



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE HIDALGO

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E
INGENIERÍA**

**CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL
APROVECHAMIENTO DEL LOTE MINERO “*EL DONJUA*”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MINERO METALURGICO**

P R E S E N T A:

ISAY ANDUAGA ALARCON

DIRECTOR: Dr. JUAN HERNÁNDEZ ÁVILA

CODIRECTOR: Dr. GUSTAVO URBANO REYES



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 6 de agosto de 2025

Número de control: ICBI-D/1323/2025

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Minero Metalúrgica **Isay Anduaga Alarcón**, quien presenta el trabajo de titulación **CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DEL LOTE MINERO "EL DONJUA"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Gustavo Urbano Reyes

Secretario: Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

Vocal: Dr. Juan Hernández Ávila

Suplente: Dr. Javier Flores Badillo

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/YCC

Carretera del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uah.edu.mx, vergaran@uah.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uah.edu.mx

Contenido

Índice de figuras	5
Índice de Tablas	7
Introducción	8
Objetivo General.....	9
Objetivos Particulares	9
Justificación	10
Capítulo I. Marco teórico.....	12
1.1 Generalidades del Carbonato de Calcio.....	12
1.1.2 Propiedades químicas del carbonato de calcio	16
1.1.3 Propiedades físicas del carbonato de calcio.....	18
1.1.4 Métodos de extracción.	19
1.1.5 Bancos, terrazas y bancos múltiples.....	19
1.2 Carbonato de Calcio en Hidalgo	21
1.2.1 Localización de yacimientos en el estado de Hidalgo.....	21
1.2.2 Localización del área de estudio.....	22
1.2.3 Geología regional.....	24
1.2.4 Horizonte minero.....	26
1.2.5 Métodos de extracción.	27
1.2.6 Marco normativo del carbonato de calcio.....	28
Normas nacionales.....	28
Normas internacionales	29
Disposiciones ambientales	30
1.2.7 Cadena productiva de carbonato de calcio.....	31
Variedades comerciales.....	32
1.2.8 Proceso de obtención para carbonato de calcio micronizado	34
1.3 Principales usos industriales	37
Usos	37
1.3.1 Vidrio.....	38
1.3.2 Papel.....	39
1.3.3 Plásticos.....	40
1.3.4 Pinturas e impermeabilizantes.....	41

1.3.5 Selladores y adhesivos	43
1.3.6 Abrasivos	44
1.3.7 Industria alimenticia	45
1.3.8 Muebles de Baño	46
1.3.9 Artículos Escolares	47
1.3.10 Fertilizantes	48
1.3.11 Agregados pétreos.....	50
1.4 Aplicaciones específicas por segmento del carbonato de calcio.....	51
II Desarrollo experimental	54
2.1 Diseño Experimental	54
2.1.2 Muestreo	55
2.1.3. Granulometría	56
2.2 Caracterización mineralógica	57
2.2.1. Difracción de Rayos X (DRX)	57
2.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	58
2.3 Caracterización Química	59
2.4 Caracterización de propiedades físicas.....	60
2.4.3 Equivalente de arena	60
2.4.5. Resistencia a la abrasión o desgaste de los agregados (prueba de los Ángeles)	62
2.4.6 Prueba de calcinación	63
2.4.1 Masa específica a granel y absorción.	63
2.4.7 Absorción de aceite.	65
2.4.7 Sanidad por sulfato de sodio.....	66
2.4.8 Cálculo y estimación de reservas	67
III Resultados	69
3.1 Análisis granulométrico	69
3.2 Caracterización mineralógica por DRX	73
3.3 Análisis químico por ICP	76
3.4 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia de Energía Dispersa (EDS). ..	77
3.5 Pruebas Físicas	88
Absorción de aceite.....	88
3.6 Absorción y masa específica a granel	89

3.7 Cono de arena.....	90
3.8 Prueba de los ángeles.....	91
3.9 Sanidad por sulfato de sodio	92
3.10 Prueba de calcinación.....	93
4.0 Estimación y cálculo de reservas.....	94
Viabilidad del aprovechamiento del Carbonato de calcio en posibles usos industriales.....	97
Conclusiones.....	100
Consideraciones.....	102
Bibliografía.....	104

Índice de figuras

Figura 1 Cristal de calcita romboédrico	13
Figura 2 Caliza	15
Figura 3 Caliza recristalizada	15
Figura 4 Mineral de Dolomita	16
Figura 5 Tipos de explotaciones de acuerdo a sus limitantes geomecánicas	20
Figura 6 Mapa donde se representan los municipios del estado de Hidalgo productores de carbonato de calcio.	21
Figura 7 Localización del yacimiento.....	23
Figura 8 Ruta a seguir de Tepatepec a la procesadora	23
Figura 9 Predio “El Donjua”	23
Figura 10 Estudio Geológico del Área de Tepatepec, Fco. I. Madero, COREMI, 2- 3, 5-7 (1994).....	25
Figura 11 Carta Geológico-Minera Ixmiquilpan F14-C79, Realizada por el Consejo de Recursos Minerales, editada la primera en agosto de 1995.....	25
Figura 12 Foto de potencial geológico-minero de carbonato de calcio en el predio el Donjua	26
Figura 13 Foto de la explotación a cielo abierto	27
Figura 14 Esquema de la cadena de producción del carbonato de calcio.	31
Figura 15 Proceso de obtención del carbonato de calcio ²⁴	34
Figura 16) Productos de vidrio	38
Figura 17 Cajas de cartón y piezas de cartón	39
Figura 18 Productos plásticos	40
Figura 19 Pinturas	42
Figura 20 Productos de limpieza abrasivos y dentífricos)	44
Figura 21 Alimentos balanceados	45
Figura 22 Muebles para baño.....	46
Figura 23 Artículos escolares	47
Figura 24 Zonas de interés para toma de muestras	55
Figura 25 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)	58

Figura 27 Cono sobre la placa; para obtener el peso de la arena retenida, entre el cono y la placa.	61
Figura 28 Medición del número de Attemberg.....	65
Figura 29 Distribución de tamaño de muestra de partícula donde la moda se encuentra señalada con la línea roja.....	70
Figura 30 Distribución de tamaño de “ Blanco ZI3” de partícula donde la moda se encuentra señalada con la línea roja.....	72
Figura 33 Micrografía de carbonato “Stock ZI1”	77
Figura 34 Micrografía de la “Gris ZI5”	81
Figura 35 Muestra “ZI4” morfología cubica de las partículas de carbonato de calcio obtenido a partir de la caliza.....	84

Índice de Tablas

Tabla 1 Concentración de carbonato de calcio en distintos tipos de caliza.	15
Tabla 2 Composición química promedio del carbonato de calcio. ²	17
Tabla 3 Propiedades físicas y químicas del carbonato de calcio. ²	18
Tabla 4 Normas nacionales para el carbonato de calcio.	28
Tabla 5 Normas internaciones que aplican al carbonato de calcio.....	29
Tabla 6 Normas aplicables al carbonato de calcio	30
Tabla 7 Tamaños de partícula recomendados para polímeros como el PVC etc. .	41
Tabla 8 Tamaños de partículas de distintos tipos de recubrimientos.	42
Tabla 9 Composición química y granulometría requerida para el carbonato de calcio utilizado en países como Estados Unidos y Alemania.	49
Tabla 10 Características requeridas por los agregados para concretos hidráulicos.	50
Tabla 11 Aplicaciones por segmento del carbonato de calcio micronizado.....	53
Tabla 12 Condiciones durante la realización del experimento.	57
Tabla 13 Porcentaje de pesos acumulados en las mallas de la muestra.	69
Tabla 14 Resultados del analizador de tamaño de partícula láser muestra blanco	72
Tabla 17 Resultados de la prueba de calcinación	93

Introducción

La zona de estudio donde se encuentra ubicado el predio rústico “El Don jua” es evidentemente minera, explotando por lo general minerales no metálicos como son la caliza y Dolomía, con 2 unidades aledañas al banco, el principal giro de estas es la comercialización de carbonato de calcio de grado industrial, alimenticio y hasta farmacéutico.

Las rocas de la Formación “El Doctor”, que albergan el yacimiento de calizas susceptibles de ser explotadas con un rendimiento económico, son de origen sedimentario marino que se depositaron en ambiente de plataforma de aguas someras, oxigenadas y calientes, con un moderado a bajo flujo turbulento.

Ahora bien, el yacimiento no cuenta con estudios geológicos que permitan la estimación de volúmenes de material para su aprovechamiento, un posible indicador de las propiedades del yacimiento son las ya mencionadas empresas en la región pues de acuerdo con independencia de su origen, la composición mineral de toda la caliza es similar, aunque existan muchos tipos diferentes. Las formas que tienen un origen bioquímico marino son, con mucho, las más comunes

Los ejidatarios de la región por lo regular aprenden la minería o la explotación de minerales de forma empírica con métodos y equipos rudimentarios, tienen poca información sobre su yacimiento, no cuentan con recursos económicos suficientes para invertir, carecen de una organización y administración eficiente. Así que, tampoco cuentan con un Ingeniero Minero que los asista permanentemente en el desarrollo de los proyectos, siendo una gran limitante para el establecimiento de una empresa.

El presente trabajo, muestra un estudio para evaluar si el yacimiento de calizas “El Don Jua” puede ser explotado para el aprovechamiento del carbonato de calcio en los diferentes usos industriales. Determinando su composición química, caracterización mineralógica, propiedades físicas; así como el cálculo y estimación de reservas.

Objetivo General

Caracterizar el lote minero “El Don Jua” para el aprovechamiento de carbonato de calcio en posibles usos industriales, determinando su composición química, caracterización mineralógica y propiedades físicas; así como el cálculo y estimación de reservas.

Objetivos Particulares

- Recolectar las muestras de carbonato de calcio empleando el método de canaletas y esquirlas en diferentes zonas del lote minero.
- Preparar las muestras de carbonato de calcio obtenidas, aplicando molienda y análisis granulométrico.
- Realizar la caracterización mineralógica de las muestras de carbonato de calcio empleando técnicas de MEB-EDS y DRX.
- Realizar la caracterización química de las muestras de carbonato de calcio para determinar su pureza empleando la técnica de ICP y MEB/EDS.
- Realizar pruebas físicas de calcinación, absorción, aceite y sulfato de sodio para evaluar la calidad del carbonato respecto a los estándares de la industria.
- Realizar cuantificación de reservas para determinar la cantidad de recursos con los que la unidad cuenta
- Evaluar de los resultados para determinar la viabilidad del aprovechamiento del carbonato de calcio en posibles usos industriales.

Justificación

La presente investigación surge como respuesta a la necesidad de evaluar las potencialidades del lote minero “El Don Jua”, con el propósito de determinar su viabilidad como fuente de carbonato de calcio para uso industrial. En un contexto económico caracterizado por la demanda de este mineral —utilizado ampliamente en sectores como la construcción, la industria química, la producción de papel, plásticos, pinturas y alimentos—, identificar nuevas fuentes de abastecimiento confiables y sostenibles representa una oportunidad estratégica tanto a nivel local como regional.

El proyecto parte de una visión de colaboración entre sus miembros, quienes comparten el interés de crear una empresa minera competitiva, capaz de integrarse al exigente mercado del carbonato de calcio. No obstante, esta visión solo podrá materializarse si se abordan de manera adecuada los desafíos técnicos, económicos, sociales y ambientales que implica una iniciativa de este tipo.

El lote minero “El Don Jua” se encuentra ubicado sobre un yacimiento de magnitud regional, lo que sugiere un importante potencial para el desarrollo minero a mediano y largo plazo. Su extensa superficie representa una ventaja estratégica, pero solo podrá aprovecharse plenamente si se conoce con precisión la calidad del recurso

Para avanzar en esta dirección, es necesario contar con un estudio técnico que, aunque en una fase inicial, proporcione valores orientativos sobre la concentración, pureza y volumen del mineral disponible. Estos datos permitirán calcular de manera preliminar la rentabilidad del yacimiento, identificar las tecnologías más adecuadas para su aprovechamiento, y sentar las bases para procesos de estandarización y tecnificación minera.

