



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE TENDENCIAS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE  
4 BANCOS DE CALIZA CON BASE AL HISTORIAL DE  
RESULTADOS ANALÍTICOS DISPONIBLES EN UN  
LABORATORIO DE UNA CANTERA DE CALIZA**

**Carlos Abraham Figueroa García**

Asesorado por el Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Guatemala, enero 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE TENDENCIAS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE 4  
BANCOS DE CALIZA CON BASE AL HISTORIAL DE RESULTADOS  
ANALÍTICOS DISPONIBLES EN UN LABORATORIO DE UNA CANTERA DE  
CALIZA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CARLOS ABRAHAM FIGUEROA GARCÍA**  
ASESORADO POR EL ING. ADOLFO NARCISO GRAMAJO ANTONIO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, ENERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

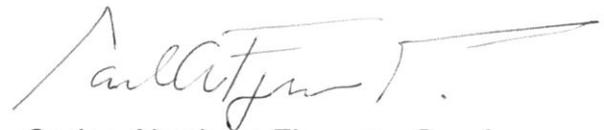
DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Manuel Galván Estrada
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EVALUACIÓN DE TENDENCIAS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE 4 BANCOS DE CALIZA CON BASE AL HISTORIAL DE RESULTADOS ANALÍTICOS DISPONIBLES EN UN LABORATORIO DE UNA CANTERA DE CALIZA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha mayo de 2011.



Carlos Abraham Figueroa García

Guatemala 8 de noviembre del 2011

Ingeniero  
Williams Álvarez Mejía  
DIRECTOR DE ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA.  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

Estimado Ingeniero:

Reciba un cordial saludo. El motivo de la presente es para indicarle que he tenido a la vista el documento que describe el Informe Final de Trabajo de Graduación titulado **“Evaluación de tendencias de composición química de 4 bancos de caliza en base al historial de resultados analíticos disponibles en un laboratorio de una cantera de caliza”** elaborado por el estudiante Carlos Abraham Figueroa García (carné 90-12639).

Como asesor del Trabajo de Graduación, le informo que he revisado y aprobado el Informe Final correspondiente.

Agradeciendo su atención, me despido muy atentamente,



Ing. Q. Adolfo Narciso Gramajo Antonio  
Colegiado Activo No. 264



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 11 de noviembre 2011  
Ref.EIQ.TG.272.2011

Ingeniero  
**Williams Guillermo Álvarez Mejía**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el **Acta TG-172-2011-B-IF** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario, **Carlos Abraham Figueroa García**, identificado con carné No. **90-12639**, titulado: **"EVALUACIÓN DE TENDENCIAS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE 4 BANCOS DE CALIZA EN BASE AL HISTORIAL DE RESULTADOS ANALÍTICOS DISPONIBLES EN UN LABORATORIO DE UNA CANTERA DE CALIZA"**, el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico **Adolfo Narciso Gramajo Antonio**.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Figueroa García**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.  
COORDINADORA  
Tribunal que revisó el informe final  
Del trabajo de graduación



C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **CARLOS ABRAHAM FIGUEROA GARCÍA**, titulado: "EVALUACIÓN DE TENDENCIAS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE 4 BANCOS DE CALIZA CON BASE AL HISTORIAL DE RESULTADOS ANALÍTICOS DISPONIBLES EN UN LABORATORIO DE UNA CANTERA DE CALIZA". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

  
Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero de 2012



Cc: Archivo  
WGAM/ale



DTG. 035.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE TENDENCIAS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE 4 BANCOS DE CALIZA CON BASE AL HISTORIAL DE RESULTADOS ANALÍTICOS DISPONIBLES EN UN LABORATORIO DE UNA CANTERA DE CALIZA**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Abraham Figueroa Garcia**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Reginos  
Decano



Guatemala, 25 de enero de 2012.

**gdech**

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por que me ha permitido alcanzar esta meta
<b>Mis padres</b>	Manolo Alfonso Figueroa Urrea, Marta Elena García de Figueroa, por su amor, ejemplo y constante estímulo
<b>Mi abuela</b>	Elena Kutzbach de García, por su amor y ejemplo
<b>Mi esposa</b>	Daniela María Gil Rohrmöser de Figueroa, Ana Cecilia, Sebastián Emanuel y Luis Pedro por su amor y apoyo
<b>Mis hermanos</b>	Manuel Alfonso, Rosa Irene y Elena Isabel Figueroa García
<b>Mis amigos</b>	Heber Barrios Valenzuela, Alicia Reyes de Reyes, Victor Manuel Andrino, Haydee González de Andrino por su cariño

## **AGRADECIMIENTO A**

Cementos Progreso, S.A., por facilitarme los recursos necesarios para elaborar el presente trabajo de graduación.

Al ingeniero Adolfo Gramajo, gerente de planta San Miguel e ingeniero Carlos Castillo, vicepresidente de la división de cementos y adyacencias del grupo Progreso, por el apoyo incondicional y desinteresado que me brindaron durante el proceso de elaboración de este trabajo de graduación y por procurar en todo momento mi desarrollo personal y profesional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS Y/O HIPÓTESIS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	9
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
3.1. Variables.....	20
3.2. Delimitación del campo de estudio.....	21
3.3. Recursos humanos disponibles.....	22
3.4. Recursos materiales disponibles.....	22
3.5. Técnica cuantitativa.....	24
3.6. Recolección y ordenamiento de la información.....	26
3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	27
3.8. Análisis estadístico.....	35
4. RESULTADOS.....	37
5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47

CONCLUSIONES.....53  
RECOMENDACIONES.....55  
BIBLIOGRAFÍA.....57  
APÉNDICES.....59

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Plataforma de barrenación en banco .....	2
2.	Acciones básicas en la perforación rotopercutiva de rocas .....	3
3.	Esquema de los componentes de una perforadora de rocas .....	4
4.	Relación del tamaño de muestra y granulometría del material .....	13
5.	Diferentes escenarios de frecuencia de muestreo .....	15
6.	Volumen de influencia de un barreno .....	18
7.	Variables geométricas de un banco o plataforma de explotación .....	21
8.	Bancos de caliza evaluados según el contenido de SiO <sub>2</sub> .....	43
9.	Bancos de caliza evaluados según el contenido de CaO .....	44
10.	Bancos de caliza evaluados según el contenido de MgO .....	45

## TABLAS

I.	Restricciones químicas de las calizas.....	6
II.	Localización de las series de barrenación.....	25
III.	Matriz experimental para la intercomparación entre muestras.....	26
IV.	Serie de barrenación del bloque norte – muestras primarias.....	28
V.	Serie de barrenación del bloque sur – muestras primarias.....	29
VI.	Serie de barrenación del bloque noreste – muestras primarias.....	30
VII.	Serie de barrenación del bloque noroeste – muestras primarias.....	31
VIII.	Serie de barrenación del bloque norte – muestras compuestas.....	32
IX.	Serie de barrenación del bloque sur – muestras compuestas.....	32
X.	Serie de barrenación del bloque noreste – muestras compuestas.....	33
XI.	Serie de barrenación del bloque noroeste – muestras compuestas.....	34
XII.	Análisis de varianzas entre muestras del bloque norte.....	38
XIII.	Análisis de varianzas entre muestras del bloque sur.....	39
XIV.	Análisis de varianzas entre muestras del bloque noreste.....	40
XV.	Análisis de varianzas entre muestras del bloque noroeste.....	41
XVI.	Análisis de varianzas entre bloques.....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>gr</b>	Gramo
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de aluminio
<b>CaO</b>	Óxido de calcio
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de hierro
<b>MgO</b>	Óxido de magnesio
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Óxido de sílice
<b>%</b>	Porcentaje
<b>“</b>	Pulgada
<b>Tm</b>	Tonelada métrica



## GLOSARIO

<b>Anova</b>	Método estadístico utilizado para determinar si las medias de dos o más muestras fueron extraídas de la misma población.
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i> (en español).
<b>Banco</b>	Macizo rocoso de geometría definida.
<b>Cal</b>	La que por calcinación da cal hidráulica.
<b>Caliza</b>	Mineral o roca formada de carbonato de calcio.
<b>Cantera</b>	Sitio donde se extraen minerales, rocas, gravas u otro material análogo para obras varias.
<b>Cemento</b>	Mezcla formada de arcilla y materiales calcáreos, sometida a cocción y muy finamente molida, que mezclada a su vez con agua se solidifica y endurece.

<b>Desviación estándar</b>	Se define como la raíz cuadrada de la varianza.
<b>Detrito</b>	Material que es el resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas finas.
<b>DIN</b>	<i>Instituto Alemán de Normalización</i> (en español).
<b>EPP</b>	Equipo de protección personal.
<b>Granulometría</b>	Tamaño de las piedras, granos, arena, etc., que constituyen un árido, grava o polvo.
<b>Media</b>	Cociente de dividir la suma de varias cantidades por el número de ellas.
<b>Varianza</b>	Media de las desviaciones cuadráticas de una variable aleatoria, referidas al valor medio de ésta.
<b>Voladura</b>	Acción y efecto de fragmentar rocas al utilizar explosivos.

## RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo definir un método de muestreo representativo de bancos de explotación de caliza en canteras, que garantice caracterizar químicamente la voladura de producción, previa a su envío como materia prima a los siguientes subprocesos de la fabricación de cemento y/o cal.

Para alcanzar tal objetivo, se desarrolló un procedimiento de muestreo representativo del detrito de barrenación generado en el proceso de perforación de las rocas. El análisis químico de las muestras se realizó por el método de Fluorescencia y Difracción de Rayos X.

Adicional a lo anterior, se evaluaron las tendencias de composición química de 4 bancos de caliza con base al historial de resultados analíticos disponibles en el laboratorio de la cantera de una planta cementera y de fabricación de cal.

Finalmente, mediante métodos estadísticos de análisis de varianzas se determinó el número de muestras necesarias para establecer el contenido químico de óxido de sílice, óxido de calcio y óxido de magnesio de una serie de barrenación de bancos de caliza sin perder representatividad en el muestreo y confiabilidad de la caracterización de la totalidad de la voladura.



# OBJETIVOS

## General

Determinar la composición química de bancos de caliza utilizando el detrito de barrenación generado en el proceso de perforación de rocas en una cantera.

## Específicos

1. Determinar el contenido químico promedio de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y óxido de sílice (SiO<sub>2</sub>) de detritos de barrenación de cuatro bancos de caliza.
2. Determinar las muestras a analizar en función de cuatro series de barrenación propuestas para cada banco de caliza de explotación y establecer su composición química.
3. Evaluar las tendencias de composición química (%SiO<sub>2</sub>, %CaO y %MgO) de los 4 bancos de caliza seleccionados con base al historial de resultados analíticos disponibles.
4. Con base a la evaluación de la composición química de los 4 bancos de caliza para explotación seleccionados en la cantera, validar el concepto geológico definido en las campañas de sondeos geológicos previos.

## **Hipótesis**

Es posible determinar la composición química de un banco de caliza utilizando el detrito de barrenación de un determinado número de agujeros de perforación del total de la serie de barrenación, previo a la voladura para la evaluación del contenido de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y óxido de sílice (SiO<sub>2</sub>).

Con base a la composición química determinada de los bancos de caliza evaluados, es factible validar el concepto geológico del depósito mineral.

## **Hipótesis estadística**

Mediante un estudio estadístico de la composición química individual del detrito de barrenación, para los tres principales parámetros (%CaO, %MgO y %SiO<sub>2</sub>), es posible seleccionar adecuadamente el arreglo de muestreo propuesto para una serie de barrenación y determinar si existe o no diferencia significativa en los contenidos porcentuales de cada compuesto.

## INTRODUCCIÓN

El avance de la humanidad ha estado ligado en gran medida al aprovechamiento de los recursos naturales y a la construcción de diversos tipos de infraestructuras. En ambos campos, los materiales de construcción, la fabricación del cemento y de la cal ha sido posible, gracias al aprovechamiento de depósitos minerales calcáreos.

Estos recursos minerales transformados en materiales para la construcción de infraestructuras han puesto a disposición del hombre una amplia gama de aplicaciones en campos como: el transporte, vivienda, industria, agricultura, entre otros.

La innovación tecnológica en el ámbito del aprovechamiento o extracción de minerales no metálicos como los depósitos o yacimientos de minerales calcáreos o calizas, ha sido una constante en las últimas décadas. Actualmente, el aprovechamiento de recursos minerales no renovables obliga hacer uso de éstos de una forma racional, obligando también a las empresas a optimizar sus recursos y hacer eficientes cada vez más sus procesos.

Paralelamente, el minado de yacimientos minerales ha progresado significativamente con acontecimientos decisivos, como fueron en 1861 la aplicación del aire comprimido como fuente de energía en los equipos de perforación, la utilización de equipos mecanizados de perforación de rocas en la

década de los cincuenta y el desarrollo de perforadoras hidráulicas a finales de los años setenta, del siglo XX.

No obstante, para las operaciones de minado en canteras para plantas cementeras y/o caleras, la perforación y voladura de rocas se han considerado hasta épocas recientes como un arte que nace de la pericia y experiencia de los encargados de dichas operaciones, pero en la actualidad estos procedimientos de perforación y voladura han sido transformados en técnicas basadas en principios científicos, cuyo fin primordial es conocer a detalle las características fisicoquímicas de los depósitos minerales de sus canteras. Este conocimiento a detalle de los depósitos minerales, garantiza el aprovechamiento racional, óptimo y eficiente de estos recursos minerales no renovables.

El proceso para muestrear confiablemente y conocer las composiciones químicas del depósito calcáreo de una cantera cementera y/o calera previo a su explotación y envío de esta materia prima a los siguientes subprocesos será el objetivo del presente trabajo de investigación.

