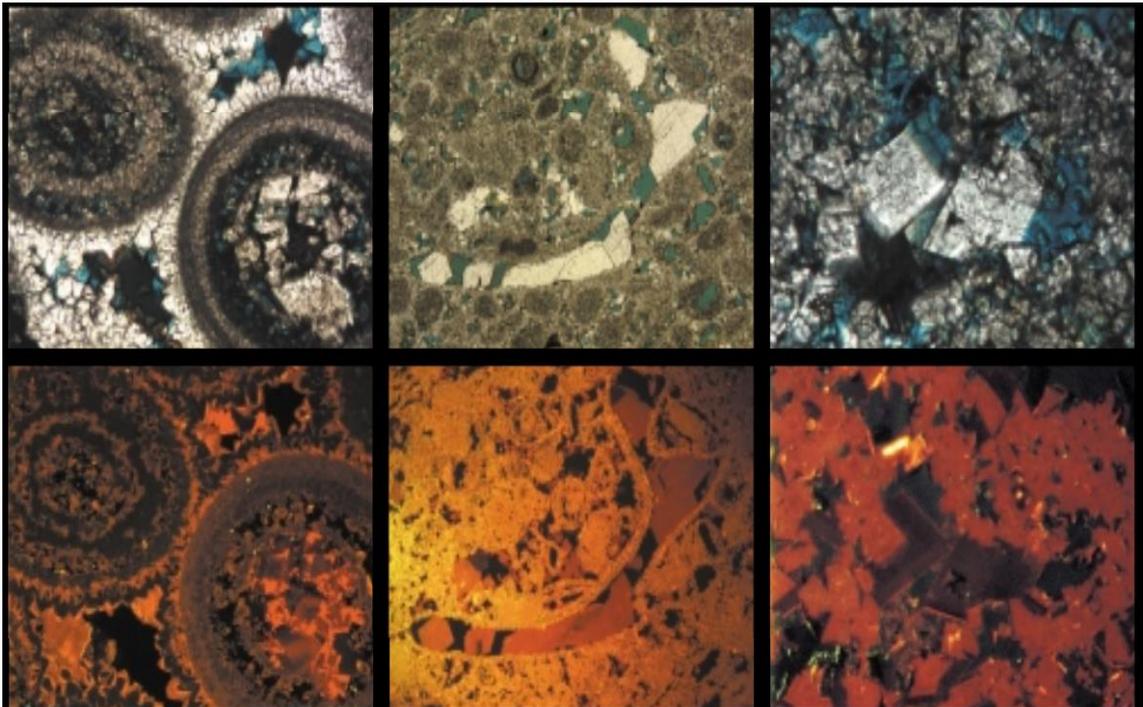
Fuente: Carnegie, Andrew – Centro de Investigación Conecticut – USA

Foto 3. Pisolitos



Fuente: Carnegie, Andrew – Centro de Investigación Conecticut – USA

Foto 4. Génesis de los carbonatos



(Izquierda) caliza granular de oolitos, los núcleos se disolvieron a temprana edad (centro) caliza granular peloidal dolomitizada (derecha) caliza granular de pisolitos reemplazados por dolomías.

Fuente: Carnegie, Andrew – Centro de Investigación de Oil y gas Natural Corporation, Nueva Delhi – India – 2016.

Foto 5. Cuerpo mineralizado de caliza a explotar



Fuente: Elaboración propia

Foto 6. Calicata de exploración



Fuente: Álbum de fotografías.