Una vez obtenidos estos resultados y formuladas las recomendaciones técnicas pertinentes, será posible contemplar la organización formal de una figura jurídica que permita dar estructura legal a la iniciativa. Una alternativa viable y acorde a las características del proyecto es la conformación de una cooperativa minera. Esta figura permitiría no solo la participación equitativa de los socios fundadores en la gestión y beneficios de la empresa, sino también facilitaría la vinculación con organismos e instituciones gubernamentales encargadas de fomentar el desarrollo productivo y la formalización de actividades mineras.

Contar con una cooperativa minera ofrecería ventajas como el acceso a programas de asistencia técnica, financiamiento, capacitación y asesoría legal, todos ellos esenciales para consolidar una empresa sólida y sustentable. Asimismo, fomentaría la inclusión social, la creación de empleo local y el desarrollo de encadenamientos productivos en la zona de influencia del proyecto. Esto contribuiría al desarrollo socioeconómico regional, generando beneficios más allá del ámbito puramente económico.

En resumen, la justificación de este trabajo de tesis radica en la necesidad de generar conocimiento técnico confiable sobre el lote minero “El Don Jua”, como paso inicial para la evaluación de su potencial productivo y económico. La caracterización del carbonato de calcio presente en la zona no solo contribuirá a establecer su viabilidad comercial, sino que también proporcionará insumos clave para la planificación estratégica de una empresa minera. Esta, a su vez, podrá integrarse a mercados competitivos, cumplir con los estándares de calidad requeridos y operar de manera social y ambientalmente responsable. De esta manera, el proyecto se alinea con los objetivos de desarrollo sustentable, promoviendo el uso eficiente de los recursos naturales y la generación de valor agregado en origen.

Capítulo I. Marco teórico

1.1 Generalidades del Carbonato de Calcio.

El carbonato de calcio (CaCO_3) es un compuesto ampliamente utilizado en diversas industrias debido a su versatilidad y disponibilidad. Se presenta como un polvo blanco, inodoro e insípido, con una dureza de 3 en la escala de Mohs y una densidad teórica de 2.7 g/cm^3 . Su composición química promedio es de 40.04% de calcio y 59.96% de carbonato. Dependiendo de la roca de origen, como caliza, mármol o calcita, su pureza y estructura cristalina pueden variar, lo que influye en sus aplicaciones (Ávila et al 2014).

El estado de Hidalgo presenta una amplia colección de rocas que contienen carbonato de calcio entre ellas se encuentra la caliza, caliza recristalizada, calcita, mármol, dolomita y aragonito, esta última en menor proporción con el resto, por lo tanto, su utilización como fuente de carbonato de calcio no es viable.

Actualmente, el carbonato de calcio se emplea como materia prima en la industria del cemento, como agente de carga en plásticos, pinturas y papel, en productos farmacéuticos como antiácido o bien como suplemento de calcio, en la industria alimentaria como aditivo (E170), y en la agricultura como enmienda para suelos ácidos. Los estándares modernos para su uso en sectores como el farmacéutico y alimenticio exigen un contenido mínimo de pureza superior al 99% y la ausencia de contaminantes como metales pesados, cumpliendo normativas como la USP, FCC y las regulaciones de la Unión Europea. (Araujo et al 2011) (Okoro et al 2023).

Mineral perteneciente al grupo de los carbonatos, cuya fórmula química es CaCO_3 . Se presenta comúnmente en forma de cristales de estructura trigonal, aunque puede observarse también en formas masivas, granular o en vetas incrustadas en rocas carbonatadas, como la caliza. (Area, M. C. 2008). En depósitos de caliza, la calcita puede representar una baja proporción comparado con la matriz rocosa principal, siendo comúnmente observada en vetas con colores que van un tono miel al amarillento. La calcita de calidad industrial generalmente presenta una alta pureza, con una composición química promedio de 99% de CaCO_3 , destacándose por su contenido de óxido de calcio (CaO) en torno al 56.03% y dióxido de carbono (CO_2) en 43.97%. (Ávila et al 2014).

Este mineral tiene aplicaciones relevantes en diversas industrias debido a su alta pureza y su capacidad de ser transformado para producir productos de valor agregado. Su estructura cristalina influye en sus propiedades ópticas y reactivas, lo que lo hace adecuado para su uso en sectores como la farmacéutica, alimenticia, agrícola y química. La calcita también es valorada como material base para la producción de pigmentos y en la fabricación de cemento, aunque su uso en mercados más específicos depende de su calidad y características mineralógicas. La calcita tiene un sistema cristalino trigonal y presenta en una gran variedad de formas cristalinas de las que podemos contar 80 romboedros distintos y más de 200 escalenoedros; los más comunes son los romboedros truncados y afilados como el que se muestra en la figura 1



**Figura 1 Cristal de calcita
romboédrico**

Los principales yacimientos de este mineral en el estado de Hidalgo se localizan principalmente en los municipios de Francisco I. Madero, San Salvador, Hidalgo. y Zimapán.

Caliza

Es uno de los minerales no metálicos más abundantes en la naturaleza, encontrándose en forma de masas rocosas sedimentarias compuestas principalmente por carbonato de calcio, con impurezas de alúmina, sílice, y magnesio.

Roca sedimentaria compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), que puede contener dolomita, arcilla o sílice. En su forma más pura, la caliza está compuesta por más del 95% de CaCO_3 , siendo su componente principal la calcita. La caliza puede presentarse en diversas formas, desde masiva hasta en vetas, y su color varía según las impurezas presentes, que pueden incluir tonos de blanco, gris, beige o amarillo. (Ávila et al 2014).

Tiene una importancia significativa en diversas industrias debido a su abundancia y versatilidad. En el sector de la construcción, se utiliza principalmente como agregado para concreto o en la producción de cal a través de su calcinación. Además, la caliza se emplea en la industria química y metalúrgica como fuente de cal viva (CaO), en procesos de neutralización de ácidos y como fundente en la fabricación de acero. Su calidad y composición química también la hacen adecuada para ser procesada y utilizada en la industria alimentaria y agroquímica. (Oliveira et al 2009).

La caracterización de la caliza en términos de su composición mineralógica y propiedades físicas (densidad, resistencia) es crucial para determinar su idoneidad para diferentes aplicaciones industriales.

La caliza que contiene un alto porcentaje de calcita de buena calidad es especialmente valorada en aplicaciones de alto valor agregado, como la producción de pigmentos o en la fabricación de productos farmacéuticos y cosméticos.

Se conoce bajo diversos nombres según su grado de pureza y diferencias en las propiedades físicas, teniéndose la caliza cristalizada (Figura 2) y caliza (Figura 3).



Figura 2 Caliza



Figura 3 Caliza recristalizada

Tabla 1 Concentración de carbonato de calcio en distintos tipos de caliza.

Calizas	% CaCO₃
Caliza Recristalizada	94-96
Caliza	92

La clasificación antes mencionada se da también en base a su concentración de carbonato de calcio, vea tabla 1. Una de las rocas que posee mayor concentración de carbonato es la caliza recristalizada, seguida de la caliza.

En el estado de Hidalgo existen amplios yacimientos de los primeros dos tipos de caliza mencionados en la tabla anterior.

Dolomita

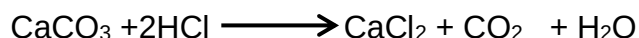
Es un mineral ampliamente distribuido en la naturaleza, compuesto de un doble carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), caracterizado por su estructura cristalina trigonal y su apariencia de colores variables, que incluyen blanco, gris, marrón o rosado. Tiene una dureza de 3.5 a 4 en la escala de Mohs, una densidad promedio de 2.85 g/cm^3 y una forma cristalina que se distingue de la calcita por su respuesta a los ácidos: mientras que la calcita tiene una efervescencia inmediata, la dolomita lo hace solo si está en polvo o en condiciones específicas. (Figura 1.1.4), por esta razón, siempre está asociado con rocas sedimentarias calcáreas y en raras ocasiones con otros sedimentos. Resio, L. (2023)



Figura 1.1.1) Mineral de Dolomita

1.1.2 Propiedades químicas del carbonato de calcio

Mineral que tiene una reacción efervescente cuando se pone en contacto con ácidos diluidos desprendiendo CO_2 (vea la reacción química en la parte inferior). En suspensión acuosa 10/90 el carbonato de calcio tiene un pH enlistado en la tabla 1.2.



Es un mineral que se descompone al calentarse en un rango de temperatura de 825-1339 °C formando óxido de calcio cal viva. (García et al 2022).

En la tabla 2. se presenta las composiciones químicas promedio del carbonato de calcio y las pérdidas por calcinación las cuales son las referencias para determinar algunas de sus propiedades y usos a nivel industrial.

Tabla 2 Composición química promedio del carbonato de calcio.

MINERAL	PORCENTAJE %	MINERAL	PORCENTAJE %
CARBONATO DE CALCIO (CaCO ₃)	98.00% min.	Pentóxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	Trazas
ÓXIDO DE MANGANESO (MnO)	0.55%	Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.05%
SÍLICE (SiO ₂)	0.27%	Óxido de Sodio (Na ₂ O)	0.21%
ALÚMINA (Al ₂ O ₃)	0.50%	Insolubles en HCl	1.0% máx.
TRIOXIDO DE FIERRO III (Fe ₂ O ₃)	0.09% máx.	Perdidas por calcinación	43.15%
DIÓXIDO DE TITANIO (TiO ₂)	0.03%	pH (Suspensión acuosa al 10%)	8.5 - 9.5
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO ₃)	0.25% máx.		

1.1.3 Propiedades físicas del carbonato de calcio

Polvo blanco o cristales incoloros, inodoros e insípidos, insoluble en alcohol, con baja solubilidad en agua (1-2mg/100ml); altamente soluble en ácidos diluidos y cloruro de amonio. (Ávila et al 2014) (García et al 2022).

En la tabla 3 se muestran otras propiedades físicas del carbonato de calcio.

Tabla 3 Propiedades físicas y químicas del carbonato de calcio.

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN
Brillo (Colorímetro)	95 min.(Escala L*a*b*)
Densidad	2.6 a 2.95 g/cm ³
Dureza	3 a 4 Mohs
Estructura cristalina	Romboédrica- piramidal, romboédrica/cubica con forma de aguja.
Humedad	0.09% Max.

1.1.4 Métodos de extracción.

Estas operaciones resultan económicas y seguras; siempre y cuando sea posible su aplicación. Existen dos tipos de extracción superficial placeros y a cielo abierto; la primera es utilizada para yacimientos con bajo contenido de metales preciosos y bajo volumen; puede hacerse de manera manual o por la utilización de métodos hidráulicos. El segundo caso es aplicado a yacimientos de gran volumen. (Herrera et al 2006)

Los “tajos” pueden alcanzar una longitud o diámetro de varios cientos de metros y la escala de operación de muchos miles de toneladas por día. De estos dos grupos la selección de un método de extracción más conveniente debe hacerse satisfaciendo tres objetivos esenciales.

- Economía de la explotación.
- Seguridad en la operación.
- El mayor aprovechamiento de las reservas.

1.1.5 Bancos, terrazas y bancos múltiples.

Bancos:

Este método consiste en la explotación escalonada de material, creando niveles horizontales denominados bancos. Cada banco tiene una altura y ancho definidos según las características del yacimiento y la maquinaria utilizada. Es un método eficiente para yacimientos superficiales con un buzamiento moderado, permitiendo el control del material extraído y minimizando el impacto ambiental. (Herrera et al 2006)

Terrazas:

Similar a los bancos, pero con un diseño que prioriza la estabilidad y el acceso, las terrazas se emplean en depósitos con topografías más accidentadas o cuando es necesario reducir el riesgo de deslizamientos. Este método es común en materiales más suaves o en áreas donde la pendiente natural es pronunciada. (Mukadi-Mukadi, 2013).