## 1. ANTECEDENTES

La mayoría de decisiones que se hacen respecto a un proyecto de explotación de una cantera, desde la exploración hasta el cierre de ésta, están basadas en valores obtenidos de material muestreado. Estas decisiones significan una gran cantidad de recursos económicos. Lo anterior es para asegurar con el mayor grado de confiabilidad, las reservas de mineral que constituirán a lo largo de la vida del proyecto, las materias primas necesarias para la continuidad y sostenibilidad del negocio.

Especialmente para plantas cementeras y/o caleras, la obtención e integridad de las muestras recolectadas en sus canteras, a lo largo y durante el tiempo de vida de éstas es de vital importancia, pues el resultado de su caracterización química constituirá la información base para conocer y entender el depósito mineral y determinará así, las características o propiedades del producto final.

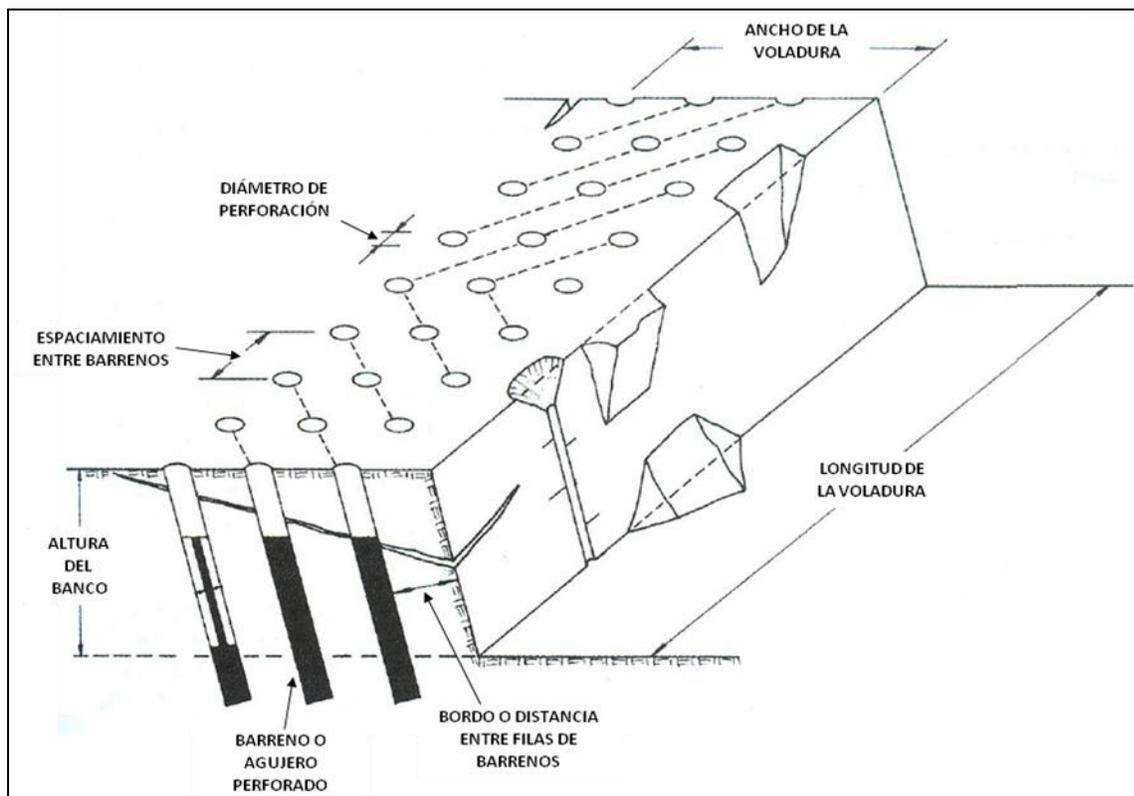
La caracterización química o determinación de la ley del depósito de la cantera es fundamental para la planificación de minado a corto, mediano y largo plazo: esta caracterización decide, de una u otra manera, el destino de los materiales (a procesos, *stock* o botadero).

La caracterización química de un depósito o macizo rocoso previo a su explotación, es el paso inicial, antes de determinar si éste se constituirá en materia prima.

El método de explotación más popular de un macizo rocoso en operaciones mineras a cielo abierto, es realizar la voladura de rocas de forma controlada utilizando explosivos industriales y es denominado voladuras de producción.

Este método contempla realizar una serie de perforaciones de barrenos de diámetros determinados y en configuración geométrica definida a lo largo y ancho de la plataforma superior de perforación del macizo rocoso a explotar. Este proceso es denominado barrenación en banco, ver figura 1.

Figura 1. **Plataforma de perforación en banco**

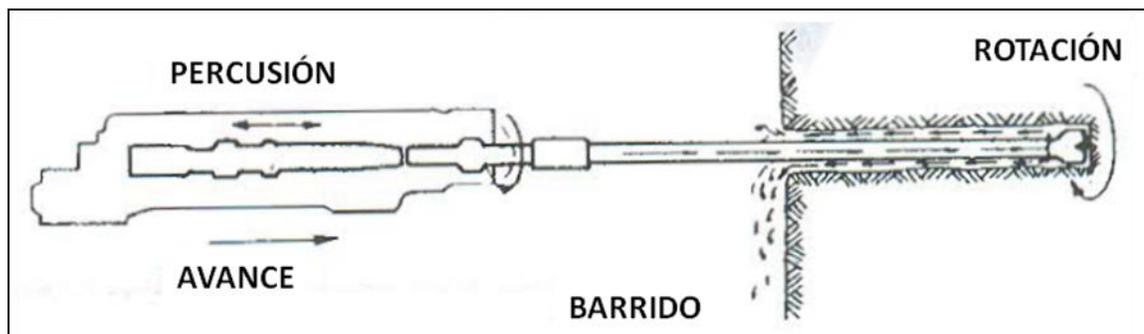


Fuente: LÓPEZ JIMENO, Carlos. Manual de perforación y voladura de rocas. p. 121.

La perforación de rocas en el método de voladuras de producción es la primera operación que se realiza y tiene como finalidad abrir unos agujeros en la roca con una distribución y geometría adecuada dentro de los macizos rocosos, donde se alojarán las cargas explosivas, sus accesorios e iniciadores de la voladura al momento de realizar la detonación.

La perforación de la roca en el macizo rocoso implica utilizar sistemas mecanizados de penetración que utilizan energía mecánica como percusión, rotación y roto percusión como se muestra en la figura 2.

Figura 2. **Acciones básicas en la perforación rotopercutiva de rocas**

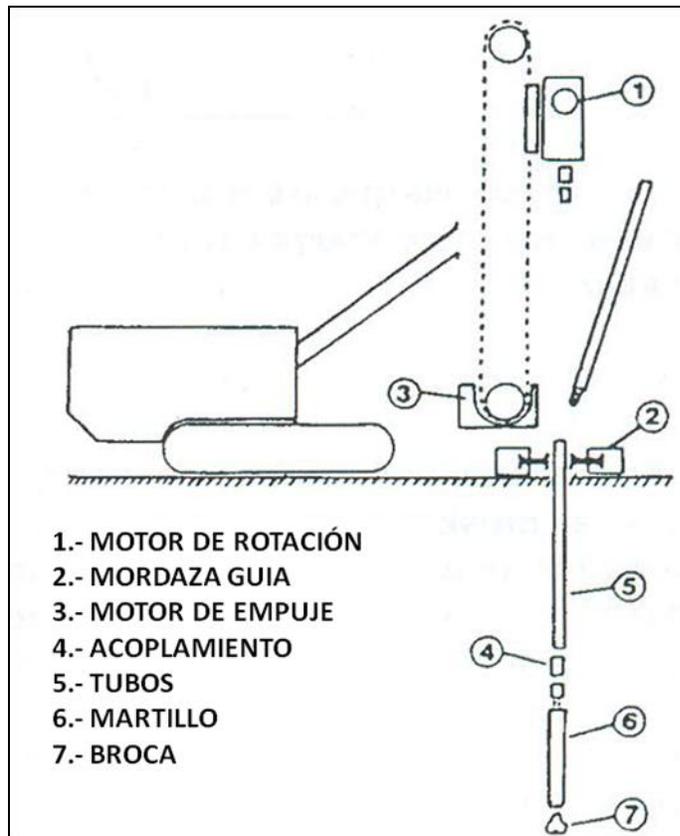


Fuente: LÓPEZ JIMENO, Carlos. Manual de perforación y voladura de rocas. p. 137.

Los componentes principales de un sistema mecanizado de penetración son:

- La perforadora: fuente de energía mecánica.
- El varillaje: medio de transmisión de la energía.
- La broca: el accesorio que ejerce sobre la roca la energía.
- El fluido de barrido: realiza la limpieza y evacuación del detrito producido. (ver figura 3).

Figura 3. **Esquema de los componentes de una perforadora de rocas**



Fuente: LÓPEZ JIMENO, Carlos. Manual de perforación y voladura de rocas. p. 178.

La eliminación de polvo producido por la evacuación del detrito generado se realiza con cuatro fines:

- Mejorar las condiciones de trabajo, evitando riesgos a la salud de los operadores.
- Minimizar el impacto al ambiente por la generación de polvo fugitivo.

- Aumentar la productividad del proceso de barrenación, pues se obtienen costos de perforación más bajos, tanto por el mayor rendimiento como por la disminución de los costos de desgaste, fundamentalmente de las brocas.
- Posibilidad de recoger muestras representativas de las rocas atravesadas para el control de leyes y planificación del proceso de explotación de la cantera.

En la actualidad, la mayoría de equipos de perforación poseen sistemas de captación del detrito generado, el cual puede recogerse en bolsas o depositarse directamente sobre la superficie del banco.

La caracterización química de los macizos rocosos es actualmente elaborada de diversas maneras, conforme a los requisitos del proyecto. Para plantas cementeras y/o caleras, los depósitos minerales están constituidos, primordialmente, por minerales calcáreos denominados depósitos de carbonatos de calcio o calizas.

Las características químicas de las calizas en una cantera como fuente de materias primas a utilizar en los procesos de fabricación de cemento y cal difieren unas de otras, ya que existen requerimientos químicos estándar normados por asociaciones internacionales, o nacionales como es el caso de la *American Society for Testing and Materiales (ASTM)*.

Si el propósito de esta caracterización está directamente relacionado con los requerimientos químicos del cemento y de la cal, es de vital importancia evaluar los componentes químicos de estas calizas, ya que cada cantera es

única y raras veces son homogéneas, es decir, en una misma cantera existen diferentes tipos de calizas.

Los componentes químicos restrictivos primordiales de las calizas como materias primas a utilizar en los procesos de fabricación de cemento y cal se presentan en la tabla I.

Tabla I. **Restricciones químicas de las calizas**

<b>Proceso</b>	<b>Variable de control</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Especificación</b>
Caliza como materia prima a ser utilizada en el proceso de fabricación de Cemento	CaO	%	> 45.00
	MgO	%	< 5.00
	SiO <sub>2</sub>	%	< 3.00
Caliza como materia prima a ser utilizada en el proceso de fabricación de Cal	CaO	%	> 51.00
	MgO	%	< 2.00
	SiO <sub>2</sub>	%	< 1.00
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	< 1.00
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	< 1.00

Fuente: elaboración propia.

Tres componentes químicos primordiales en las calizas deben ser evaluados para determinar si éstas pueden utilizarse como materia prima en los procesos de fabricación de cemento y cal:

1. Porcentaje (%) de óxido de calcio (%CaO). Para fabricación de cal viva o hidratada y dependiendo de su aplicación en el mercado (construcción, siderúrgica, etc.), las normas establecen contenidos mayores a 51%.
2. Porcentaje (%) de óxido de magnesio (%MgO). Para la fabricación de cemento, las normas establecen un contenido menor a 5%. Para fabricación de cal viva o hidratada y dependiendo de su aplicación en el mercado (construcción, siderúrgica, etc.), las normas establecen contenidos menores a 2%.
3. Porcentaje (%) de óxido de silíceo (%SiO<sub>2</sub>). Dependiendo de la aplicación para la que se utilice la cal viva o hidratada, las normas establecen contenidos menores a 1%, sin mencionar qué contenidos mayores al anteriormente definido, representan riesgos operacionales en los hornos de calcinación.



## 2. MARCO TEÓRICO

A fin de decidir sobre un régimen de muestreo adecuado y el correspondiente equipo de análisis, es necesario tomar en cuenta ciertas consideraciones relacionadas con el objetivo primordial del muestreo, la representatividad de las muestras y las características del material a determinar.

Materiales a granel pueden ser muestreados, ya sea para determinar el contenido básico de determinado compuesto o para propósitos de control de procesos.

- Muestreos para determinar el contenido básico de determinado compuesto: el régimen de muestreos debe ser adaptado a la variabilidad del material y a la precisión requerida de la medición. La complejidad del muestreo puede variar desde la toma puntual de una muestra de forma manual, hasta técnicas y procedimientos de muestreo descritos según normas o métodos acordados entre vendedor y comprador.
- Muestreos para el control de procesos: el régimen de muestreos, en particular la frecuencia del muestreo, tiene que adaptarse a la variabilidad del material de salida del proceso, a la variabilidad de los materiales de entrada al proceso y a la dinámica del proceso. Cuán rápido y precisas deben ser las correcciones al proceso y con qué rapidez pueden ser éstas observadas. Este tipo de muestreo puede ser fácilmente automatizado permitiendo así niveles de precisión aceptables.