Bancos múltiples:

Este método combina varios bancos operados de manera simultánea en diferentes niveles de un yacimiento. Es ideal para depósitos más grandes, donde se busca aumentar la productividad o manejar materiales heterogéneos. Requiere un análisis detallado de la estabilidad de los taludes para garantizar la seguridad. (Herrera et al 2006)

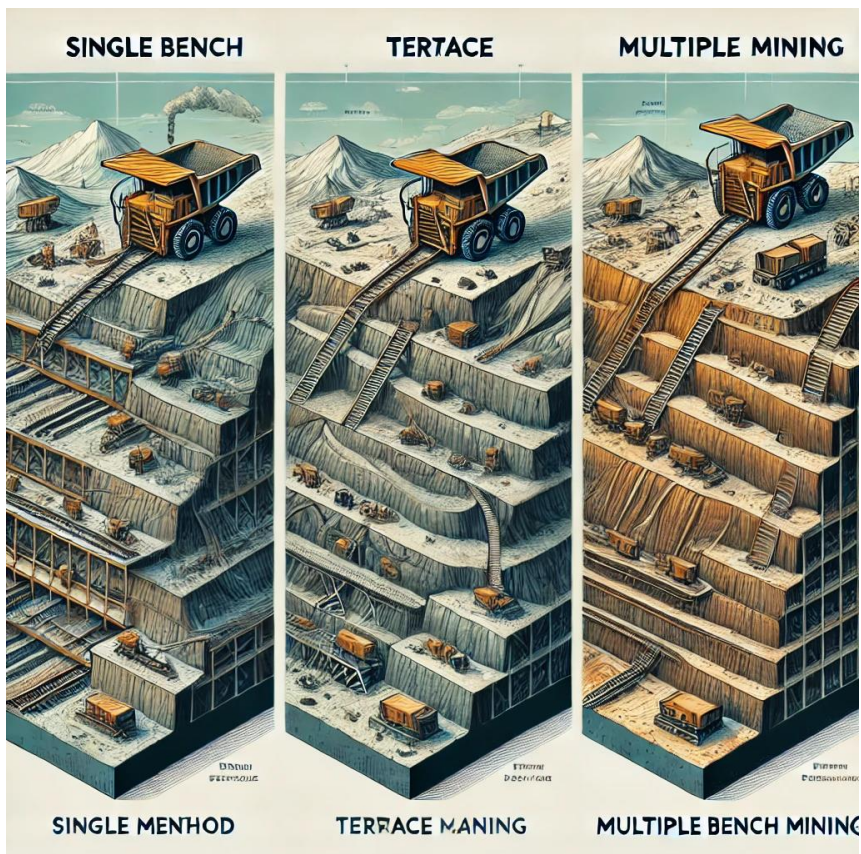


Figura 1.1.2) Tipos de explotaciones de acuerdo a sus limitantes geomecánicas

1.2 Carbonato de Calcio en Hidalgo

1.2.1 Localización de yacimientos en el estado de Hidalgo

El estado de Hidalgo se destaca como uno de los principales productores de caliza en México, debido a la riqueza de sus yacimientos, distribuidos estratégicamente en varios municipios clave. Entre ellos, destacan Francisco I. Madero, Nicolás Flores, Atotonilco de Tula, Metztitlán, Mixquiahuala, Progreso de Obregón, San Salvador, Santiago de Anaya y Zimapán. Cada municipio aporta a la diversidad geológica y al potencial extractivo del estado, siendo Zimapán y Nicolás Flores reconocidos por la alta calidad de sus depósitos, mientras que Atotonilco de Tula y Progreso de Obregón destacan por su cercanía a polos industriales. La extracción de caliza en Hidalgo no solo abastece a industrias locales, sino que también fortalece mercados nacionales, particularmente en los sectores de la construcción, agricultura y química, consolidando al estado como un referente en la producción de minerales no metálicos. Esta distribución geológica convierte a Hidalgo en un pilar estratégico para el aprovechamiento de la caliza, con potencial de diversificar su uso hacia sectores como el alimenticio, farmacéutico y de pigmentos, gracias a la calidad y volumen de los yacimientos identificados.

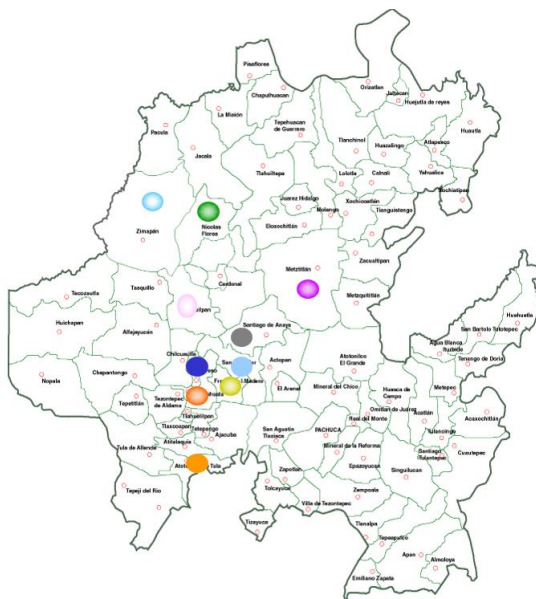


Figura 6 Municipios productores de carbonato de calcio.

1.2.2 Localización del área de estudio.

El predio rústico “El Donjua”, se ubica, a 48.15 km al N 62° W, en línea recta, de la Ciudad de Pachuca, Hidalgo. Las coordenadas UTM (en el sistema WGS 84) de la parte media del predio son, 2 245,842.16 m N y 486, 910.92 m E.

Su acceso a partir de la ciudad de Pachuca, es por la carretera federal No. 85 México-Laredo hasta la ciudad de Actopan, Hgo., con un recorrido de 34 km, para continuar hacia el suroeste 24 km por la carretera Estatal No. 17, hasta el poblado de Tepatepec, de aquí se sigue con dirección al poblado de Benito Juárez, por un camino pavimentado que eventualmente se vuelve de terracería, transitable todo el año, recorriendo aproximadamente 3 km, y se llega a la zona de estudio. El recorrido total desde Pachuca, Hidalgo es de 62 Kilómetros y es posible realizarlo en 1 hora y 20 minutos. (Figura 7).

Infraestructura

Vías de comunicación: El banco de caliza se encuentra bien comunicado con los principales centros de beneficio, comercialización y consumo, así como con poblaciones que cuentan con todos los servicios básicos como son: Tepatepec, Progreso de Obregón, Mixquiahuala, Actopan y Pachuca, todas en el Estado de Hidalgo.

Energía Eléctrica: La línea de energía eléctrica más cercana se encuentra en la población de Denganthza a 700 metros del predio.

Mano de Obra: Es posible encontrar mano de obra calificada en el poblado de Denganthza, por ser una industria activa de la región.

Servicios Básicos: Estos se tienen de forma integral (telefonía, internet, correos, telégrafos, bancos, servicios de salud, etc.), en el poblado de Tepatepec, Hgo. distante del proyecto 3 Km. Así mismo, en Progreso de Obregón a 17 km y en Actopan, Hidalgo a 15 km.

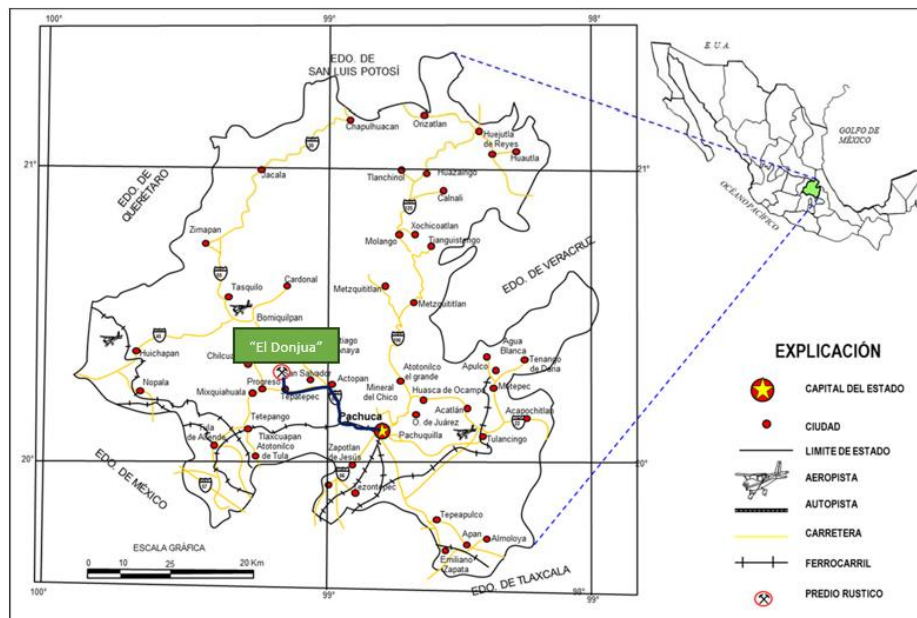


Figura 1.1.3) Localización del yacimiento

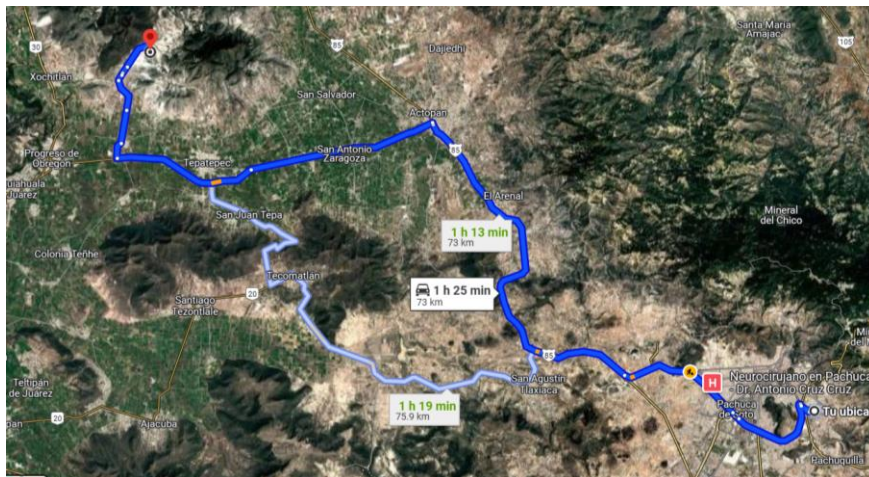
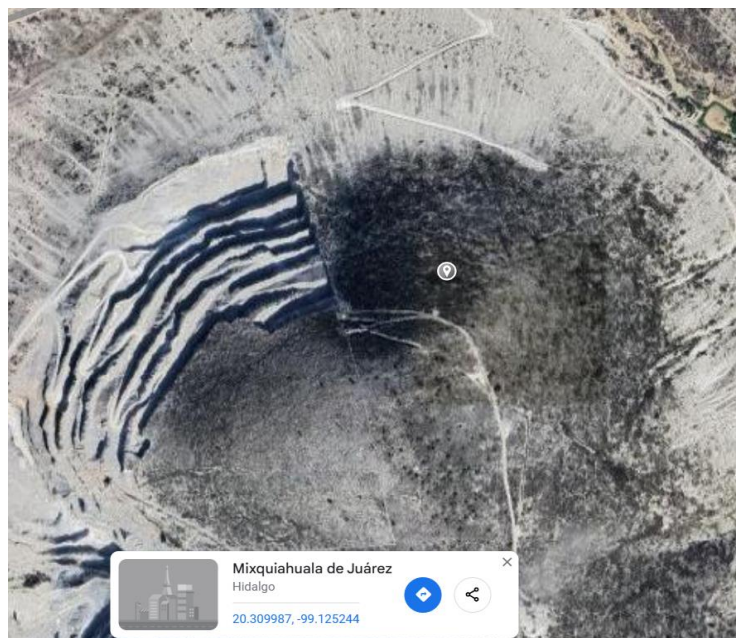


Figura 1.1.4) Ruta a seguir de Tepatepec a la procesadora

Figura 1.1.5) Predio “El Donjua”



1.2.3 Geología regional.

El área de estudio se encuentra dentro del marco geológico de la Sierra Madre Oriental, en su límite sur-occidental con la provincia del Eje Neovolcánico, según la Carta Geológico-Minera Ixmiquilpan F14-C79 (escala 1:50,000) del Servicio Geológico Mexicano. Regionalmente, la geología está dominada por rocas sedimentarias marinas del Cretácico Medio (Albiano-Cenomaniano), representadas por las calizas arrecifales de la Formación El Doctor (Kicz). Estas calizas están parcialmente cubiertas en discordancia angular por lutitas y calizas de la Formación Méndez del Cretácico Superior (Kscz-Lu, Ks Lu-ar). Posteriormente, se superponen rocas volcánicas de composición andesítica (Tsca-bva) y dacítica (Tsda-bva), correspondientes al Terciario. (Rodríguez 2012)

En la región de Tepatepec, la fisiografía está dominada por sierras de roca caliza arrecifal, como la Sierra de San Miguel, alcanzando una altitud máxima de 2,700 metros sobre el nivel del mar. Las calizas arrecifales que afloran en esta zona presentan un color gris crema, textura micrítica y una estructura compacta a estratificada, con potencial por estrato de hasta 1 metro. Estas rocas contienen vetillas de calcita hidrotermal y se originaron durante el Cretácico Inferior. La Formación representando un importante depósito de calizas arrecifales del Cretácico Inferior. Esta combinación de características geológicas resalta el potencial económico de la región, en la explotación de calizas arrecifales de alta pureza para aplicaciones industriales y comerciales

. Ver figuras 10 y 11

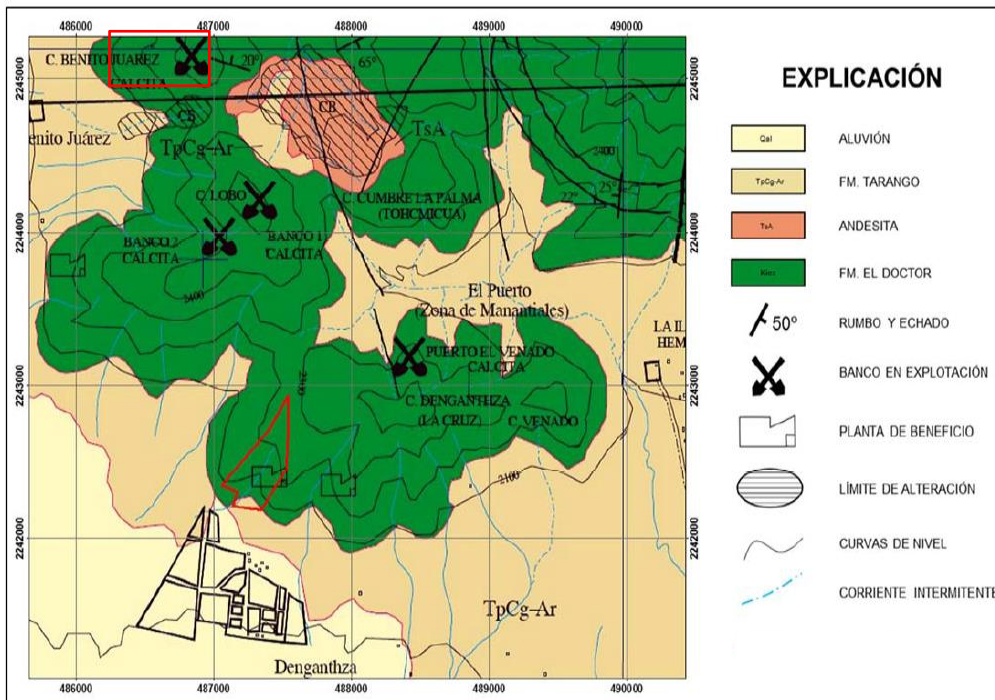


Figura 1.1.6) Estudio Geológico del Área de Tepatepec, Fco. I. Madero, COREMI, 2-3, 5-7 (1994).

Figura 1.1.7) Carta Geológico-Minera Ixmiquilpan F14-C79, Realizada por el Consejo de Recursos Minerales, editada la primera en agosto de 1995.

1.2.4 Horizonte minero

Los yacimientos de caliza en el estado de Hidalgo, México, presentan características geológicas que determinan su potencial industrial y económico. En los municipios de Zimapán y Nicolás Flores se albergan cuerpos masivos de caliza con grandes extensiones, cuyas reservas garantizan una vida útil prolongada, incluso considerando un aumento en el ritmo de explotación. Estos yacimientos son fundamentales para la industria del cemento, la producción de cal y otros derivados, posicionando a Hidalgo como el principal productor de caliza en el país.

En los municipios de San Salvador, Francisco I. Madero, Mixquiahuala, Progreso de Obregón y Metztitlán, los yacimientos se presentan en forma de vetas que se adelgazan a mayor profundidad. Aunque de dimensiones inferiores, estos depósitos poseen características específicas que pueden ser aprovechadas para aplicaciones especializadas como el sector farmacéutico. (Rodríguez 2012) Ver figura 12



Figura 12 Foto de mineralización del banco

1.2.5 Métodos de extracción.

En el estado de Hidalgo la explotación de los minerales de carbonato de calcio se realiza a cielo abierto, utilizando el método de banqueo o terrazas descendentes Figura 13. En la mayoría de los casos no se cuenta con un plan de minado y procesamiento determinado; debido principalmente a la falta de capacitación, asistencia técnica, y capital

Esto representa uno de los problemas más comunes en pequeñas explotaciones limitando el alcance del yacimiento, las estrategias o planes de minado que suelen realizarse son empíricas aumentando la probabilidad de accidentes comprometiendo al personal que día con día desempeña su labor.



Figura 1.1.8) Foto de la explotación a cielo abierto

1.2.6 Marco normativo del carbonato de calcio

Se presentan las normas que rigen al carbonato de calcio en los marcos ambientales, de seguridad y procesamiento del mismo.

Normas nacionales

En cuanto a las normas nacionales aplicables al carbonato de calcio tenemos la ley minera de la cual haremos uso en los artículos 4° y 5° y la norma Nmx-k-033-1986.

La ley minera en el artículo 4° brinda una definición de lo que es un mineral, la cual indica que es todo aquel depósito, yacimiento, veta etc., que tenga composición diferente de los terrenos y hace mención de muchos ejemplos; sin embargo, no hace mención alguna del carbonato de calcio por lo que, para este último no aplica. En el artículo 5° se definen qué minerales y bajo qué condiciones estos quedan fuera de la aplicación de la presente ley, lo cual tiene relevancia para el carbonato de calcio pues excluye minerales utilizados en la industria de la construcción y también a los que se explotan a cielo abierto.

Tabla 4 Normas nacionales para el carbonato de calcio.

Clave	Título
Nmx-k-033-1986	Carbonato de calcio precipitado
Artículos 4° y 5°	Ley minera
NMX-C-164	Masa específica y absorción.
NMX-C-073	Masa volumétrica suelta.
NMX-C-196	Abrasión de los Ángeles
NMX-C-075 ONNCCE	Sanidad por sulfato de Sodio
AASTHO-T-175	Equivalente de arena

Normas internacionales

Las normas aplicables al carbonato de calcio aplicables a nivel internacional son las ASTM, BS ISO ver en tabla 5

Tabla 5 Normas internaciones que aplican al carbonato de calcio.

No. Clave	Nombre
NORMAS ASTM	
D 11 99-86(1991)	Especificación para pigmentos de carbonato de calcio
D 5634-96	Guía para la selección de papeles permanentes del desplazamiento durable y para libros
D 3301-94	Especificación para carpetas de archivos para almacén de registros permanentes
D 3290-94	Especificación para papeles Bond y en cinta de registros permanentes
D 3208-94	Especificaciones para papel Bond de registros permanentes
D-4791	Porcentaje de piedras lajeadas y alargadas.
NORMAS BS ISO	
BS 1456	Especificaciones para la utilización de carbonato de calcio en vidrios.
NORMAS EUROPEAS	
UNE-EN 933-8:2000	Determinación de la cantidad de arcillas.

En estas normas se hace especificaciones sobre el tamaño de partícula, pureza (composición química), opacidad y brillo; requeridas por las empresas que hacen uso de estas.

Disposiciones ambientales

Las disposiciones ambientales referentes al carbonato de calcio estas se pueden agrupar en dos grupos las normas nacionales y las normas estatales (vea tabla 6)

Tabla 1 Normas aplicables al carbonato de calcio

No. Clave	Nombre
NTEE-COEDE-001/2000	Criterios y lineamientos para la explotación de bancos de materiales pétreos.

La norma NTEE-COEDE-001/2000 es estatal, rige en el estado de Hidalgo; en la cual se establecen las condiciones para la explotación adecuada de materiales pétreos. En esta norma no se hace mención alguna del carbonato de calcio; sin embargo, es muy estricta en los lineamientos necesarios para una mina a cielo abierto; sobre todo en materia de seguridad y ecología.

1.2.7 Cadena productiva de carbonato de calcio

La cadena productiva del carbonato de calcio es amplia y abarca gran cantidad de etapas, durante las cuales se genera gran cantidad de empleos directos e indirectos; lo que demuestra la importancia de esta industria a nivel nacional. Dicha cadena se muestra en la figura 14



Figura 9 Cadena de producción del carbonato de calcio.

Variedades comerciales

El carbonato de calcio se presenta en dos variantes comerciales que son el molido y el precipitado.

Molido

El carbonato de calcio molido es el compuesto químico de fórmula CaCO_3 , obtenido por la molienda de la roca caliza.

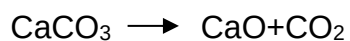
Precipitado

El carbonato de calcio precipitado es el compuesto químico de fórmula CaCO_3 , obtenido por la precipitación del calcio en forma de carbonato. Tiene menos impurezas, más brillo y morfología controlada, es usado como relleno y extensor en plástico, pintura, papel y adhesivos; así como en productos para aplicación en alimentos y farmacéutica. Otras aplicaciones en que puede usarse es en recubrimientos y elastómero

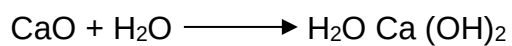
Carbonatación.

La forma más común para obtener carbonato de calcio precipitado consiste en pasar CO₂ en forma de gas a una solución de lechada de cal, llevándose a cabo las siguientes reacciones químicas:

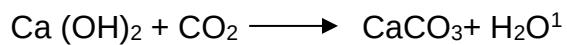
Calcinación



Hidratación o “apagamiento”



Carbonatación



1.2.8 Proceso de obtención para carbonato de calcio micronizado

El proceso de extracción del carbonato de calcio consiste en cinco etapas, que se muestran en la figura 15, estas son la extracción, trituración, molienda, clasificación, envase y embarque.