Con el fin de obtener información comprensible de una muestra respecto a las características de determinada cantidad de material, la muestra también debe exhibir información comprensible de estas características desde el punto de vista de representatividad. Representatividad significa que el valor de cierta característica determinada en la muestra difiere, solamente de forma aleatoria y no sistemática, desde el valor medio de la cantidad de material básico. Para muestras representativas, normalmente es un prerequisite que todos los sectores del volumen del material tengan la misma probabilidad de ser muestreados y que todos los tamaños de partícula del material estén correctamente representados en la muestra.

Un muestreo representativo de materiales a granel a menudo resulta ser una tarea difícil de realizar, especialmente cuando se trata de material en estado estacionario; algunas de las razones de esto son:

- Grandes volúmenes pueden ser simplemente inaccesibles, por ejemplo: cuando éstos se encuentran apilados en acopios de gran volumen, almacenados en silos, barcos o camiones.
- Materiales en estado estacionario pueden presentarse en estratos, debido a que diferentes materiales se han depositado en forma secuencial.
- Materiales con un amplio rango de granulometría tienden a formar segregación de partículas. Por ejemplo, material fino puede concentrarse en las partes altas de un acopio o montículo de material. Si en la muestra las partículas finas y gruesas poseen características de interés diferente (p. ej. composición química), ocurrirá heterogeneidad de la muestra y esto puede ser una fuente importante de error en el muestreo. Contenidos de humedad excesivos en la muestra conllevan a errores similares.

- Efectos de separación de partículas en el material a muestrear, también pueden ocurrir cuando poseen un amplio rango de tamaño de partícula y son descargados desde la parte superior a la parte inferior de un talud en una cantera o descargados desde una banda transportadora a otra en dirección perpendicular. En cualquiera de los dos casos anteriores se obtienen flujos no homogéneos de material.
- Similares efectos ocurren cuando dos corrientes de material se combinan en una sola banda transportadora.

Muestreo de materiales en estado estacionario debe evitarse en lo posible y ser reemplazado por muestreo durante la carga o descarga del material en sistemas que involucran la utilización de bandas transportadoras. Si lo anterior no es posible, se deberán utilizar métodos de muestreo que impliquen toma de muestras de toda la sección transversal del material.

Muestreo de grandes volúmenes de material apilado o de acopios deben ser muestreados, según normas establecidas (p.ej.: ASTM D 75-82) o con base en acuerdos pre establecidos.

Por las razones mencionadas anteriormente, especial cuidado debe tomarse al momento de realizar muestreos de materiales transportados en bandas, independientemente si se utiliza equipo manual o automático.

Para mantener los costos al mínimo, es imperante limitar el número de características del material a determinar. De preferencia, se deben establecer las características del material cuya determinación sean fáciles de estimar.

Es evidente que las características del material escogidas deben permanecer inalterables durante los procesos de muestreo, preparación y análisis.

## **2.1. Guía para determinar el tamaño de la muestra y su cantidad**

A mayor número de muestras y a mayor cantidad de material primario muestreado, más preciso es el resultado de la característica del material determinado.

Así, la determinación de la menor cantidad del número de muestras y la menor cantidad de material por muestra, debe evaluarse para que este muestreo sea representativo. Establecer lo anterior sin perder representatividad depende de:

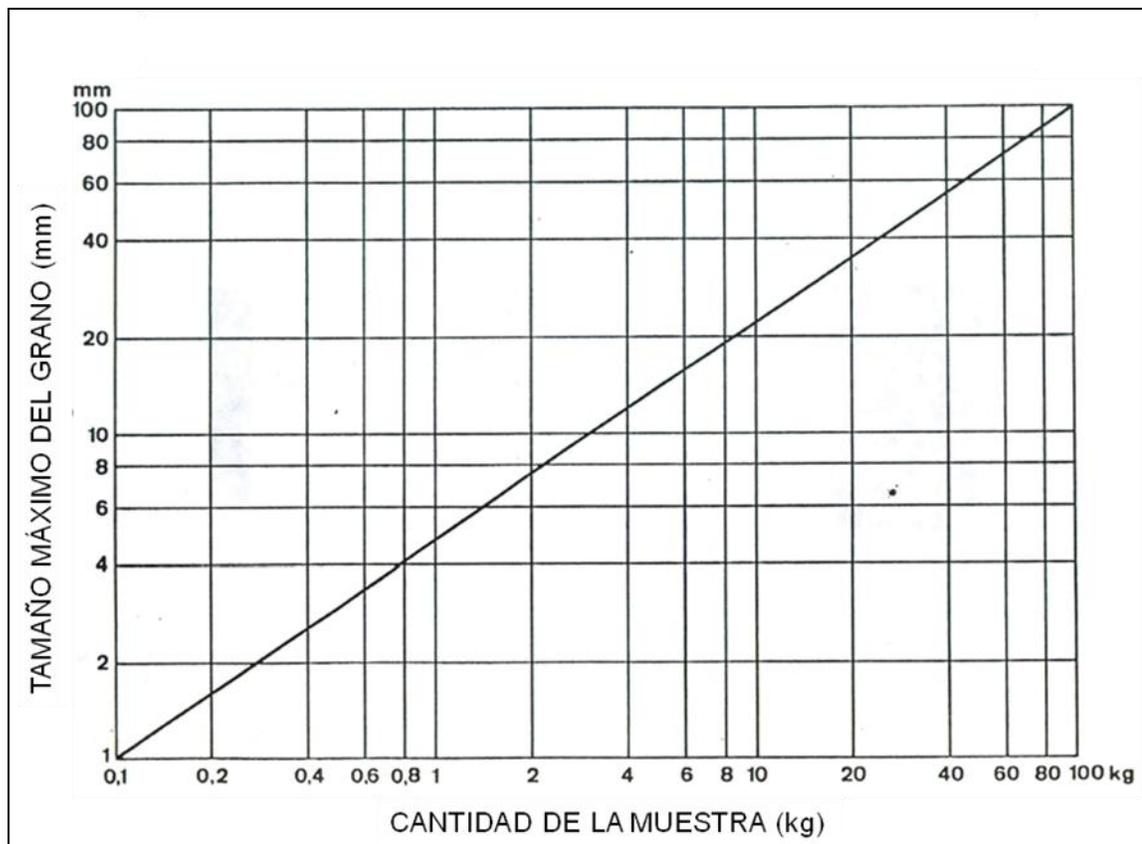
- El tamaño de la partícula
- La heterogeneidad del material

Como primera aproximación, los siguientes criterios de muestreo deben aplicarse.

La cantidad mínima de una muestra primaria está directamente relacionada con el peso del tamaño de grano o granulometría máxima del material. La norma alemana DIN indica que el peso mínimo de una muestra primaria debe ser al menos 10 veces el peso del tamaño máximo del grano del material.

Esta relación lineal entre la masa de la muestra y tamaño máximo del grano del material se presenta en forma gráfica en la figura 4.

Figura 4. **Relación del tamaño de muestra y granulometría del material**



Fuente: LÓPEZ JIMENO, Carlos. Manual de perforación y voladura de rocas. p. 231.

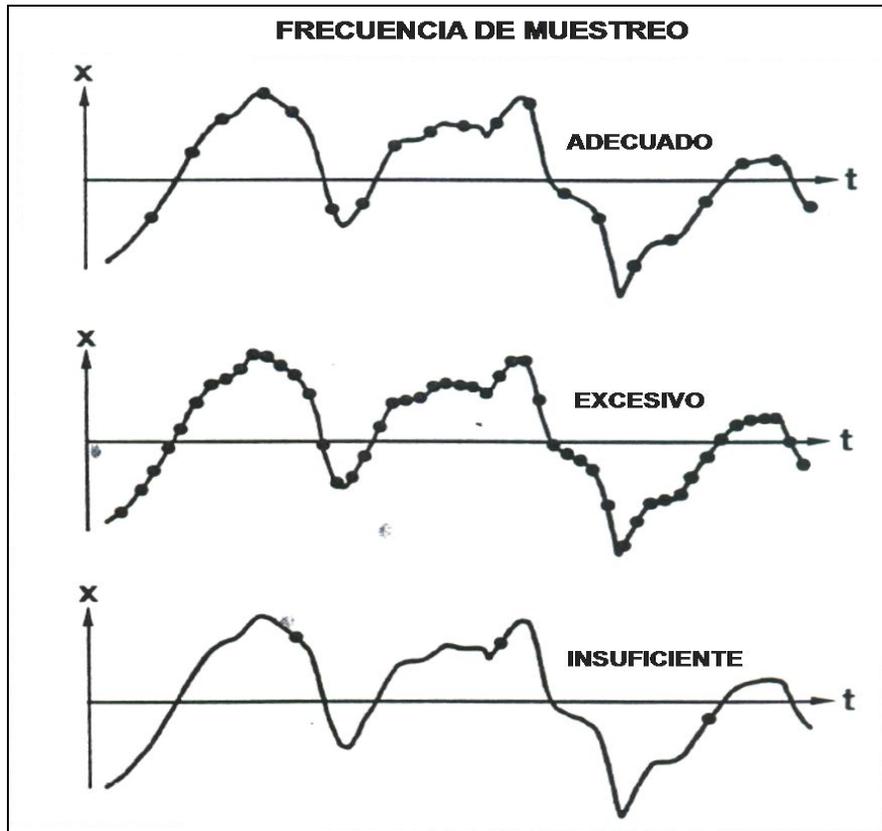
La precisión del muestreo, depende directamente, del número de muestras primarias a obtener, ya que la variación del valor medio de las  $n$  muestras es  $n$  veces menor a la variación del valor de una única muestra.

Por lo tanto, si la variación es conocida para una determinada cantidad de material, el número de muestras puede calcularse para establecer la precisión de muestreo deseada. Esta regla; sin embargo, sólo aplica si todas las muestras provienen de una misma población. Si la media de la característica observada cambia con el tiempo, muestras tomadas en diferentes momentos, ya no pueden ser consideradas provenientes de una misma población.

La figura 5 ilustra diferentes escenarios de frecuencia de muestreo respecto a la variabilidad de la característica observada del material, ejemplificando también si ésta es suficiente o no.

Otra forma de determinar el tamaño y cantidad óptima de la muestra se basa en experimentar con la toma de diferentes cantidades de muestras, cuyo valor medio se compara con la característica evaluada ya conocida.

Figura 5. **Diferentes escenarios de frecuencia de muestreo**



Fuente: LÓPEZ JIMENO, Carlos. Manual de perforación y voladura de rocas. p. 239.

## 2.2. **Fiabilidad de los resultados de la prueba**

El muestreo y las pruebas de análisis para determinar una característica, consiste en una serie de pasos independientes. La fiabilidad del resultado final depende de la validez individual de cada uno de estos pasos. Tres tipos de error pueden ocurrir en cada paso, denominados:

- Errores sistemáticos: causan un sesgo del valor estimado de una característica determinada en relación con el valor real (desconocido). Éstos son ocasionados por: muestreo incorrecto (no representativo), incorrecta preparación de la muestra, por el mal funcionamiento de los instrumentos de medición, por mala calibración de los equipos, o por peculiaridades específicas de las personas que realizan las pruebas. Los errores sistemáticos pueden ser detectados realizando pruebas de control cruzado, utilizando pruebas alternativas, estos errores pueden ser relevantes para el resultado final, los cuales requieren su detección y eliminación, o pueden ser irrelevantes, usualmente para esta condición el error es relativamente constante.
  
- Errores al azar: surgen debido a la heterogeneidad inherente del material a muestrear, a la preparación de la muestra y a las técnicas de análisis. La cantidad de errores al azar puede expresarse en mediciones estadísticas de variabilidad, tal como la varianza y desviación estándar. Los errores al azar no pueden eliminarse más, sino reducirse por medio de:
  - Repetición, por ejemplo la extracción de más muestras primarias, realizar varias veces, mediciones en mayor cantidad de muestras individuales.
  - Implementar procedimientos precisos y asegurar la calibración de instrumentos de preparación y análisis.
  
- Error bruto: surgen de la mala aplicación de procedimientos, de lecturas erróneas, errores en la copia o transcripción de datos, errores de cálculo, etc. Estos errores pueden influir considerablemente en las evaluaciones

estadísticas. Normalmente se muestran como valores atípicos en una serie de datos.

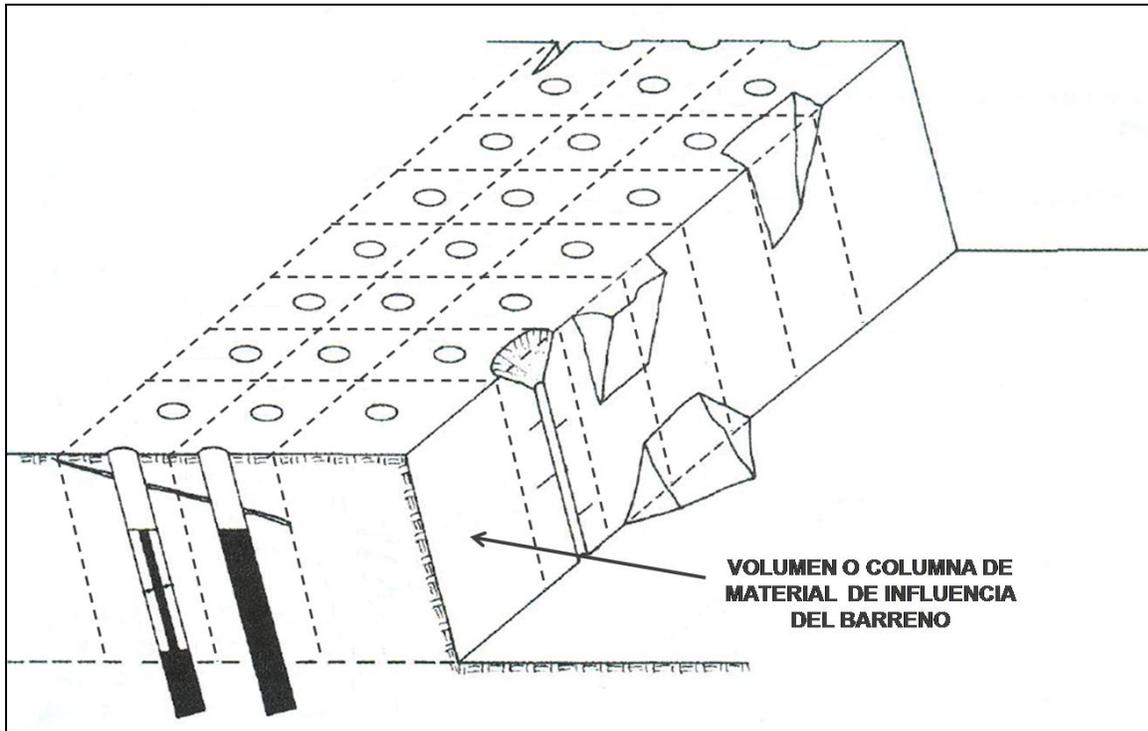
### **2.3. Muestreo de agujeros de barrenación**

En el proceso de perforación de rocas, el detrito de barrenación que se produce, generalmente es un material duro, de granulometría intermedia (menor a 1/2" de diámetro), compacto y de bajo contenido de humedad.

Para obtener un muestreo representativo de la columna de material del banco correspondiente al barreno perforado, el equipo de perforación a utilizar debe poseer un sistema de recolección de polvo.

La figura 6 esquematiza el volumen de influencia de un barreno o la columna de material que representa éste, en una serie de barrenación.

Figura 6. **Volumen de influencia de un barreno**



Fuente: LÓPEZ JIMENO, Carlos. Manual de perforación y voladura de rocas. p. 421.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

En la investigación se distinguieron cuatro partes. En la primera se desarrolló un procedimiento de muestreo del detrito de barrenación generado en el proceso de perforación de rocas, el cual describe los pasos necesarios para asegurar una adecuada obtención, manipulación, preparación y manejo de muestras. Incluyendo también, aspectos de seguridad industrial, orden y limpieza como condiciones necesarias en las áreas, equipos y herramientas de trabajo, esto para asegurar la no contaminación o confusión de muestras y evitar accidentes.

En la segunda parte se determinó el contenido químico de la totalidad de muestras generadas por cada agujero de perforación realizado de una serie de barrenación (4 series de barrenación en total). A cada muestra analizada se le determinó el contenido químico de óxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y pérdida al fuego (PF) ya que, fue necesario corroborar la concordancia de los resultados con valores típicos de calizas o minerales calcáreos. Cada muestra provino del detrito de barrenación generado de cada agujero de perforación de la voladura. Dicho contenido químico de las muestras se determinó por el método de fluorescencia y difracción de rayos X.

En la tercera parte se determinó el contenido químico de óxido de calcio ( $\%\text{CaO}$ ), óxido de magnesio ( $\%\text{MgO}$ ) y óxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de muestras compuestas preparadas *in situ* que representan el 33% y 50% de la totalidad de muestras de la serie de barrenación. Estas muestras compuestas son el

resultado de mezclas homogenizadas compuestas por 2 ó 3 muestras individuales adyacentes entre sí (ver plantillas de perforación que se muestran en el capítulo 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

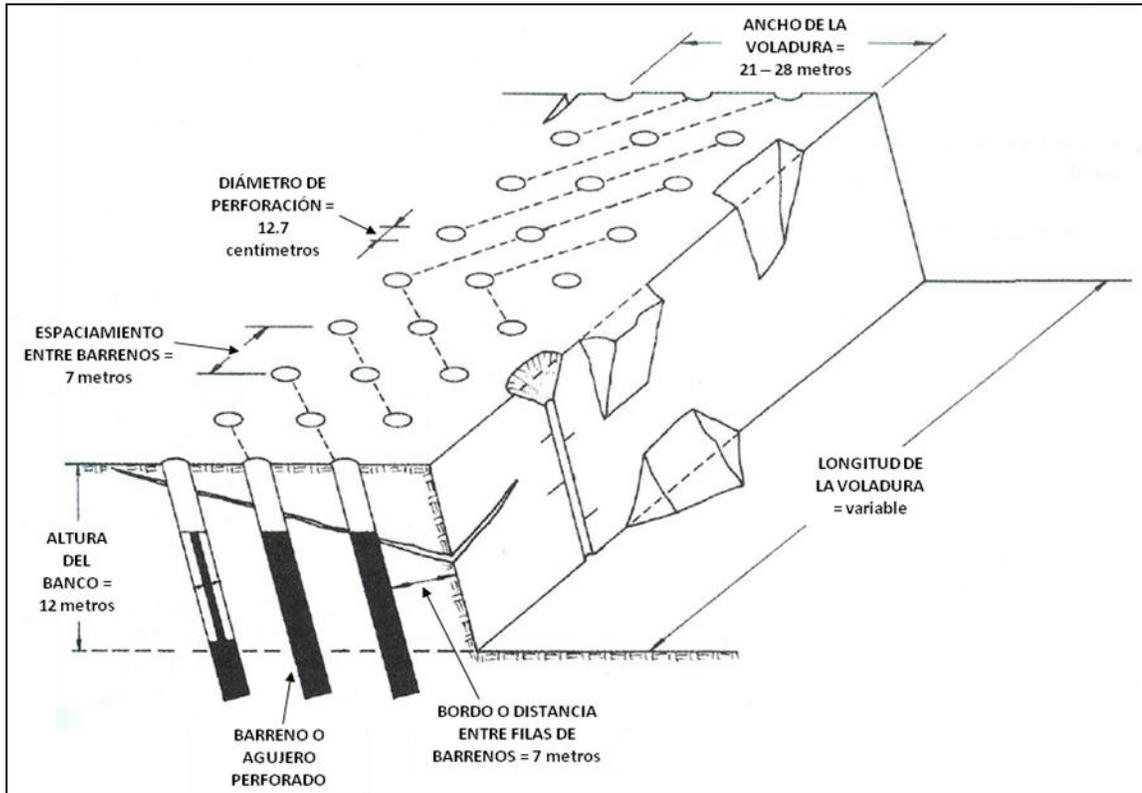
En la cuarta parte y final, se elaboraron gráficos que muestran la ubicación de los 4 bancos de caliza evaluados en la cantera, y cada serie de barrenación muestra las tendencias de su composición química (%SiO<sub>2</sub>, %CaO y %MgO), según escala de colores (ver figuras 8, 9 y 10).

### **3.1. Variables**

Por razones prácticas de la investigación, en la aplicación en el trabajo y costos asociados al análisis de muestras compuestas se determinó por método analítico solamente el contenido químico del óxido de calcio, magnesio y sílice respectivamente (%CaO, %MgO y %SiO<sub>2</sub>), componentes químicos primordiales en las calizas que determinan su utilización como materia prima en los procesos de fabricación de cemento y cal.

Las variables geométricas de los bancos de explotación y las series de barrenación permanecieron constantes, éstas se ilustran en la figura 7.

Figura 7. **Variables geométricas de un banco o plataforma de explotación**



Fuente: LÓPEZ JIMENO, Carlos. Manual de perforación y voladura de rocas. p. 432.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

El presente trabajo de investigación define un procedimiento de muestreo representativo para la caracterización química de bancos de producción de la cantera de caliza de la empresa Cementos Progreso, S.A., planta San Miguel.

La caracterización química de bancos de producción de caliza evaluados forma parte de una operación de minado a cielo abierto, para el suministro de

materias primas a los procesos de fabricación de cemento y cal que se realizan en la planta San Miguel de la empresa Cementos Progreso, S.A.

Dicha caracterización se limitó a determinar los contenidos químicos de las voladuras previo a su utilización como materia prima en los procesos de fabricación de cemento y cal, estableciendo así, los tres principales contenidos químicos de las calizas, siendo éstos el contenido de calcio, magnesio y sílice expresados como porcentaje de óxido de calcio (%CaO), óxido de magnesio (%MgO) y óxido de sílice (%SiO<sub>2</sub>) respectivamente.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Se dispuso de recurso humano capaz y competente para la ejecución del estudio de investigación descrito en la metodología de este diseño de investigación, ya que con la autorización del Gerente de la Planta San Miguel, Dr. Ing. Adolfo Gramajo, este estudio se llevó a cabo dentro de las instalaciones y con el personal encargado de ejecutar las actividades de perforación de bancos de caliza en cantera, ayudantes de barrenación, encargados de la toma y preparación de muestras y de analistas de laboratorio que laboran en el departamento de Control de Calidad de la planta.

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Para la obtención, manipulación, preparación y manejo de muestras del detrito de barrenación se dispone de los siguientes recursos materiales:

- Equipo de protección personal

- Pala metálica rectangular para captar aprox. 1 kg de muestra
- Bolsas plásticas de capacidad para contener aprox. 2 kg de muestra
- Marcador de tinta indeleble
- Cuarteador tipo cruz
- Cuarteador tipo rifle
- Molino de quijadas para laboratorio de preparación de muestras
- Balanza Mettler PR502DR con capacidad máxima de  $500.0g \pm 0.050g$
- Molino de anillos
- Horno eléctrico de convección para secado de muestras
- Bandejas de acero inoxidable con capacidad de 2 litros
- Gotero conteniendo trietanolamina (aditivo de molienda)
- Espátula de 6" de acero inoxidable
- Brocha de 2"

Para la determinación del contenido químico de calcio, magnesio y sílice de las muestras expresado en óxidos, se dispone de los siguientes recursos materiales:

- Equipo de difracción de rayos X, marca ARL, modelo 9800, para determinación de óxidos en pastilla prensada.
- Analizador en línea marca Thermo Electron, para determinación de óxidos en minerales triturados transportados por bandas.

### **3.5. Técnica cuantitativa**

Consistió de tres partes, siendo éstas:

Caracterización química de los 4 bancos de caliza evaluados: utilizando el 100% de las muestras obtenidas del detrito de barrenación de las series de perforación conformadas por un determinado número de agujeros barrenados (ver tabla 2). Cada serie de perforación se localiza en diferentes zonas de la cantera identificadas por bloques según:

Tabla II. **Localización de las series de barrenación**

Serie de barrenación (Serie)	Localización de la serie dentro de la cantera (Bloque)	No. de agujeros de perforación de la que consta la serie de barrenación (n)
1	norte	23
2	sur	26
3	noreste	42
4	noroeste	34

Fuente: elaboración propia.

Inter comparación entre composiciones químicas de los 4 bloques evaluados para validar el concepto geológico: para validar el concepto geológico del depósito mineral de caliza en la cantera, se realizó la inter comparación Anova, entre las composiciones químicas (%CaO, %MgO y %SiO<sub>2</sub>) del 100% de las muestras analizadas de las cuatro series de barrenación evaluadas, definiendo así la matriz experimental que se muestra en la tabla III.

Tabla III. **Matriz experimental para la intercomparación entre muestras**

Bloque	Norte	Sur	Noroeste	Noreste
Norte		%CaO, %MgO, %SiO <sub>2</sub>	%CaO, %MgO, %SiO <sub>2</sub>	%CaO, %MgO, %SiO <sub>2</sub>
Sur			%CaO, %MgO, %SiO <sub>2</sub>	%CaO, %MgO, %SiO <sub>2</sub>
Noroeste				%CaO, %MgO, %SiO <sub>2</sub>

Fuente: elaboración propia.

Determinación del número adecuado de muestras a recolectar en una serie de barrenación para su caracterización química: mediante análisis estadístico, Anova, para cada bloque en la cantera donde se realizan series de barrenación, se determinó el porcentaje de muestras necesarias a recolectar (33% ó 50%) del total de la serie de barrenación para su caracterización química.

### 3.6. **Recolección y ordenamiento de la información**

Para la elaboración del procedimiento de muestreo del detrito de barrenación en bancos de caliza, la información se recolectó en un procedimiento escrito que contiene las siguientes partes que conformaran dicho documento:

- Objetivo
- Alcance
- Definiciones
- Equipo, cristalería y reactivos utilizados
- Equipo de seguridad a utilizar (EPP)
- Responsabilidades
- Consideraciones de seguridad
- Consideraciones ambientales
- Descripción
- Anexos

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Los resultados analíticos de la composición química de las muestras del detrito de barrenación evaluados por método de difracción de rayos X se tabulan como se muestra en la tabla IV.