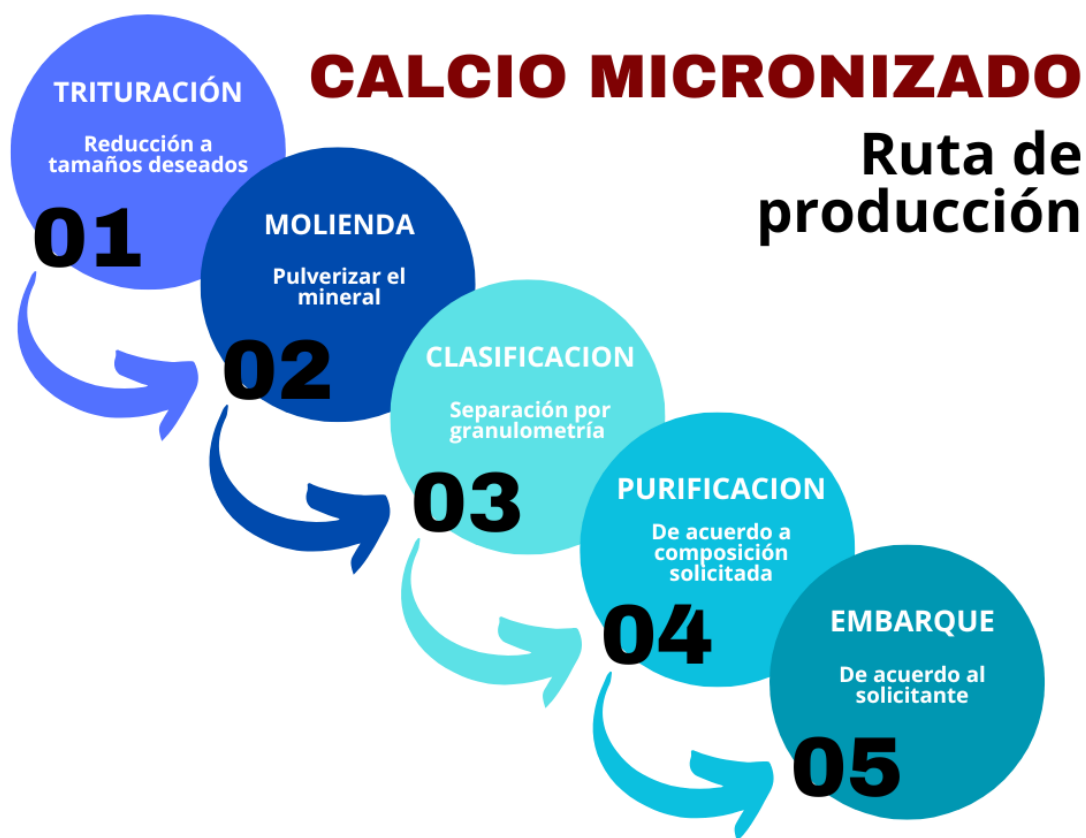


Figura 1.1.10) Proceso de obtención del carbonato de calcio

Extracción

Se extrae principalmente mediante minería a cielo abierto, ya que este método permite acceder a grandes volúmenes de material con menores costos operativos. Sin embargo, en casos donde la calidad del depósito o la ubicación geográfica lo justifiquen, pueden implementarse métodos subterráneos (Marras, 2020).

El proceso de extracción comienza con la remoción de la vegetación y suelo superficial (descapote), seguido de la perforación de barrenos estratégicamente distribuida para optimizar la fragmentación de la roca. Posteriormente, se realiza la carga y detonación de explosivos, seguida del tumbe y rezagado del material. Una vez fragmentado, el mineral es cargado y transportado a la planta de procesamiento, donde se somete a trituración para reducir su tamaño y facilitar su posterior refinamiento (Chatterjee et al 2021).

Las etapas del procesamiento incluyen trituración, molienda, clasificación y en algunos casos secado, especialmente en países donde el producto debe cumplir especificaciones estrictas de humedad (Wills et al 2016).

Trituración

Este proceso es fundamental para lograr la granulometría requerida en la etapa de molienda y garantizar un procesamiento eficiente en las siguientes fases (Gul et al., 2021). Dependiendo de la aplicación final del carbonato de calcio, pueden emplearse distintas tecnologías de trituración, como trituradoras de mandíbulas, de cono o de impacto (Wills et al 2016).

Molienda

El material triturado se introduce en molinos de bolas o molinos Raymond, los cuales reducen aún más el tamaño de partícula hasta alcanzar granulometrías de entre 3 y 5 micrones. Este proceso es crucial para aplicaciones industriales en las que se requiere carbonato de calcio ultrafino, como en la industria farmacéutica, alimentaria y de pigmentos (Rojas et al., 2019). La molienda puede realizarse en seco o en

húmedo, dependiendo de los requerimientos del producto final y de las especificaciones del cliente (Gupta et al 2018).

Purificación

El proceso de purificación se basa en la eliminación de impurezas y en la clasificación del material según su composición química. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la flotación, que permite separar minerales de carbonato de calcio de otros componentes, y la separación magnética, empleada en depósitos con presencia de minerales ferromagnéticos (Leja, 2017). Estos métodos son esenciales para obtener productos con altos niveles de pureza, especialmente para aplicaciones en la industria farmacéutica y alimentaria (Marras, 2020).

-Clasificación

Una vez molido, el carbonato de calcio se somete a un proceso de clasificación para separar las partículas según su tamaño. Este paso es fundamental, ya que las especificaciones del producto final dependen de su granulometría, blancura y pureza (Gul et al., 2021). La clasificación puede realizarse por métodos secos, utilizando tamices vibratorios y clasificadores de aire, o por métodos húmedos, donde se emplean hidrociclones o centrífugas para obtener distribuciones granulométricas más controladas (Gupta et al 2018).

Envase y embarque

El producto final es almacenado en tolvas antes de ser envasado o transportado a granel. Dependiendo del destino y la aplicación, el carbonato de calcio puede empacarse en bolsas de papel o plástico, o bien cargarse directamente en camiones para su distribución (Chatterjee et al 2021).

1.3 Principales usos industriales

Usos

Mineral ampliamente utilizado en diversas industrias debido a sus propiedades químicas y físicas, como su alta blancura, pureza y capacidad de modificar la textura y composición de los productos finales. Su versatilidad lo hace un insumo esencial en múltiples sectores, que incluyen:

- **Industria del Vidrio:** Actúa como fundente en la fabricación de vidrio, reduciendo la temperatura de fusión de la sílice y mejorando la resistencia del producto final (Prado et al., 2021).
- **Papel y Cartón:** Se usa como carga y revestimiento para mejorar la blancura, opacidad y calidad de impresión del papel (Hossain et al 2020).
- **Plásticos:** Funciona como un relleno que mejora la rigidez, estabilidad térmica y propiedades mecánicas de los polímeros, reduciendo costos de producción (Zhang et al 2019).
- **Pinturas y Recubrimientos:** Se emplea como pigmento extensor para mejorar la opacidad, brillo y resistencia a la abrasión en pinturas y selladores (Fernández et al 2020).
- **Cerámica:** Es un componente esencial en la fabricación de esmaltes y pastas cerámicas, contribuyendo a mejorar la resistencia y estabilidad térmica (Martínez et al 2018).
- **Abrasivos:** Se utiliza en productos de limpieza y pulido, especialmente en la industria de los dentífricos y pastas para pulir metales (Gómez et al., 2021).
- **Industria Alimentaria:** Se utiliza como aditivo en la fortificación de alimentos y como regulador de acidez en la producción de bebidas y productos lácteos (EFSA, 2022).
- **Fertilizantes y Suelos Agrícolas:** Se aplica en la corrección de suelos ácidos y como fuente de calcio para cultivos (Díaz et al., 2019).
- **Construcción y Agregados Pétreos:** Es un material base en la producción de cementos, concretos y asfaltos, mejorando la resistencia y durabilidad de las estructuras (Jiménez et al., 2021).

Estos usos son amplios y en este trabajo solo se mencionarán algunos de ellos de manera simple y concisa.

1.3.1 Vidrio

Dentro de este segmento, el carbonato de calcio (CaCO_3) tiene la función de introducir óxido de calcio (CaO) a la mezcla, brindar resistencia mecánica, brillo, estabilizar la red interna y actuar como fundente. Como principal fuente de este mineral tenemos la caliza que, por su alta disponibilidad y elevada pureza natural, aunque algunas veces presenta impureza de sílice, fosfato y óxido de magnesio (MgO) que generalmente están por debajo del 0.3 %, la hacen ideal para una industria que requiere grandes cantidades de este material. (Prado et al., 2021).

Para que el carbonato de calcio sea utilizado en esta industria, principalmente en la elaboración de vidrio sódico-cálcico como vidrio para ventanas, botellas etc., debe cumplir con la siguiente composición química:

- 55.2% mínima CaO .
- 0.035% máximo de Fe_2O_3 .
- 1% máximo de residuos insolubles en ácido clorhídrico incluyendo SiO_2 .
- 0.1% máximo de impurezas manganeso, plomo, azufre etc. (expresado en óxidos).
- 1% máximo de materia orgánica.
- Cero elementos colorantes del vidrio.



Figura 1.1.11) Productos de vidrio

1.3.2 Papel

El uso del carbonato de calcio micronizado dentro de este segmento está dirigido básicamente a la producción de papel para escritura e impresión, funcionando como relleno, revestimiento y mejorando las propiedades del producto; como lo son el brillo, opacidad, acabado satinado, porosidad, propiedades estructurales del producto, blancura, durabilidad e incrementa la facilidad de impresión. (Hossain & Nazmul, 2020).

En el cartón se ha detectado su utilización básicamente en cartones plegadizos que se utilizan en la industria del empaque, funcionando principalmente como carga, para rellenar los espacios vacíos de la celulosa brindando mejores propiedades mecánicas y en ambas industrias para la reducción de la acidez en el proceso de producción.

El carbonato de calcio utilizado en este sector debe tener un tamaño de partícula promedio menor a #325 y una concentración de CaCO_3 de 96.5%, 2% de MgO y 1.2% de SiO_2 .



Figura 1.1.12) Caja
piezas de c:

1.3.3 Plásticos

El uso de rellenos en la industria del plástico asciende a nivel mundial aproximadamente a los 300 millones de toneladas; de las cuales cerca del 66% corresponde al uso exclusivo de carbonato de calcio. Este se utiliza principalmente como carga, en el polietileno, el polipropileno, el PVC y el poliestireno. Sin embargo, a nivel nacional su uso solo se dirige a la fabricación del PVC flexible, en la elaboración de suela para zapatos y pisos vinílicos, pues brinda rigidez, dureza y mejor resistencia a la agresividad; además de mejorar sus propiedades ópticas, su resistencia química, modifica sus propiedades eléctricas, gravedad específica y reduce costos.

Unas de las principales características del carbonato de calcio utilizado en la industria del plástico son el tamaño y forma de la partícula. Las formas que se desean son esferas, cubos o cuboides pues de esta manera incrementan la resistencia y a su vez actúan como rellenos. (Zhang et al., 2019).

En cuanto al tamaño de partícula es necesario un control muy estricto porque una mala distribución de tamaño de partícula o un tamaño muy grande o pequeño lleva a la generación de esfuerzos cortantes innecesarios en el material que llevan a su degradación. En la tabla 7 se muestran los tamaños de partícula para los polímeros listados anteriormente.



Figura 1.1.13) Productos plásticos

Tabla 7 Tamaños de partícula recomendados para polímeros como el PVC

Polímero	Tamaño de partícula (µm)
PVC	1.5 a 40 (µm)
Polietilenos	2 a 3 (µm)
Polipropilenos	1.5 a 3.5 (µm)

1.3.4 Pinturas e impermeabilizantes

Las cargas naturales como la calcita, el talco y el cuarzo son las materias primas más abundantes en la elaboración de pinturas. De las anteriores la más utilizada es la calcita (CaCO_3) debido a su disponibilidad en cantidades masivas con una calidad homogénea y constante, por un bajo costo. Además, mejora muchas propiedades como lo son la capacidad entendedora, la opacidad, apariencia mate, aumenta el efecto colorante, ajustar el brillo, impartir adhesión, incrementar el contenido de sólidos, reduce costos, incrementa la blancura, resistencia a la intemperie y mejora resistencia a la abrasión. (Fernández et al., 2020).

Las principales características buscadas en la calcita micronizada son una blancura > 90% y un índice de refracción de 1,56 a 1,6, la morfología de las partículas (laminas o nódulos), granulometría y absorción de aceite.

De acuerdo a su granulometría el carbonato de calcio puede ser utilizado en distintos tipos de pinturas, dichas clases se presentan en la tabla 8. Estos valores son representativos y algunos de ellos pueden variar de acuerdo al fabricante o al país en el cual se elabora el recubrimiento.



Figura 9 Pinturas

Tabla 8 Tamaños de partículas de distintos tipos de recubrimientos.

Usos	Tamaño de partícula promedio (μm)
Pinturas en emulsión	0.9-70
Primarios	0.9-5
Pinturas comerciales	0.9-5
Pinturas contra la corrosión	1.5-5
Pinturas industriales	0.9-2.5
Pinturas texturizadas	30-160
Recubrimientos en polvo	0.9-20

Tabla 9 Tamaños de partículas de distintos tipos de recubrimientos (continuación).

Tipo de uso	Tamaño de partícula promedio (μm)
Pinturas para señalización de caminos	0.9-20
Pinturas de silicón	0.9-160

Tintas impresión		0.9
Pastas	Cepilladas y atomizadas	500-1500
	Aplicadas con espátula	1000-3000
	Grano abierto	1000-3500
	Aplicadas con rodillo	500-2000
	decorativas	1500-2500

1.3.5 Selladores y adhesivos

El carbonato de calcio es el principal relleno para este tipo de productos por su bajo costo, alta disponibilidad, baja reactividad, baja absorción de aceite y por su característica coloración blanca. En este segmento se usa principalmente en selladores automotrices y para madera; mejorando las siguientes características: reducción de costos, incremento de la resistencia al impacto y Mejora las propiedades de cubrimiento (funciona como extendedor).



1.3.6 Abrasivos

Dentro de este sector, el carbonato de calcio micronizado encuentra su principal aplicación en productos de limpieza como los pulidores en polvo, impartiendo al producto propiedades abrasivas, además de funcionar como neutralizador del proceso, del mismo modo es usado en la elaboración de pasta dental. (Gómez et al., 2021).



Figura 10 Productos de limpieza abrasivos y dentífricos)

1.3.7 Industria alimenticia

En la industria alimenticia es utilizado tanto en la elaboración de alimentos balanceados para ganado y en el enriquecimiento de algunos productos alimenticios para consumo humano. (EFSA, 2022).

En el primer caso su uso se dirige hacia la fabricación de alimentos pollos, puercos, perros y gatos, funcionando como complemento alimenticio, ya que es fuente de calcio, además de proporcionar consistencia al producto. En el segundo segmento se utiliza para incrementar el contenido de calcio en los alimentos; sin embargo, también brinda al producto propiedades antiapelmazantes, color, regulador de pH y gasificante^{6 y 7}.



Figura 11 Alimentos

1.3.8 Muebles de Baño

La aplicación del carbonato de calcio dentro de este segmento es en el barniz utilizado para dar el acabado esmaltado a los muebles de baño ó en la formulación de la pasta cerámica, en el primer caso proporciona el aspecto vidriado que se puede apreciar en el producto final, en el segundo caso brinda mejor resistencia a la pieza en verde. (Martínez et al, 2018).

Es ideal que un carbonato de calcio utilizado en un esmalte cuente con las siguientes especificaciones:

Composición química.	SiO ₂0.67%
CaO.....55.35%	TiO ₂0.01%
K ₂ O.....0.03%	Pérdida por calcinación...43.28%
MgO.....0.16%	Blancura.....92%
Na ₂ O.....0.02%	Absorción de aceite.....12%
MnO.....0.01%	Peso específico.....2.7%
Al ₂ O ₃0.17%	Granulometría media.....10 µm
Fe ₂ O ₃ ...0.06%	

Figura 12 Muebles para baño



1.3.9 Artículos Escolares

Dentro de este segmento la principal aplicación del carbonato de calcio micronizado es como carga en los gises y en la Plastilina, impartiendoles características muy importantes como dureza, cuerpo y consistencia; así mismo, se sabe que en algunas ocasiones se llega a emplear en la fabricación de las gomas de borrar y en las pinturas wash (Vinci); sin embargo, la cantidad añadida es mínima.



Figura 13 Artículos escolares

1.3.10 Fertilizantes

Durante mucho tiempo se creyó que la productividad de un campo estaba ligada a sus principales nutrientes (nitrógeno, potasio y fosfato) de acuerdo a la teoría de la sustitución de Liebig's. Sin embargo, a principios de siglo XX algunos agricultores comprobaron lo contrario ya que muchos de sus campos quedaron arruinados y solamente mejoraron después de la introducción de la caliza como fertilizante.



Esto se debe a que el carbonato de calcio influye en el pH del suelo y por lo tanto se afectan muchos de los factores que sostienen la fertilidad del suelo, como lo son la liberación o almacenamiento de sustancias nocivas o algunos nutrientes, el desarrollo de bacteria, la resistencia del suelo a la erosión entre otros. (Díaz et al., 2019).

Como resultado de la utilización de abonos con contenido de carbonato de calcio se obtiene un suelo más poroso por tanto mejor oxigenado, una mayor capacidad de drenado y un pH de 6.2 a 7.4, ya que en este rango de pH encontramos procesos como la nitrificación o la liberación de algunos nutrientes tales como el Molibdeno, Fosforo, Potasio, Magnesio, Manganeso, Boro y Zinc entre otros.

Para poder utilizar el carbonato de calcio, en cualquiera de sus presentaciones, es necesario que contenga algunas especificaciones; sin embargo, estas en México aún no han sido desarrolladas por lo cual en este trabajo se anexa los requerimientos de pureza y granulometría en países como Estados Unidos, Alemania, mas, es imperativo que en nuestro país se desarrollen y compartan estudios para la utilización de estos productos por su gran beneficio que implica su uso.

Tabla 9 Composición química y granulometría requerida para el carbonato de calcio utilizado en países como Estados Unidos y Alemania.

País	Contenido de nutriente	Designación	Fracción gruesa	Fracción media	Fracción fina
Alemania	>75% de CaCO_3	Carbonato de calcio	97% < 3mm	70% < 1mm	--
Estados unidos	80% CaCO_3	Carbonato calcio magnesio	95% < 2.36mm	--	35% < 0.25mm

1.3.11 Agregados pétreos

Son materiales naturales seleccionados que pasan por un proceso de trituración, molienda, cribado o lavado o producidos por expansión, calcinación y fusión del excipiente que se mezclan con cemento Portland para formar concreto hidráulico.

Estos agregados se clasifican en gruesos y finos, principalmente. El primero generalmente presenta un tamaño de entre $\frac{3}{4}$ " y 3" mallas, el segundo está comprendido entre la malla 4" y la malla #200. (Jiménez et al., 2021).



Los requerimientos principales para los agregados se presentan en la tabla 10.

Tabla 10 Características requeridas por los agregados para concretos hidráulicos.

Requerimiento	Grueso
Sanidad por sulfato de sodio	10%
Masa volumétrica	1120
Resistencia al desgaste	50% Max.

Otros criterios que también son de importación no son agregados a la tabla ya que muchos de ellos son específicos para cada tipo de concreto que se desea fabricar y esta sección está enfocada únicamente a concretos hidráulicos.

1.4 Aplicaciones específicas por segmento del carbonato de calcio

A continuación, se exponen, en la tabla 11 y 12, las aplicaciones por segmento del carbonato de calcio, los productos terminados en los cuales es utilizado, las características que imparte al producto y su porcentaje de adición para cada caso. Esta tabla se integra con el fin de sintetizar parte de toda la información presentada en con anterioridad para facilitar al lector la consulta de información de ser necesaria.

Segmento	Producto terminado	Propiedades	Adición
Vidrio	• Botellas cristalinas ámbar y verde Georgia	• Brillantes • Estabilizador de red interna • Fuente de CaO • Imparte propiedades de resistencia mecánica • Da cuerpo y consistencia • Fúndete	15 – 20 %
Papel	• Papel para escritura • Papel bond para impresión	• Aumenta blancura • Aumenta durabilidad • Aumenta opacidad • Tersura • Revestimiento	10 – 15 %
Cartón	• Cartón para envoltura	• Carga • Rellena espacios vacíos	30 %
Selladores	• Selladores automotrices • Selladores de madera	• Añade sólidos • Da cuerpo • Reduce costos • Espesante	25 – 30 %
Abrasivos	• Productos de limpieza pulidores (Ajax)	• Neutraliza • Propiedades abrasivas	40 – 50 %

Pisos vinílicos	• Pisos	• Abrasividad • Carga	N.E.
----------------------------	---	--	------

Sector	Producto terminado	Propiedades	Adición
Plásticos	• Calzado • Suelas	• Aumenta rigidez • Afecta las propiedades eléctricas • Mejora resistencia química • Reduce costos • Modifica la gravedad específica • Mejora propiedades ópticas • Dureza • Abrasividad	5 – 50 %
Pinturas	• Esmaltes • Pinturas vinílicas	• Aumenta el efecto colorante • Imparte adhesión • Incrementa el contenido de sólidos • Reduce costos • Proporciona opacidad y acabado mate	calidad baja: 20% calidad alta: 5%

Alimentos balanceados	• alimentos para: pollos, perros, gatos, puercos	• Consistencia • Complemento alimenticio • Fuente de calcio	1.5 – 1.2 – 1.0 %
Muebles para baño	• Esmaltes	• Aspecto vidriado	14 %
Artículos escolares	• Gises • Plastilina	• Dureza • Cuerpo • Consistencia	N.E.
Impermeabilizantes	• Impermeabilizantes	• Consistencia • Carga	N.E.

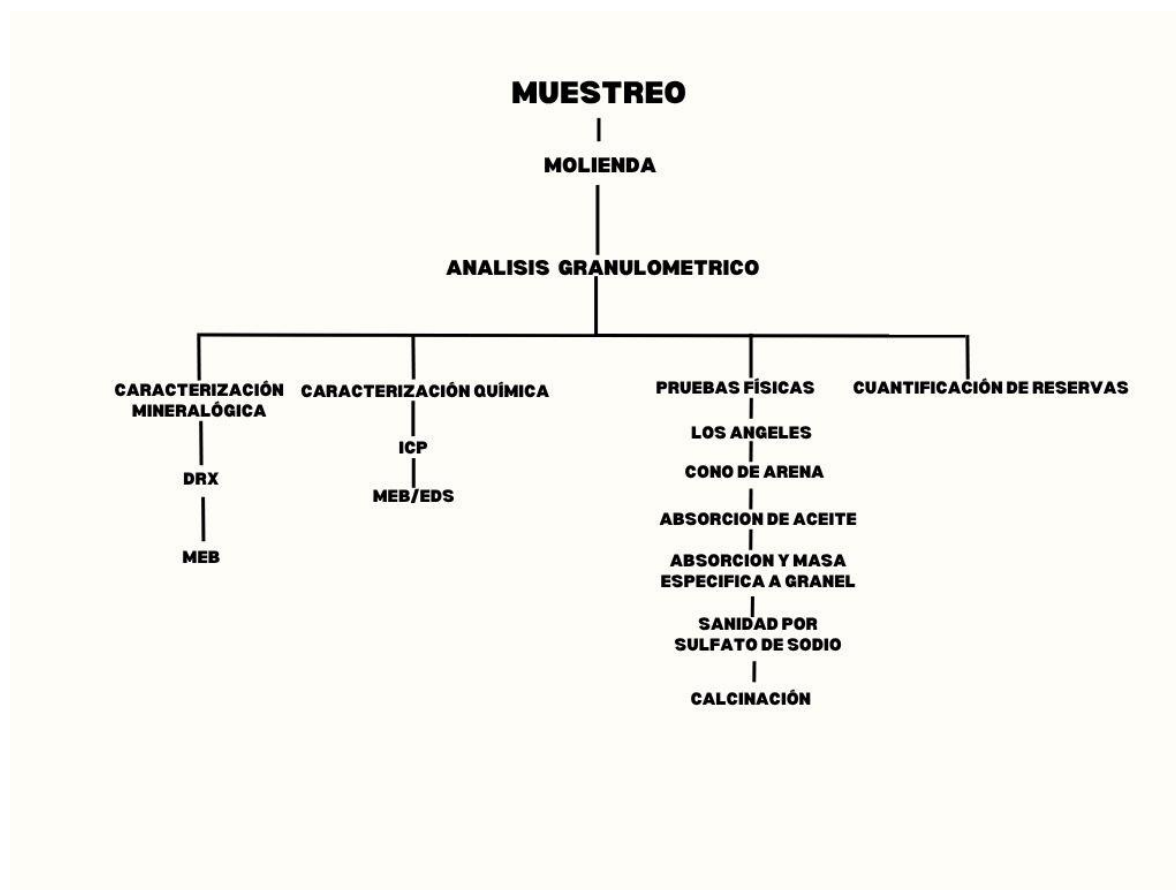
Tabla 11 Aplicaciones por segmento del carbonato de calcio micronizado.