Tabla IV. **Serie de barrenación del bloque norte – muestras primarias**

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA PRIMARIA										
AGUJERO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF	TOTAL
1	1.5	0.9	0.3	43.3	9.6	0.1	0.1	0.2	44.6	100.4
2	1.6	0.8	0.2	45.8	8.5	0.1	0.1	0.3	43.9	101.2
3	1.9	1.1	0.3	51.0	2.5	0.0	0.1	0.2	44.2	101.3
4	1.1	0.6	0.2	42.7	10.0	0.0	0.1	0.3	45.0	99.9
5	1.9	1.0	0.3	38.0	14.3	0.1	0.1	0.3	45.7	101.6
6	1.1	0.7	0.2	39.8	13.0	0.1	0.1	0.1	45.0	99.9
7	1.4	0.7	0.2	39.1	13.0	0.1	0.1	0.3	45.7	100.4
8	1.4	0.6	0.2	37.9	14.6	0.1	0.0	0.3	45.1	100.1
9	0.9	0.4	0.1	39.0	13.7	0.1	0.0	0.2	45.8	100.2
10	3.5	1.5	0.4	40.2	10.6	0.1	0.2	0.1	44.0	100.6
11	1.7	0.8	0.2	45.4	7.1	0.0	0.1	0.3	44.0	99.6
12	1.7	0.5	0.2	42.7	10.0	0.0	0.1	0.3	44.6	100.1
13	2.5	1.0	0.3	45.4	7.2	0.0	0.1	0.3	43.6	100.3
14	1.9	1.4	0.3	49.7	1.6	0.0	0.1	0.2	43.1	98.8
15	2.5	1.1	0.3	49.8	3.2	0.1	0.1	0.2	42.9	100.6
16	1.8	0.6	0.1	51.7	4.7	0.1	0.1	0.2	43.0	102.7
17	2.3	0.8	0.2	42.7	9.0	0.1	0.1	0.2	45.1	101.0
18	0.9	1.0	0.2	42.1	10.3	0.1	0.1	0.2	45.9	101.2
19	0.6	0.6	0.1	47.3	6.1	0.1	0.1	0.2	45.8	101.2
20	1.3	0.7	0.2	47.9	5.0	0.1	0.1	0.2	44.2	100.1
21	0.9	0.9	0.2	51.9	1.9	0.0	0.1	0.2	43.1	99.7
22	2.0	2.2	0.4	34.9	15.0	0.1	0.1	0.2	44.5	99.8
23	1.4	1.2	0.2	36.1	14.9	0.1	0.1	0.2	44.8	99.5

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la planta San Miguel.

Tabla V. **Serie de barrenación del bloque sur – muestras primarias**

AGUJERO	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA PRIMARIA									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF	TOTAL
1	0.7	0.4	0.1	54.7	0.5	0.1	0.1	0.1	43.1	99.8
2	1.5	0.4	0.1	55.1	0.4	0.1	0.1	0.1	42.7	100.4
3	1.3	0.5	0.2	54.2	0.4	0.1	0.1	0.1	42.7	99.5
4	1.0	0.4	0.1	52.9	1.7	0.1	0.1	0.1	44.2	100.5
5	1.2	0.5	0.2	52.1	2.6	0.1	0.1	0.1	42.6	99.4
6	0.8	0.4	0.1	54.6	0.5	0.1	0.1	0.1	42.8	99.3
7	0.9	0.5	0.2	52.4	3.0	0.1	0.1	0.1	43.3	100.5
8	1.0	0.5	0.2	52.0	3.2	0.1	0.1	0.1	43.5	100.4
9	1.0	0.4	0.1	53.2	1.6	0.1	0.1	0.1	44.1	100.6
10	1.4	0.4	0.1	54.1	0.8	0.1	0.1	0.1	43.8	100.8
11	1.6	0.4	0.2	48.3	5.1	0.1	0.1	0.1	44.4	100.2
12	1.0	0.4	0.1	53.8	0.8	0.1	0.1	0.1	43.9	100.2
13	1.4	0.5	0.2	53.7	0.6	0.1	0.1	0.1	43.8	100.5
14	0.5	0.4	0.1	54.6	1.2	1.1	0.1	0.1	43.9	101.9
15	1.4	0.7	0.2	46.7	6.5	1.1	0.1	0.1	44.4	101.1
16	0.9	0.5	0.2	51.2	3.2	1.1	0.1	0.1	44.4	101.6
17	2.0	0.8	0.2	41.4	10.7	1.1	0.2	0.1	45.0	101.4
18	1.1	0.8	0.3	46.1	7.1	1.1	0.1	0.1	44.0	100.5
19	1.3	1.5	0.4	50.6	4.5	1.1	0.2	0.1	42.4	102.0
20	1.1	0.7	0.2	48.0	5.6	1.1	0.1	0.1	44.0	100.9
21	0.9	0.6	0.2	49.6	3.8	1.1	0.1	0.1	43.8	100.1
22	0.7	0.4	0.1	52.6	2.3	1.1	0.1	0.1	43.3	100.7
23	1.2	0.5	0.2	51.3	3.3	1.1	0.1	0.1	43.2	100.9
24	0.8	0.5	0.2	50.3	4.6	1.1	0.1	0.1	43.8	101.4
25	1.1	0.6	0.2	52.0	2.6	1.1	0.1	0.1	43.9	101.6
26	0.9	0.5	0.2	47.7	6.4	1.1	0.1	0.1	44.4	101.3

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la planta San Miguel.

Tabla VI. **Serie de barrenación del bloque noreste – muestras primarias**

AGUJERO	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA PRIMARIA									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF	TOTAL
1	1.2	0.5	0.2	53.7	0.5	0.1	0.1	0.1	43.5	99.7
2	1.3	0.5	0.1	54.3	0.7	0.1	0.1	0.1	43.2	100.3
3	1.4	0.6	0.2	53.7	1.1	0.1	0.1	0.1	42.2	99.4
4	0.9	0.4	0.1	54.9	0.6	0.1	0.1	0.1	43.0	100.1
5	0.6	0.5	0.1	55.8	0.6	0.1	0.1	0.1	41.9	99.7
6	2.3	1.1	0.4	53.0	0.6	0.1	0.1	0.1	42.3	99.9
7	0.9	0.4	0.1	54.1	0.5	0.1	0.1	0.1	43.7	100.0
8	1.7	0.7	0.2	54.3	0.5	0.1	0.2	0.1	43.0	100.7
9	2.1	0.8	0.3	53.8	0.6	0.1	0.2	0.1	42.6	100.4
10	1.8	0.8	0.3	53.9	0.6	0.1	0.2	0.1	42.5	100.1
11	2.7	1.1	0.3	52.5	0.6	0.1	0.2	0.1	42.7	100.2
12	2.0	0.8	0.2	54.3	0.5	0.1	0.2	0.1	42.4	100.5
13	1.0	0.4	0.1	54.9	0.5	0.1	0.1	0.1	43.2	100.2
14	1.6	0.5	0.2	54.4	0.5	0.1	0.1	0.1	42.8	100.2
15	1.7	0.6	0.2	53.5	0.9	0.1	0.1	0.1	43.6	100.7
16	1.5	0.5	0.1	54.0	0.6	0.1	0.1	0.1	43.2	100.1
17	1.1	0.4	0.1	54.1	0.5	0.1	0.1	0.1	44.1	100.5
18	1.2	0.5	0.2	53.7	0.7	0.1	0.1	0.1	44.0	100.5
19	0.5	0.3	0.1	54.8	0.2	0.1	0.1	0.1	43.4	99.6
20	1.7	0.7	0.2	53.8	0.5	0.1	0.1	0.1	42.7	99.9
21	1.3	0.6	0.2	53.5	0.6	0.1	0.1	0.1	43.1	99.6
22	1.6	0.6	0.2	54.2	0.6	0.1	0.1	0.1	42.8	100.3
23	2.7	1.0	0.3	53.2	0.6	0.1	0.2	0.1	42.1	100.3
24	1.0	0.6	0.2	54.3	0.6	0.1	0.1	0.1	43.1	100.0
25	0.7	0.4	0.1	55.1	0.5	0.1	0.1	0.1	42.9	99.9
26	1.0	0.4	0.1	55.2	0.5	0.1	0.1	0.1	42.7	100.2
27	1.7	0.7	0.2	54.0	0.6	0.1	0.2	0.1	42.6	99.9
28	1.2	0.5	0.1	53.7	0.5	0.1	0.1	0.1	43.1	99.4
29	0.2	0.3	0.1	54.6	1.5	1.1	0.1	0.1	44.0	102.0
30	1.8	0.6	0.2	52.3	2.1	1.1	0.1	0.1	43.5	101.7
31	2.1	0.7	0.3	51.2	1.8	1.1	0.2	0.1	43.9	101.3
32	1.3	0.5	0.2	54.5	0.6	1.1	0.1	0.1	43.5	101.8
33	0.5	0.3	0.1	54.8	0.4	1.1	0.1	0.1	43.9	101.3
34	1.0	0.4	0.1	54.5	0.4	1.1	0.1	0.1	43.4	101.1
35	1.5	0.5	0.2	53.7	1.7	1.1	0.1	0.1	43.0	101.8
36	0.9	0.5	0.1	54.7	0.5	1.1	0.1	0.1	43.8	101.8
37	1.1	0.7	0.2	54.4	0.5	1.1	0.1	0.1	43.4	101.5
38	1.0	0.6	0.2	53.3	0.6	1.1	0.1	0.1	43.6	100.5
39	0.5	0.4	0.1	54.9	0.7	1.1	0.1	0.1	43.8	101.7
40	0.5	0.4	0.1	50.8	3.5	1.1	0.1	0.1	43.9	100.3
41	0.5	0.3	0.1	52.6	1.7	1.1	0.1	0.1	43.8	100.2
42	0.7	0.3	0.1	54.7	0.6	1.1	0.1	0.1	43.6	101.2

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la planta San Miguel.

Tabla VII. **Serie de barrenación del bloque noroeste – muestras primarias**

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA PRIMARIA										
AGUJERO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF	TOTAL
1	3.2	1.0	0.3	52.3	0.6	0.1	0.3	0.1	42.6	100.4
2	1.2	0.5	0.2	55.1	0.5	0.1	0.1	0.1	43.8	101.5
3	6.9	1.6	0.7	48.7	0.6	0.1	0.4	0.1	40.5	99.6
4	3.0	1.2	0.3	52.1	0.4	0.1	0.2	0.1	42.6	99.8
5	3.7	1.6	0.3	51.1	0.5	0.1	0.2	0.1	42.4	100.0
6	3.0	1.0	0.2	51.9	0.4	0.1	0.2	0.1	42.5	99.3
7	1.6	0.7	0.3	53.6	0.5	0.1	0.1	0.1	43.3	100.2
8	0.5	0.4	0.1	55.0	0.5	0.1	0.1	0.1	43.8	100.4
9	4.1	0.9	0.3	51.6	0.5	0.1	0.2	0.1	42.5	100.1
10	1.1	0.5	0.1	53.9	0.5	0.1	0.1	0.1	43.5	99.7
11	1.5	0.7	0.2	53.4	0.3	0.1	0.2	0.1	42.2	98.7
12	1.4	0.8	0.2	52.8	0.4	0.1	0.2	0.1	42.4	98.2
13	1.2	0.5	0.1	53.1	0.4	0.1	0.1	0.1	43.2	98.8
14	3.1	1.3	0.4	52.3	0.4	0.1	0.2	0.1	41.6	99.5
15	2.9	1.5	0.4	52.0	0.4	0.1	0.3	0.1	41.5	99.2
16	3.6	1.5	0.5	51.6	0.5	0.1	0.2	0.1	41.3	99.3
17	4.1	1.6	0.5	51.7	0.4	0.1	0.3	0.1	41.3	100.0
18	2.8	1.3	0.4	52.9	0.4	0.1	0.3	0.1	41.7	99.9
19	2.3	1.1	0.3	53.1	0.5	0.1	0.2	0.1	41.8	99.4
20	0.7	0.5	0.1	55.7	0.3	0.1	0.1	0.1	41.8	99.3
21	2.3	1.1	0.2	53.7	0.5	0.1	0.2	0.1	42.7	100.8
22	7.2	3.0	0.7	48.5	0.8	0.1	0.4	0.1	38.7	99.5
23	6.7	2.3	0.8	48.9	0.7	0.1	0.4	0.1	40.4	100.4
24	3.8	1.5	0.4	51.6	0.6	0.1	0.3	0.1	41.7	100.1
25	11.2	3.1	1.1	43.6	2.9	1.1	0.5	0.1	36.9	100.4
26	11.1	2.9	0.9	46.5	0.8	1.1	0.5	0.1	36.9	100.7
27	5.6	1.6	0.5	51.5	0.8	1.1	0.3	0.1	39.8	101.3
28	2.1	0.6	0.2	54.6	0.4	1.1	0.2	0.1	41.4	100.6
29	0.2	0.3	0.1	56.4	0.3	1.1	0.1	0.1	41.8	100.3
30	0.6	0.3	0.1	54.7	0.4	1.1	0.1	0.1	44.0	101.2
31	0.8	0.3	0.1	54.8	0.4	1.1	0.1	0.1	43.8	101.5
32	3.5	0.7	0.2	52.8	0.4	1.1	0.2	0.1	42.3	101.3
33	5.5	2.0	0.7	50.6	0.6	1.1	0.4	0.1	40.4	101.3
34	10.4	3.3	1.0	46.2	0.9	1.1	0.6	0.1	38.5	102.0

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la planta San Miguel.

Tabla VIII. **Serie de barrenación del bloque norte – muestras compuestas**

AGUJEROS	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
1-2	1.5	45.9	8.8
3-4	1.5	45.7	6.1
5-6	1.6	39.2	13.3
7-8	1.4	37.4	14.1
9-10	2.2	39.0	11.9
11-12	1.8	45.3	8.7
13-14	2.1	48.0	4.3
15-23	1.9	42.0	8.9
16-17	2.0	48.2	7.0
18-19	0.8	43.7	8.2
20-21	1.1	48.5	3.5

AGUJEROS	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
1-9-16	1.3	42.5	9.0
2-10-17	2.4	44.0	9.7
3-11-18	1.6	44.7	6.8
4-12-19	1.1	46.0	8.3
5-13-20	1.8	44.3	8.9
6-14-21	1.3	46.3	5.8
7-15-22	1.8	39.2	10.0

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la planta San Miguel.

Tabla IX. **Serie de barrenación del bloque sur – muestras compuestas**

AGUJEROS	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
1-2	1.1	55.6	0.5
3-4	1.2	54.4	1.1
5-6	1.0	54.3	1.6
7-8	1.0	51.3	3.1
9-17	1.5	48.2	6.1
15-16	1.2	49.8	4.9
13-14	1.0	53.4	0.9
11-12	1.3	52.0	3.0
10-18	1.2	50.7	3.9
19-20	1.2	48.7	5.1
21-22	0.8	51.9	3.1
23-24	1.0	51.7	4.0
25-26	1.0	49.1	4.4

AGUJEROS	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
1-10-18	1.0	49.9	2.8
2-11-19	1.5	49.3	3.4
3-12-20	1.2	54.4	2.3
4-13-21	1.1	50.2	2.1
5-14-22	0.8	55.7	2.1
6-15-23	1.1	49.0	3.5
7-16-24	0.9	53.8	3.8
8-17-25	1.4	46.4	5.7

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la planta San Miguel.

Tabla X. **Serie de barrenación del bloque noreste – muestras compuestas**

AGUJEROS	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
1-2	1.2	53.2	0.6
3-4	1.2	55.5	0.9
5-6	1.5	53.4	0.6
7-8	1.3	55.2	0.5
9-10	2.0	52.5	0.6
11-21	2.0	53.8	0.6
19-20	1.1	53.7	0.4
17-18	1.2	54.8	0.6
15-16	1.6	52.6	0.8
13-14	1.2	55.6	0.5
12-22	1.9	53.5	0.6
23-33	1.6	54.7	0.5
24-34	1.1	53.4	0.5
25-35	1.1	55.3	1.1
26-36	1.0	54.7	0.5
27-37	1.4	55.3	0.6
28-38	1.1	52.6	0.5
29-39	0.4	55.8	1.2
30-40	1.1	50.5	2.9
31-41	1.3	52.7	1.8
32-42	1.0	53.6	0.6

AGUJEROS	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
1-2-12	1.5	51.9	0.6
3-13-14	1.4	55.0	0.7
4-5-15	1.0	52.1	0.7
6-16-17	1.7	55.7	0.6
7-8-18	1.3	56.0	0.6
9-19-20	1.5	52.0	0.5
10-11-21	1.9	54.8	0.6
22-23-33	1.7	55.2	0.5
24-34-35	1.2	52.7	0.9
25-26-36	0.9	55.3	0.5
27-37-38	1.2	54.6	0.6
28-29-39	0.7	52.5	0.9
30-40-41	0.9	53.9	2.5
31-32-42	1.4	51.5	1.0

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la planta San Miguel.

Tabla XI. **Serie de barrenación del bloque noroeste – muestras compuestas**

AGUJEROS	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	AGUJEROS	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
1-2	2.2	54.7	0.6	1-2-10	1.9	52.1	0.5
3-4	4.8	51.3	0.5	3-11-12	3.2	50.2	0.5
5-6	3.3	50.3	0.4	4-5-13	2.8	53.7	0.4
7-8	1.1	53.5	0.5	6-14-15	2.9	53.3	0.4
9-17	4.0	51.3	0.5	7-8-16	2.0	55.2	0.5
15-16	3.3	50.9	0.5	9-17-26	6.6	47.6	0.5
13-14	2.1	53.0	0.4	25-33-34	8.7	49.0	1.5
11-12	1.5	53.6	0.4	23-24-32	4.9	52.7	0.6
10-18	2.0	53.0	0.4	22-30-31	2.7	52.0	0.5
19-20	1.5	53.9	0.4	20-21-29	1.1	54.3	0.4
21-22	4.8	52.2	0.6	19-27-28	3.2	53.8	0.5
23-24	5.4	51.2	0.6				
25-26	11.3	46.0	1.8				
33-34	7.8	47.9	0.8				
31-32	2.2	53.2	0.4				
29-30	0.4	54.9	0.4				
27-28	4.0	52.0	0.6				

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la planta San Miguel.

### **3.8. Análisis estadístico**

Mediante el método de análisis de varianza de un solo factor (ANOVA), para cada serie de barrenación de cada bloque de la cantera se determinó el porcentaje de muestras compuestas a recolectar del total de muestras primarias del detrito de barrenación generadas de cada serie con el fin de no perder representatividad al momento de realizar su caracterización química.

Para realizar dicho análisis de comparación entre el contenido químico promedio de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO del 33% ± 5 y 50% ± 5 del total de las muestras de una serie de barrenación, y el contenido químico promedio del 100% de las muestras, y determinar si estadísticamente no existen diferencias significativas entre sí, se utilizó la función de *Data Analysis ANOVA Single Factor* del programa informático Microsoft Excel versión 2007.



## 4. RESULTADOS

En las tablas XII a la XV se muestran los resultados del contenido químico promedio de %SiO<sub>2</sub>, %CaO y %MgO del 33% ± 5 y el 50% ± 5 de muestras obtenidas del total de una serie de barrenación por bloque de forma independiente (comparación de las medias poblacionales inter bloque), para los bloques de caliza en la cantera identificados como bloque norte, sur, noreste y noroeste. También muestran los valores estadísticos de desviación estándar, media, varianza, y mediante tablas de ANOVA, indican el factor estadístico F, la probabilidad P y el factor crítico F<sub>CRIT.</sub> Éstos para determinar la significancia entre contenidos químicos en función del número o porcentaje de muestras a tomar en una serie de barrenación (33% y 50% de las muestras).

La tabla XVI muestra los resultados del contenido químico promedio de %SiO<sub>2</sub>, %CaO y %MgO del 100% de las muestras generadas para cada una de las 4 series de barrenación por bloque de forma dependiente (comparación de medias poblacionales entre bloques). También muestran los valores estadísticos de desviación estándar, media, varianza y mediante tablas de ANOVA, indican el factor estadístico F, la probabilidad P y el factor crítico F<sub>CRIT.</sub> Estos para determinar la significancia entre contenidos químicos en función de la ubicación del bloque a caracterizar (validación del concepto geológico).

Las figuras 8 a la 10 muestran en forma gráfica la tendencia en escala de colores, la composición química de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO del depósito mineral de caliza en la cantera, por bloques y zonas geológicas ya existentes.

Tabla XII. Análisis de varianzas entre muestras del bloque norte

<b>ANOVA %CaO bloque norte</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	23	1004.34	43.67	26.25		
50% de las muestras	11	482.82	43.89	15.72		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.379	1	0.379	0.017	0.899	4.149
Within Groups	734.697	32	22.959			
Total	735.076	33				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	23	1004.34	43.67	26.25		
33% de las muestras	7	306.89	43.84	5.83		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.163	1	0.163	0.007	0.932	4.196
Within Groups	612.495	28	21.875			
Total	612.658	29				
<b>ANOVA %MgO bloque norte</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	23	205.58	8.94	19.21		
50% de las muestras	11	94.77	8.62	11.65		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.775	1	0.775	0.046	0.831	4.149
Within Groups	539.142	32	16.848			
Total	539.917	33				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	23	205.58	8.94	19.21		
33% de las muestras	7	58.38	8.34	2.37		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	1.921	1	1.921	0.123	0.728	4.196
Within Groups	436.874	28	15.603			
Total	438.794	29				
<b>ANOVA %SiO2 bloque norte</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	23	37.79	1.64	0.43		
50% de las muestras	11	17.90	1.63	0.19		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.002	1	0.002	0.005	0.943	4.149
Within Groups	11.288	32	0.353			
Total	11.290	33				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	23	37.79	1.64	0.43		
33% de las muestras	7	11.28	1.61	0.20		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.005	1	0.005	0.014	0.906	4.196
Within Groups	10.598	28	0.379			
Total	10.604	29				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Análisis de varianzas entre muestras del bloque sur

<b>ANOVA %CaO bloque sur</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	26	1332.88	51.26	10.84		
50% de las muestras	13	670.82	51.60	5.39		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.984	1	0.984	0.108	0.744	4.105
Within Groups	335.619	37	9.071			
Total	336.603	38				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	26	1332.88	51.26	10.84		
33% de las muestras	8	408.65	51.08	10.06		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.206	1	0.206	0.019	0.890	4.149
Within Groups	341.300	32	10.666			
Total	341.506	33				
<b>ANOVA %MgO bloque sur</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	26	82.73	3.18	6.60		
50% de las muestras	13	41.57	3.20	3.10		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.002	1	0.002	0.000	0.984	4.105
Within Groups	202.171	37	5.464			
Total	202.173	38				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	26	82.73	3.18	6.60		
33% de las muestras	8	25.81	3.23	1.46		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.012	1	0.012	0.002	0.963	4.149
Within Groups	175.175	32	5.474			
Total	175.187	33				
<b>ANOVA %SiO2 bloque sur</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	26	28.44	1.09	0.11		
50% de las muestras	13	14.41	1.11	0.04		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.002	1	0.002	0.022	0.883	4.105
Within Groups	3.105	37	0.084			
Total	3.106	38				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	26	28.44	1.09	0.11		
33% de las muestras	8	8.97	1.12	0.06		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.005	1	0.005	0.048	0.829	4.149
Within Groups	3.086	32	0.096			
Total	3.091	33				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Análisis de varianzas entre muestras del bloque noreste

<b>ANOVA %CaO bloque noreste</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	42	2265.28	53.94	0.98		
50% de las muestras	21	1132.13	53.91	1.81		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.008	1	0.008	0.007	0.936	3.998
Within Groups	76.330	61	1.251			
Total	76.339	62				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	42	2265.28	53.94	0.98		
33% de las muestras	14	753.12	53.79	2.59		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.209	1	0.209	0.152	0.698	4.020
Within Groups	73.908	54	1.369			
Total	74.116	55				
<b>ANOVA %MgO bloque noreste</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	42	32.73	0.78	0.35		
50% de las muestras	21	16.70	0.80	0.32		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.004	1	0.004	0.010	0.919	3.998
Within Groups	20.868	61	0.342			
Total	20.871	62				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	42	32.73	0.78	0.35		
33% de las muestras	14	11.33	0.81	0.27		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.009	1	0.009	0.028	0.867	4.020
Within Groups	18.030	54	0.334			
Total	18.040	55				
<b>ANOVA %SiO2 bloque noreste</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	42	54.31	1.29	0.35		
50% de las muestras	21	27.17	1.29	0.14		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.000	1	0.000	0.000	0.996	3.998
Within Groups	17.226	61	0.282			
Total	17.226	62				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	42	54.31	1.29	0.35		
33% de las muestras	14	18.21	1.30	0.12		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.001	1	0.001	0.002	0.964	4.020
Within Groups	15.934	54	0.295			
Total	15.935	55				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Análisis de varianzas entre muestras del bloque noroeste

<b>ANOVA %CaO bloque noroeste</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	34	1767.93	52.00	7.84		
50% de las muestras	17	882.93	51.94	5.34		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.042	1	0.042	0.006	0.939	4.038
Within Groups	344.015	49	7.021			
Total	344.057	50				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	34	1767.93	52.00	7.84		
33% de las muestras	11	573.93	52.18	5.47		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.262	1	0.262	0.036	0.851	4.067
Within Groups	313.316	43	7.286			
Total	313.578	44				
<b>ANOVA %MgO bloque noroeste</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	34	19.40	0.57	0.19		
50% de las muestras	17	9.67	0.57	0.12		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.000	1	0.000	0.000	0.987	4.038
Within Groups	8.256	49	0.168			
Total	8.256	50				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	34	19.40	0.57	0.19		
33% de las muestras	11	6.26	0.57	0.09		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.000	1	0.000	0.000	0.992	4.067
Within Groups	7.287	43	0.169			
Total	7.287	44				
<b>ANOVA %SiO2 bloque noroeste</b>						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	34	122.78	3.61	8.75		
50% de las muestras	17	61.56	3.62	7.36		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.001	1	0.001	0.000	0.991	4.038
Within Groups	406.341	49	8.293			
Total	406.342	50				
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
100% de las muestras	34	122.78	3.61	8.75		
33% de las muestras	11	39.77	3.62	5.04		
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.000	1	0.000	0.000	0.997	4.067
Within Groups	339.075	43	7.885			
Total	339.075	44				

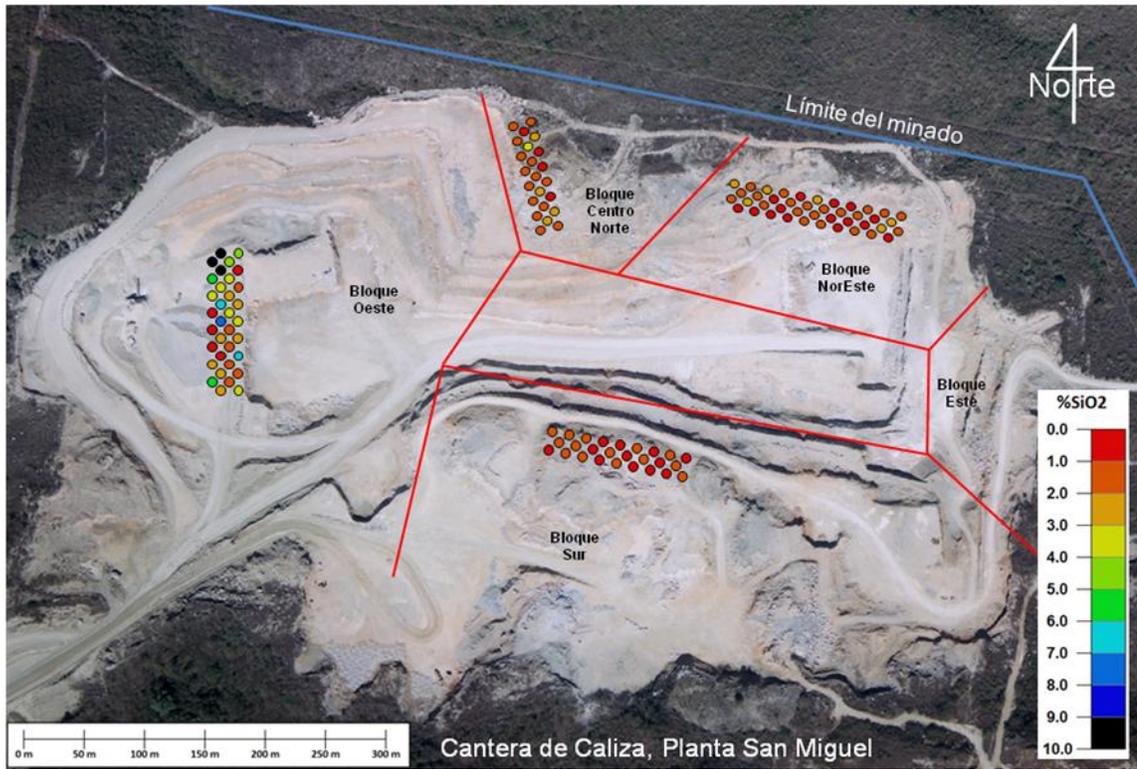
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Análisis de varianzas entre bloques**