Tabla 12 Aplicaciones por segmento del carbonato de calcio micronizado (continuación)

II Desarrollo experimental

2.1 Diseño Experimental

El diseño experimental parte del muestreo y la molienda del material, seguido de un análisis granulométrico que permite seleccionar fracciones adecuadas para su caracterización. Se realizan estudios mineralógicos mediante DRX y MEB para identificar fases cristalinas y morfología. La caracterización química se lleva a cabo por ICP y MEB/EDS para determinar composición elemental y distribución. Las pruebas físicas incluyen desgaste (Los Ángeles), forma y compactación (cono de arena), absorción de aceite, masa específica a granel y sanidad por sulfato de sodio. Finalmente, se evalúa la respuesta del material a la calcinación y se cuantifican reservas para definir su viabilidad industrial.



2.1.2 Muestreo

El carbonato de calcio utilizado en el desarrollo de este trabajo fue extraído en el ejido “El Don Jua”, municipio de Francisco I. Madero, Hidalgo, realizado en los bancos en explotación, así como en sus límites de explotación.

Se extrajeron 6 muestras, aproximadamente de 1.5 Kg cada una, tres de ellas de los bancos, 2 en los límites de explotación y 1 del mineral en stock para venta; utilizando un muestreo de tipo canal (dimensiones 2m*30cm). Siendo un primer acercamiento a la composición probable del yacimiento.

Las muestras fueron separadas en gruesos (4” a finos) para posteriores análisis.



Figura 14 Zonas de interés para toma de muestras

2.1.3. Granulometría

Se llevó a cabo en dos etapas; la primera etapa consiste en medir un tamaño de partícula por vía húmeda mediante el uso de un juego de tamices U. S. Estándar Testing Sieve No. 200, 270, 325, 400 y 500 (Figura 2.4); tamizándose una muestra de 25 g. Las fracciones obtenidas en cada tamiz y se secaron en un horno mufla (LINDBERG SB) a 105 - 110° C durante 1Hr y 10 min. Posteriormente las fracciones retenidas en cada una de las mallas fue pesada; dichos valores son presentados en la siguiente sección.



Figura 16 Juego de tamices utilizados para el análisis de tamaño de partícula.

La segunda etapa se efectuó exclusivamente para las fracciones de las muestras que pasaron por la malla #500. La prueba fue realizada en un analizador de tamaño de partícula laser Beckman Coulter LS 13320, con el cual se obtuvieron los resultados presentados en la sección del mismo nombre.

2.2 Caracterización mineralógica

Para conocer las principales especies minerales presentes en la cantera se llevó a cabo un análisis mediante Difracción de Rayos-X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

2.2.1. Difracción de Rayos X (DRX)

Se pesó un gramo de la muestra en polvo, con un tamaño de partícula promedio de -200 mallas (74 μ m), la cual fue compactada en un porta muestras para la realización del análisis de difracción de rayos X, llevado a cabo con difractómetro INEL, modelo EQUINOX 2000 el cual operó en las condiciones de trabajo mostradas en la tabla

13

Característica	Descripción
Radiación	Co K α_1
Monocromador	Germanio
Voltaje	30 KeV
Intensidad	20 mA
Tiempo barrido	15 min.

Tabla 13 Condiciones durante la realización del experimento.

El espectro obtenido por DRX se evaluó con la ayuda del paquete MATCH! y los resultados de especies minerales se muestran en la sección de resultados.

2.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

El equipo usado para el análisis de microscopía electrónica de barrido fue un microscopio JSM-IT 300, con un alcance de 500 000 ampliificaciones, spot size de 10^{-2} a 10^{-5} amp y una resolución de 20 KeV. Este equipo cuenta con un espectrómetro de Rayos - X por dispersión de energías (EDS), con el cual se determinan las intensidades relativas de los elementos presentes en el material dentro de un área de análisis de $1 \mu\text{m}^2$.



Figura 15 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Se montaron las muestras en polvo con un tamaño de partícula de -200, 270, 325 y -500 mallas, sobre una cinta de grafito y se recubrieron con oro en una evaporadora marca DENTUM VACUUM, en un tiempo de recubrimiento de 2 minutos, a una presión de 20 millitores.

En tanto que, para efectuar los microanálisis de las muestras, estas se colocaron en sobre la cinta de grafito, omitiendo el proceso de recubrimiento con oro. Los resultados de ambas pruebas se presentan en la sección de resultados.

2.3 Caracterización Química

La caracterización química se centró en la cuantificación de los elementos contenidos en el material utilizando la Espectroscopía con Plasma Inductivamente Acoplado, ICP por sus siglas en ingles.

Se prepararon tres estándares y un blanco, los estándares contenían los siguientes elementos Al, Mg, Ca, Si, Fe, y Na en las concentraciones de 10, 5 y 20 ppm. A continuación, se realizó la curva de calibración, procediéndose con la programación del equipo y la medición de los estándares preparados.

Una vez calibrado el equipo procedió a la lectura de las muestras previamente disueltas en ácido HNO_3 1M, filtradas para evitar que las partículas que no se hayan disuelto obstruya los capilares por los cuales pasa la muestra.

Las especies minerales analizadas por este método fueron SiO_2 , CaCO_3 y Al_2O_3 , principalmente, así como también Na_2O , MgO , y Fe_2O_3 , para poder realizar la caracterización química.

2.4 Caracterización de propiedades físicas

Las técnicas utilizadas en esta sección tienen como objetivo medir las propiedades del material, como lo son la densidad, abrasividad, gravedad específica, porcentaje de absorción y tamaño de partículas entre otras; pues de acuerdo con estas propiedades se determinan los posibles usos del mineral grueso (arriba de 10 pulgadas).

2.4.3 Equivalente de arena

Cono de arena

La calidad de un proceso de compactación en campo se mide a partir de un parámetro conocido como grado de compactación. Su evaluación involucra la determinación previa del peso específico y de la humedad óptima correspondiente a la capa de material ya compactado. Este método es invasivo y a la vez destructivo para la superficie en compactación ya que se basa en determinar el peso específico seco a partir del material extraído de una cala, la cual se realiza sobre la capa de material ya compactada.

Se utilizó un cilindro, diámetro y altura conocidos, con base (figura 2.1.4), se calculó el volumen del cilindro; a continuación, se pesó el cilindro incluyendo su base, también se utilizó un equipo compuesto de un frasco y un cono metálico (figura 2.1.5), se cerró la válvula del cono y se colocó este sobre las mariposas del cilindro evitando que se moviera. Posteriormente se abrió la válvula y se llenó el molde con la muestra hasta el tope, asegurándose de eliminar el exceso, con la ayuda por un cordel para evitar ejercer presión; se volvió a cerrar la válvula y se limpió la base con la brocha para después pesar.

Por diferencia de pesos se obtuvo el peso de la arena que dividida entre el volumen del cilindro nos proporcionaría el peso volumétrico. Esta función se repitió 4 veces para compensar las variaciones en el peso del agregado.

Para obtener el peso de la arena que llena el cono y la base, se procedió a pesar el equipo con arena, se colocó la base en una superficie plana (en este caso la charola, ver figura 2.1.6), se cerró la válvula y se colocó el cono sobre la placa permitiendo la fluidez de la arena dentro del cono, cuando dejó de moverse la arena dentro del frasco se cerró la válvula y se pesó el equipo con la arena sobrante.



Figura 17 Cono sobre la placa; para obtener el peso de la arena retenida

El siguiente paso es la obtención del peso volumétrico de campo, para ello se pesa el equipo con arena y la cápsula. El material extraído deberá colocarse en una bolsa de plástico para evitar que pierda agua. Después se coloca el cono sobre la base, se cierra la válvula y cuando esté listo se abre la válvula para que fluya la arena dentro de la cala y el cono, cuando se llenen ambos elementos, se cierra la válvula y se pesa el equipo con la arena restante. Se pesa el material extraído de la cala y de ahí mismo se obtiene una muestra representativa que será pesada para obtener el contenido de humedad, con estos datos se obtiene el peso específico seco máximo de campo y dividiéndolo entre el peso volumétrico seco máximo de laboratorio que indica el grado de compactación de campo.

2.4.5. Resistencia a la abrasión o desgaste de los agregados (prueba de los Ángeles)

En los agregados gruesos una de las propiedades físicas en las cuales su importancia y su conocimiento son indispensables en el diseño de mezclas, es la resistencia a la abrasión o desgaste de los agregados. Con esta prueba se conocerá la durabilidad y resistencia que tendrá el concreto para la fabricación de losas, estructuras simples o estructuras con cierta resistencia.

La abrasividad es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Este factor cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de pisos y pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben ser resistentes.

Para determinar la resistencia a la abrasión, se utiliza un método indirecto cuyo procedimiento se encuentra descrito en la Norma Mexicana NMX C-196. Dicho método más conocido como el de la Máquina de los Ángeles, consiste básicamente en colocar una cantidad específica de agregado dentro de un tambor cilíndrico de acero que está montado horizontalmente, el cilindro debe contar con un aspa de tal modo que, se produzca una trituración por impacto y por abrasión. Se añade una carga de bolas de acero y se le aplica un número determinado de revoluciones. El choque entre el agregado y las bolas da como resultado la abrasión y los efectos se miden por la diferencia entre la masa inicial de la muestra seca y la masa del material desgastado expresándolo como porcentaje de desgaste.

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{(P_a - P_b)}{P_a}$$

Dónde:

P_a = es la masa de la muestra seca antes del ensayo (g)

P_b = es la masa de la muestra seca después del ensayo, lavada sobre el tamiz 1.6 mm.

Procedimiento:

Se midieron 5000 g de muestra seca y se colocó junto con la carga abrasiva dentro del cilindro; este se hizo girar a una velocidad entre 30 y 33 RPM, girando hasta completar 500 vueltas teniendo en cuenta que la velocidad angular es constante.

Después se retiró el material del cilindro y luego se hizo pasar por el tamiz # 12 según lo establecido en la norma. El material retenido en el tamiz # 12 fue lavado y secado en el horno a una temperatura comprendida entre 105 y 110° C. Al día siguiente se cuantificó la muestra eliminando los finos y luego fue pesada.

2.4.6 Prueba de calcinación

Se introdujeron 25g de cada muestra, con tamaño de partícula menor a #200 (equivalente a 74µm), a un horno marca LECO a una temperatura de 900° C, con una velocidad de calentamiento de 15 °C/min, una vez alcanzada la temperatura deseada se mantuvo por un lapso de una hora y diez minutos, seguido de un enfriamiento lento dentro del horno.

Dicha prueba tiene el objetivo de verificar el color de quemado de la muestra y las pérdidas por calcinación.

2.4.1 Masa específica a granel y absorción.

De acuerdo a la norma NMX-C-164-1996 se pesaron 10 kilogramos (kg) que fueron lavados para asegurarse de la eliminación de cualquier tamaño de partícula menor adherido a la superficie del material. Se secó la muestra a una temperatura de 110°C ± 5 ° C durante 3 horas y media, dejándose enfriar hasta la muestra alcanzara una temperatura que permitiera su manipulación sin riesgo de sufrir quemaduras.