<b>Anova: %CaO</b>						
Resumen						
<i>Bloque</i>	<i>No. de muestras</i>	<i>Sumatoria</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
norte	23	1004.34	43.67	26.25		
sur	26	1332.88	51.26	10.84		
noreste	42	2265.28	53.94	0.98		
noroeste	34	1767.93	52.00	7.84		
<i>Fuente de la variación</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Promedio cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad (P)</i>	<i>F crit</i>
Entre bloques	1634.16	3	544.72	57.45	3.66329E-23	2.68
Dentro de los bloques	1147.22	121	9.48			
Total	2781.38	124				
<b>Anova: %MgO</b>						
Resumen						
<i>Bloque</i>	<i>No. de muestras</i>	<i>Sumatoria</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
norte	23	205.58	8.94	19.21		
sur	26	82.73	3.18	6.60		
noreste	42	32.73	0.78	0.35		
noroeste	34	19.40	0.57	0.19		
<i>Fuente de la variación</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Promedio cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad (P)</i>	<i>F crit</i>
Entre bloques	1210.15	3	403.38	80.22	1.23232E-28	2.68
Dentro de los bloques	608.45	121	5.03			
Total	1818.59	124				
<b>Anova: %SiO2</b>						
Resumen						
<i>Bloque</i>	<i>No. de muestras</i>	<i>Sumatoria</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
norte	23	37.79	1.64	0.43		
sur	26	28.44	1.09	0.11		
noreste	42	54.31	1.29	0.35		
noroeste	34	122.78	3.61	8.75		
<i>Fuente de la variación</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Promedio cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad (P)</i>	<i>F crit</i>
Entre bloques	133.17	3	44.39	17.04	2.68654E-09	2.68
Dentro de los bloques	315.13	121	2.60			
Total	448.30	124				

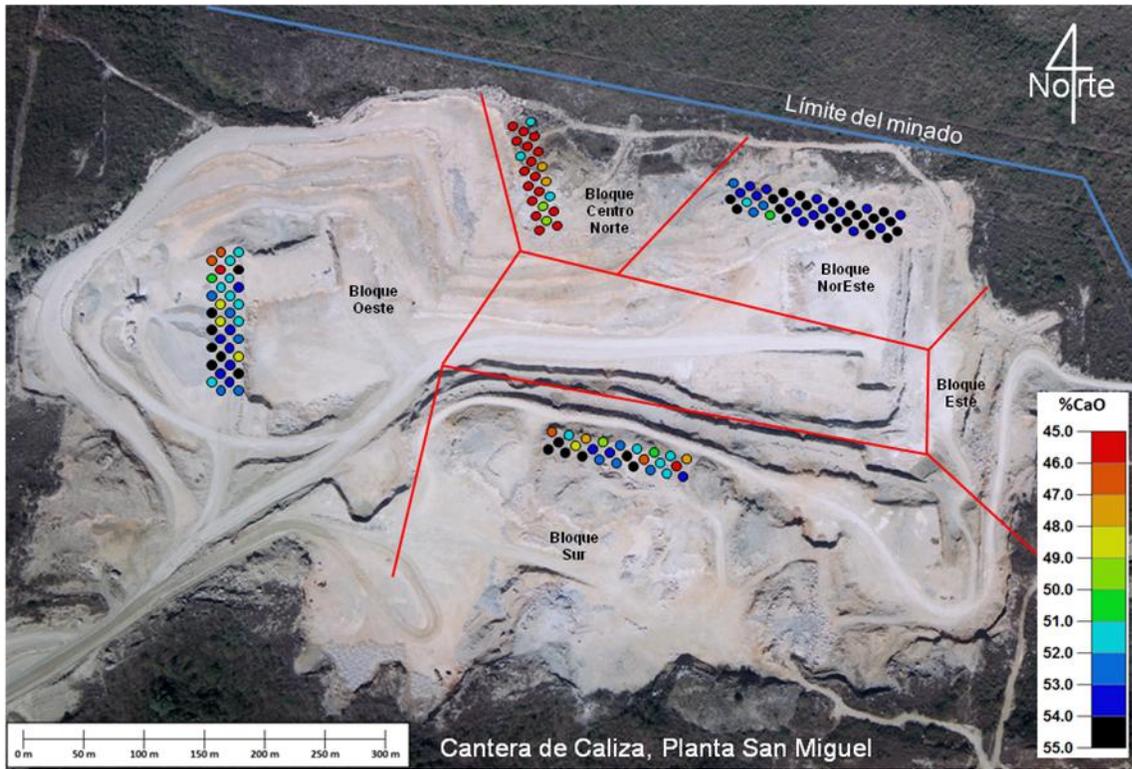
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Bancos de caliza evaluados según el contenido de SiO<sub>2</sub>



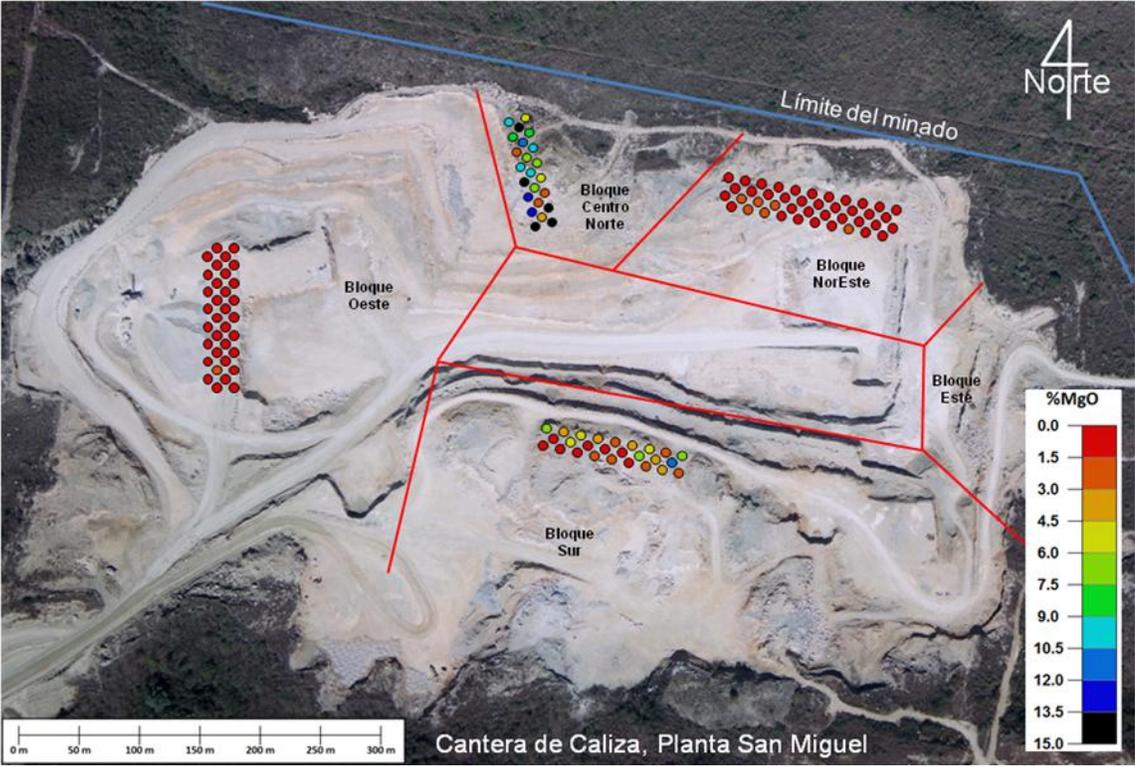
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Bancos de caliza evaluados según el contenido de CaO



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Bancos de caliza evaluados según el contenido de MgO



Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para realizar una intercomparación del contenido químico de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO entre bloques o zonas dentro de la cantera, los valores de la tabla ANOVA que se muestra en la tabla XVI, presenta el valor estadístico de F o factor de Fischer. En este caso el valor de la F o la variación del contenido químico del %CaO, %MgO y % SiO<sub>2</sub> de los cuatro bloques principales de la cantera, siendo éstos 57.45, 80.22 y 17.04 respectivamente.

Para determinar si los resultados anteriores son estadísticamente significativos, es decir, que la probabilidad P de significancia entre contenidos químicos de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO entre los bloques de la cantera sea menor al 5%, el valor de la F debe ser menor al valor crítico para F ( $F_{CRIT}$ ).

En la tabla XVI también se presenta el valor estadístico de la  $F_{CRIT}$ , que es 2.68. Los valores de F para el contenido químico de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO son mucho mayores a la  $F_{CRIT}$  (2.68), los resultados de la prueba son significativos.

Esta significancia concuerda con el concepto geológico de la cantera, es decir, de la información disponible de las campañas de perforación, sondeos geológicos, geología de campo y base de datos históricos del contenido químico de los bancos explotados, existen variaciones significativas en cuanto al contenido químico de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO entre las diferentes zonas o bloques de la cantera.

Esta variación significativa en cuanto al contenido químico de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO a lo largo y ancho del depósito de caliza en la cantera, se debe a que en la zona del área minada actual existen varias fallas geológicas importantes que indican una geología caótica y heterogénea que no permiten evidenciar relación o continuidad de formaciones rocosas similares entre bloques.

Lo anterior permite indicar que cada uno de los bloques definidos en la cantera (bloque norte, sur, noreste y noroeste) poseen contenidos químicos diferentes entre sí y que no existe concordancia, secuencia o tendencias marcadas entre bloques.

En cuanto al contenido de CaO del depósito de caliza en la cantera, los bloques sur, noreste y noroeste presentan valores mayores al 50% mientras que el bloque norte es el que presenta valores menores al 50%. El concepto geológico de la cantera indica que el bloque noreste es donde se encuentran los depósitos de caliza de alta ley, es decir, con mayor contenido de CaO y menor contenido de SiO<sub>2</sub> y MgO.

De igual forma, para contenidos de MgO, la relación es inversa, ya que el bloque norte es el área de la cantera que presenta valores mayores al 5%. Los demás bloques de la cantera poseen valores promedio de MgO que no sobrepasan el 4%. El concepto geológico de la cantera indica que la zona o bloque norte y sur de la cantera son las que poseen mayor grado de Dolomitización. El primero en mayor grado (8.94% vrs. 3.18%).

Singular diferencia se observa en la tabla XVI en cuanto al contenido promedio de SiO<sub>2</sub> en el bloque noroeste (3.61%), ya que el resto de bloques no

presenta valores mayores a 1.64%. De igual forma, el concepto geológico respalda dicho resultado, ya que el bloque noroeste de la cantera de caliza es el área o zona adyacente a depósitos de arcillas, y es donde se presentan las zonas de contacto y/o transición entre caliza y arcillas.

Los valores de las tablas Anova que se muestran las tablas XII a XV presentan los valores estadísticos de F o factor de Fischer para la variación del contenido químico promedio de %CaO, %MgO y %SiO<sub>2</sub> de cada bloque de caliza en la cantera y para el 33% ± 5 y 50% ± 5 de muestras recolectadas en cada serie de barrenación.

De igual forma al Anova realizado en la intercomparación de contenidos promedio entre bloques para validar el concepto geológico de la cantera, discutido al inicio de la interpretación de resultados, para determinar si existe significancia entre contenidos químicos promedio de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO en una misma serie de barrenación de un bloque específico al realizar muestreos que correspondan al 33% ± 5 y 50% ± 5 del total de las muestras generadas, existirá significancia estadística mayor al 5% si los resultados de F de los Anova's realizados son superiores al valor crítico para F ( $F_{CRIT}$ ).

En las tablas XII a la XV los valores de F de los ANOVA's realizados, ninguno de ellos sobrepasa el valor crítico  $F_{CRIT}$ , por ello no existe significancia mayor al 5% (porcentaje de error), ya que el valor máximo de  $F_{CRIT}$  obtenido es de 4,196 mientras que ninguno de los valores F de los ANOVA's sobrepasa 0,997.

Para series de barrenación realizadas en cada uno de los bloques de la cantera, el porcentaje de muestras del total de las generadas puede definirse indistintamente entre  $33\% \pm 5$  ó  $50\% \pm 5$ . Para hacer más eficientes los procesos, abaratar costos, minimizar manipulación de muestras y evitar contaminación de y entre ellas, siempre el porcentaje de muestras a recolectar será el  $33\% \pm 5$ .

Las figuras 8 a la 10 muestran de forma gráfica y en escala de colores el contenido químico promedio de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  de cada serie de barrenación compuesta por determinado número de agujeros de perforación. Cada agujero de perforación se presenta como un círculo, cuya coloración se puede relacionar con la escala a colores del contenido químico promedio de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  respectivamente.

Cada serie de barrenación evaluada se ubica en cada uno de los bloques o zonas geológicas definidas en la cantera. En vistas de planta a escala se muestra el depósito mineral de caliza en la cantera, el límite de minado y la orientación del norte.

En la figura 8 se puede observar que el contenido químico de  $\text{SiO}_2$  en los bloques norte, sur y noroeste son relativamente bajos (por debajo del 3%), mientras que en el bloque noroeste se presentan los contenidos químicos de  $\text{SiO}_2$  más altos (hasta 10%). Esta tendencia de enriquecimiento de  $\text{SiO}_2$  en el bloque noroeste (aumento de presencia de arcillas) es validado por el concepto geológico de la cantera, ya que esta zona es la que está más próxima al oeste a depósitos de arcillas, es decir, de continuar con el minado al oeste del bloque noroeste, las reservas de caliza se agotarían y aflorarían o incrementaría la presencia de arcillas.

En la figura 9 se puede observar que el contenido de CaO en los bloques noroeste, norte y sur son muy variables, ya que abarcan los extremos de la escala de colores indicada en la figura mientras que solamente el bloque noreste presenta cierta homogeneidad en cuanto al contenido de CaO. De igual forma a lo anteriormente descrito, estos resultados validan nuevamente el concepto geológico de la cantera de caliza, ya que éste indica que las zonas en la cantera donde existen depósitos de caliza de mayor pureza en términos de contenido de CaO son las que se ubican en el extremo noreste de la cantera.

En la figura 10 se observa que el contenido de MgO en los bloques norte y sur de la cantera, son los que presentan mayores contenidos químicos de MgO. Para el bloque norte con valores de hasta 15% y para el bloque sur en menor magnitud y hasta valores de 12%. No así para los bloques noreste y noroeste que presentan valores promedio no mayores al 3%. El concepto geológico de la cantera indica que en los bloques norte y sur, existe mayor grado de dolomitización de las calizas y estos resultados nuevamente validan dicho concepto.



## CONCLUSIONES

1. El método de muestreo propuesto en este trabajo de investigación es adecuado para determinar la composición química del contenido de CaO, MgO y SiO<sub>2</sub> de un banco de caliza, al utilizar el detrito de barrenación generado al realizar los agujeros de perforación previo a la voladura.
2. Con base a la caracterización química de los bancos de caliza mediante el método de muestreo del detrito de barrenación de una voladura, se valida el concepto geológico del depósito mineral.
3. Para series de barrenación realizadas en cuales quiera de los bloques de la cantera, es suficiente muestrear el  $33\% \pm 5$  de las muestras generadas del detrito de barrenación para determinar el contenido químico del %SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO de una voladura de producción, sin incurrir en errores mayores al 5%.



## RECOMENDACIONES

1. Como método práctico para validar el concepto geológico de una cantera y definir planes de minado a corto plazo, es conveniente utilizar la información de resultados analíticos disponibles de muestras recolectadas del detrito de barrenación de las voladuras de producción.
2. Para la toma de decisiones al momento de definir la utilización de la caliza como materia prima en los procesos de fabricación de cemento y cal y previo al proceso de extracción de ésta de la cantera, el determinar el contenido químico promedio de SiO<sub>2</sub>, CaO y MgO es imperante, ya que permite definir y optimizar su utilización en los diferentes procesos de planta.



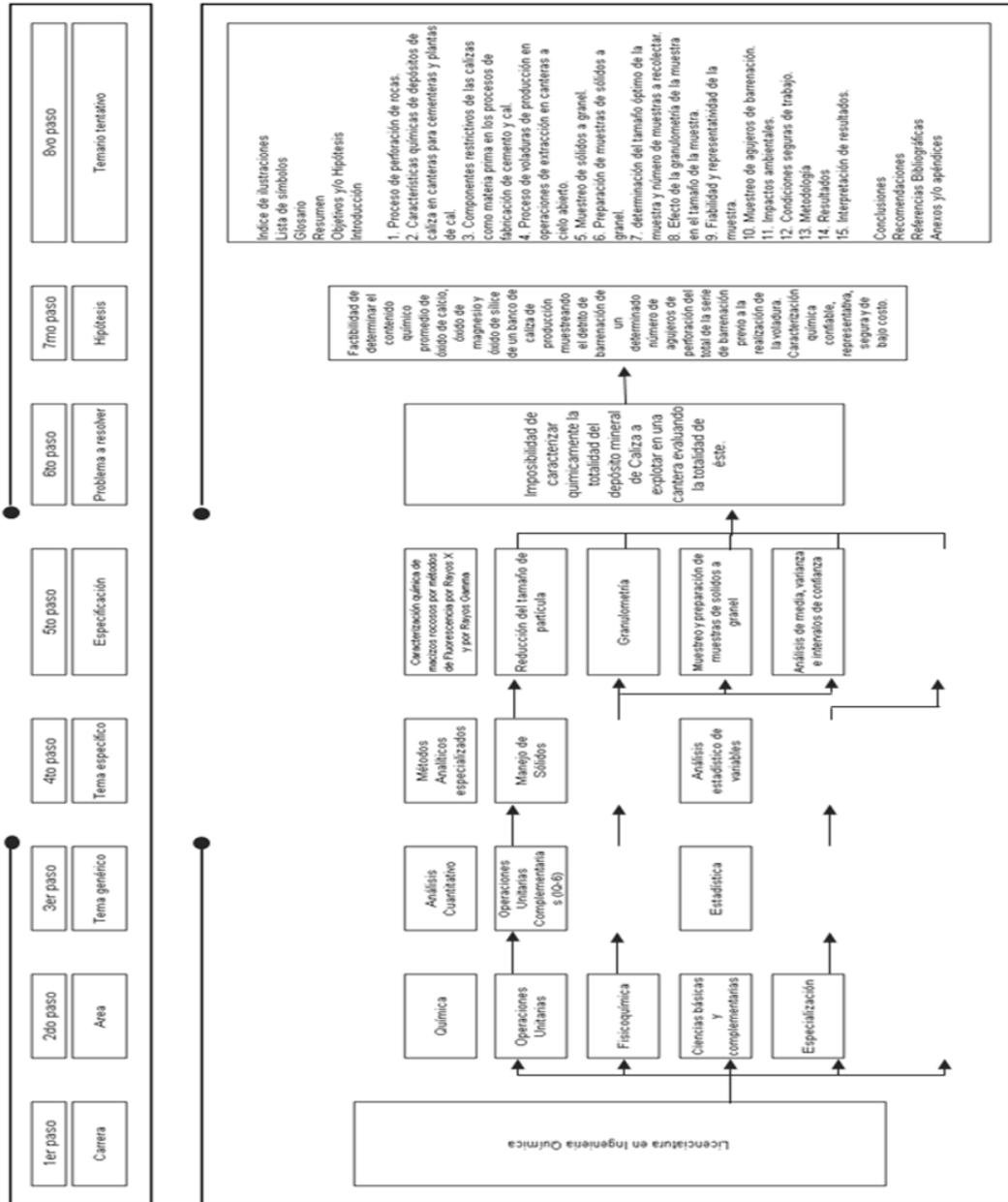
## BIBLIOGRAFÍA

1. LÓPEZ JIMENO, Carlos. *Manual de perforación y voladura de rocas*. España: ETSI Minas, 2003. 466 p.
2. OATES, J.A.H. *Lime and limestone: chemistry and technology, production and uses*. New York: Wiley-VCH, 1998. 293 p.
3. FRANKLIN, John A. *Rock engineering*. New York: McGraw-Hill, 1993. 567 p.



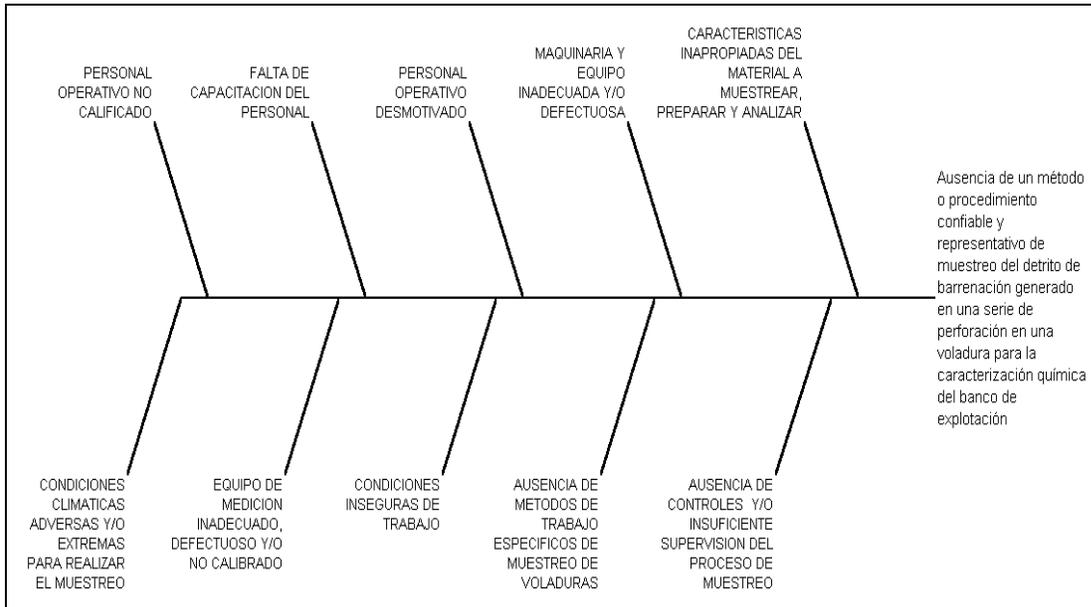
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. **Procedimiento de muestreo del detrito de barrenación**

Para el muestreo del detrito de barrenación, la persona encargada de realizar el muestreo procederá a realizar cuarteos sucesivos de la totalidad del ripio o detrito generado de cada perforación o conjunto de perforaciones (muestras compuestas del detrito de barrenación de 3 agujeros contiguos de perforación), hasta obtener una cantidad de muestra de aproximadamente 1 kilogramo. Para realizar los cuarteos sucesivos, se utilizará un cuarteador designado para ello.

Las muestras obtenidas del detrito de perforación a evaluar serán guardadas cuidadosamente dentro de bolsas plásticas limpias preparadas con anticipación, luego debidamente identificadas y transportadas al laboratorio de la cantera para su preparación.

#### **Preparación de muestras cuya granulometría es menor a ½ pulgada (muestras secas)**

Este procedimiento aplica solamente a muestras, cuya granulometría sea menor a ½" y ya haya pasado por el proceso de secado en el horno.

#### **Procedimiento**

- El preparador añade la totalidad de la muestra en la tolva de recepción del cuarteador con aberturas que pueden oscilar entre 3/4" y 1".

Continuación apéndice 3.

**Procedimiento:**

- El preparador añade la totalidad de la muestra en la tolva de recepción del cuarteador con aberturas que pueden oscilar entre 3/4" y 1".
- La muestra es gradualmente adicionada a la tolva del cuarteador, haciendo uso de una pala o cucharón metálico, descargando la muestra al centro de dicha tolva, con el fin que el material se distribuya equitativamente a ambos lados del cuarteador.
- Una mitad de la muestra se desecha y la otra mitad se utiliza para repetir la secuencia de cuarteos hasta alcanzar la cantidad mínima de 5 kg.

**Preparación final de la muestra**

- Si el tamaño máximo del material es superior a 1/2", ésta se tritura en su totalidad haciéndola pasar por el molino de quijadas con el fin de reducir el tamaño máximo a una granulometría inferior a 3/8".
- Se realizan cuarteos sucesivos con la totalidad de la muestra ya triturada a menos de 3/8" hasta obtener una muestra final de aproximadamente de 1 kg.
- Se coloca esta cantidad en una bandeja metálica limpia y se procede a secar en el horno de bandejas (110-120°C por período de 30 minutos).

Continuación apéndice 3.

- Una vez seca la muestra y llevada a temperatura ambiente, se procede a triturar la totalidad de la muestra haciéndola pasar por el molino de discos. Esto con el fin de reducir su granulometría a un tamaño inferior a MESH 8.
- Se realizan cuarteos sucesivos con la totalidad de la muestra ya triturada a menos de MESH 8 y hasta obtener una muestra final de aproximadamente 150 – 200 gr.
- La totalidad de la muestra anterior se muele en el molino de anillos (Shater) por período de 1 minuto. Esto con el fin de reducir su granulometría a un tamaño inferior a MESH 16. Nota: en este paso se adicionan 3 gotas de aditivo de molienda (Trietanolamina). Esto con el fin de evitar pegaduras de material en los anillos de molienda.
- Se realizan cuarteos sucesivos con la totalidad de la muestra ya triturada a < MESH 16 y hasta obtener una muestra final de aproximadamente 50 gramos.
- Nuevamente la totalidad de la muestra anterior se muele en el molino de anillos (Shater) por período de 1 minuto. Nota: en este paso no se adiciona aditivo de molienda.
- La muestra del paso anterior se divide en dos partes iguales. Cada una de las partes se coloca por separado en una bolsa plástica nueva, limpia y transparente.

Continuación apéndice 3.

- Las dos bolsas que contienen cada una la mitad de la muestra se identifican con cinta adhesiva y marcador según:

1. Tipo de material
2. Fecha de muestreo
3. Procedencia (área, acopio, lote, barco, trituradora, etc.)
4. Destino (material a patio, a galera, a silo, etc.)

Una de las bolsas que contiene la mitad de la muestra se almacena en el laboratorio de preparación de muestras por período de 1 semana y la otra bolsa se envía al laboratorio de Control de Calidad para su análisis.

Fuente: elaboración propia.