Posteriormente la muestra fue sumergida en agua destilada durante un periodo de 24h ± 3 h. Una vez finalizado el periodo de inmersión la muestra es extraída y secada superficialmente, asegurándose de eliminar el brillo acuoso, prosiguiendo con el pesado de la misma. Los datos obtenidos se sustituyeron en la ecuación inferior:

$$Masa\ específica = \frac{A}{(C - B)}$$

Dónde:

A = peso de la muestra seca

B = peso de la muestra después de la inmersión

C = peso de la muestra empapada con agua

Para determinar la absorción de humedad se hizo uso de los valores obtenidos para la prueba de gravedad específica sustituyéndolos en la formula siguiente:

$$Porcentaje\ de\ absorción = \left[\left(\frac{B - A}{A} \right) \times 100 \right]$$

Dónde:

A: peso de la muestra seca

B: peso de la muestra húmeda

2.4.7 Absorción de aceite.

Este es una medición que expresa en porcentaje de líquido que puede absorber el carbonato de calcio hasta su punto de saturación. Este número funciona como criterio orientativo para evaluar la superficie específica de un material; sin embargo, este no es un valor absoluto y preciso; y no ofrece ninguna información predictiva sobre la morfología o granulometría, más es indispensable para la formulación de pinturas, ya que brinda información sobre la demanda de vehículo utilizado.

La medición de Absorción de aceite se puede hacer por el método de frotado con espátula descrito en la norma ASTM D 281-2007 y de la cual se extrajo la fórmula siguiente:

$$\text{Absorción de aceite: } \left(\frac{\text{Peso inicial aceite} - \text{Peso final aceite}}{\text{Peso de la muestra}} \right) * 100$$

La realización de esta prueba consistió en el pesado 5 g de cada muestra, con una sensibilidad de 0.001, y se colocaron en una placa de vidrio o lata de acero impermeable, lo suficientemente grande para evitar pérdidas de material, (Figura 2.1.7). Se agregó aceite de linaza gota a gota (el recipiente con el aceite gotero y perilla fueron pesados previamente) y se batió al mismo tiempo hasta que se obtuvo una pasta dura y manejable, que no se rompiera; para finalizar se pesó el recipiente con el aceite una vez más para después efectuar los cálculos necesarios para esta prueba.



Figura 18 Medición del número de Attemberg

2.4.7 Sanidad por sulfato de sodio

Por medio de esta prueba se estima la resistencia de los agregados para concreto u otras aplicaciones al estar sujetos a la intemperie cuando no existe información previa disponible. La prueba consiste en la inmersión repetitiva en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio seguido por un secado parcial o completo en horno, deshidratando la sal que precipita en los poros del material. Las fuerzas internas de expansión, derivadas de la rehidratación de la sal tras la inmersión, simula la expansión del agua cuando esta es congelada.

Para la prueba fue necesario preparar una solución de sulfato de sodio decahidratado disolviendo 700g de la sal, grado reactivo, en un litro de agua a una temperatura de 25 a 30°C asegurando la presencia de cristales en el líquido. La preparación del agregado para esta muestra consiste en un lavado y secado de la muestra a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ pesando cada hora hasta obtener peso constante. A continuación la muestra fue sumergida en la solución de sulfato de sodio durante un periodo no menor a 15 horas y no mayor a 18 horas, procurando que las muestras estén siempre cubiertas por la solución y cubriendo el contenedor para que la solución no se contaminase con sustancias extrañas, además de evitar la evaporación de la misma, para estas muestras fue necesario repetir el experimento ya que la solución fresca de sulfato de sodio ataca gravemente a las muestras por lo que debe de utilizarse una solución que ya haya sido utilizada con otras muestras. Después de la inmersión, los agregados son retirados para que el exceso de sulfato de sodio drene durante quince minutos y después ser colocados en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, para retirarlas cuando tenga un peso constante, repitiendo las inmersiones y el secado diez veces. Una vez finalizado el último ciclo de inmersión y secado la muestra se lavó con una solución de cloruro de bario al 5%, esto para limpiarlas de sulfato de sodio, y después introducir las en agua a una temperatura de $43 \pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$; evitando golpes que rompan o desgasten los agregados. Para finalizar las muestras fueron pesadas anotando el valor obtenido; en base a este peso y el peso inicial de los agregados se calcula el porcentaje de pérdida de material, dicho valor no deberá sobrepasar el 10 %.

2.4.8 Cálculo y estimación de reservas

El cálculo de reservas geológicas constituye una de las etapas fundamentales en la evaluación técnico-económica de un yacimiento. Para el presente estudio, se aplicó un enfoque combinado de métodos geométricos directos, sustentado en los principios de modelado volumétrico simplificado y la clasificación de recursos conforme a las categorías establecidas por los códigos internacionales (p.ej. PERC, JORC, CIM), adaptados a un nivel de prefactibilidad local.

El volumen de material útil fue estimado inicialmente a partir de la información obtenida en campo, mediante muestreo superficial, observaciones geológicas directas y validación litológica del material expuesto. Con base en estas observaciones, se definió un cuerpo mineralizado conformado principalmente por caliza de origen arrecifal perteneciente a la Formación El Doctor, con continuidad lateral y vertical razonablemente interpretada a partir de sus características estructurales y sedimentarias.

Para el cálculo de reservas probadas, se delimitó un polígono basal definido por las áreas de muestreo directo y observación continua del material explotable. La estimación volumétrica se realizó considerando la fórmula:

$$V = A \times h$$

Donde:

- V es el volumen de reserva (m^3),
- A es el área basal muestreada directamente (m^2),
- h es el espesor promedio observado (m).

El volumen fue posteriormente transformado a toneladas mediante la aplicación de una densidad promedio de 2.6 t/m^3 , correspondiente al carbonato de calcio compactado en masa rocosa.

Para la estimación de reservas probables e inferidas, se aplicó una proyección geométrica basada en el modelo conceptual de una pirámide invertida, en la cual la base superior corresponde al área de las reservas probadas, y el vértice inferior representa la extensión teórica máxima del depósito en profundidad, limitada por el contexto geológico y tectónico. Esta forma volumétrica se justifica en tanto que las explotaciones superficiales presentan un comportamiento de avance descendente con pendiente controlada, típico en canteras de caliza masiva.

El volumen de esta pirámide invertida se calculó mediante la fórmula:

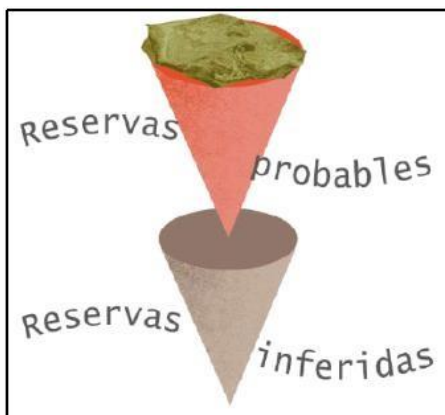
$$V_p = (1/3) \times A_b \times h$$

donde:

- V_p es el volumen proyectado como probable o inferido,
- A_b es el área basal de reservas probadas,
- h es la profundidad adicional proyectada.

Esta metodología permite generar un modelo razonable de continuidad del depósito, bajo el supuesto de homogeneidad litológica y sin cambios abruptos en la calidad del mineral, basándose en los datos conocidos. La clasificación entre probables e inferidas se realizó conforme al grado de confianza geológica asociado a la información: se asignaron como probables aquellas porciones proyectadas adyacentes a los puntos de muestreo con control estructural y litológico definido, y como inferidas aquellas zonas extendidas más allá del radio de influencia directa, o bajo condiciones estructurales menos controladas.

Finalmente, la suma de los volúmenes obtenidos por categoría fue multiplicada por la densidad del material para obtener las toneladas totales por categoría, considerando los factores de recuperación en fases posteriores del análisis económico.



III Resultados

3.1 Análisis granulométrico

En la tabla 14 a, se muestran los datos obtenidos del análisis granulométrico aplicado a la muestra correspondiente a la mezcla de carbonatos; a partir de los cuales, apreciamos claramente que las partículas menores a 32 μm , con un 70% del peso total, son las predominantes.

Tabla 14 Porcentaje de pesos acumulados en las mallas de la muestra Z11.

No. DE MALLA	TAMAÑO DE PARTÍCULA	PESO (GRAMOS)	%PESO
-170 +200	90	0	0
-200 +230	75	0.17	0.77661032
-230 +270	63	0.3	1.37048881
-270 +325	53	0.45	2.05573321
-325 +400	45	1.22	5.57332115
-400 +500	38	4.32	19.7350388
-500	32	15.43	70.4888077

A este 70% de la muestra fue aplicado un análisis de tamaño de partícula láser arrojando como resultado que el tamaño promedio es de 14.76 μm , entre los rangos 30.44 μm y 3.69 μm ; y una moda de 21.69 μm , ver tabla 3.1b, en casos como este es importante señalar que el uso de la moda es primordial ya que nos indica que el tamaño de partícula preponderante; por lo tanto, la muestra analizada está compuesta en su mayoría por tamaños de partícula del tamaño antes descrito. Para apreciar con mayor facilidad estos valores se presenta el gráfico 3.1.1 donde el pico predominante indica la moda.

Tras este análisis la muestra puede ser utilizada en la en la industria de plástico, principalmente PVC, como relleno siempre y cuando sufra una clasificación de tamaños previa.

Tabla 15 Resultados del analizador de tamaño de partícula láser muestra "Z11"

MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL		μm
Media		14.76
Máximo		30.44
Mínimo		3.69
Moda		21.69

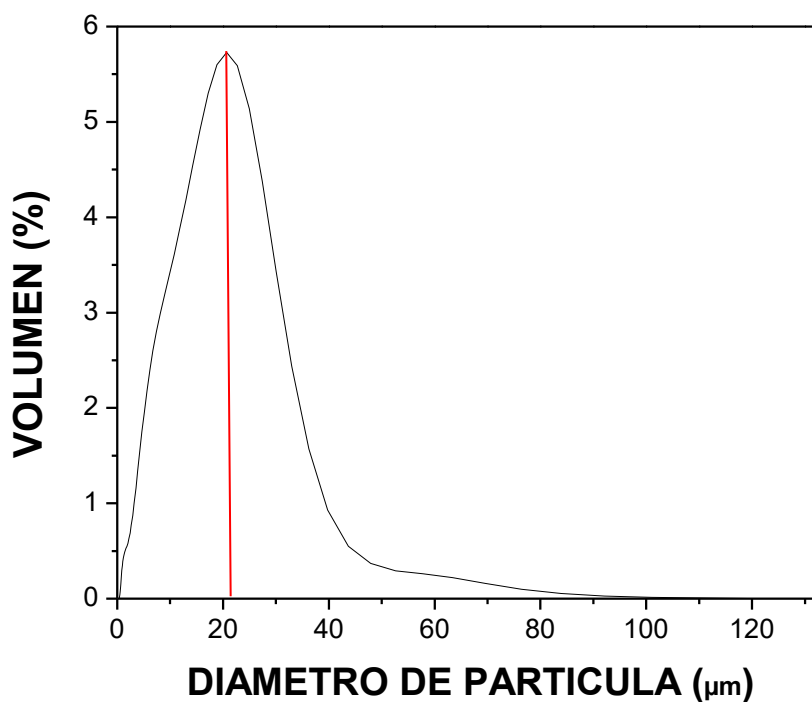


Figura 19 Distribución de tamaño de muestra de partícula donde la moda se encuentra señalada con la línea roja

Los datos obtenidos tras el análisis granulométrico aplicado a la muestra denominada “blanco” se muestran en la tabla 3.1.2a. De esta tabla resaltaremos el hecho que los tamaños de partícula menores a 32 μm representan el 73.54% de la muestra total, mientras que el resto de los tamaños de partícula superiores conforman el 26.45%

Tabla 16 Porcentaje de pesos acumulados en las mallas de la muestra “ZI3”.

No. DE MALLA	TAMAÑO DE PARTÍCULA	PESO (GRAMOS)	%PESO
-170 +200	90	0.11	0.5482
-200 +230	75	0.06	0.2283
-230 +270	63	0.44	2.0101
-270 +325	53	0.77	3.5633
-325 +400	45	1.2	5.4820
-400 +500	38	3.2	14.6186
-500	32	15.9	73.5497

Este 73.54% de la muestra tiene un tamaño de partícula medio de 8.30 μm entre los rangos de 20.31 μm y 1.44 μm ; y una moda de 5.35 μm , ver tabla 3.1.2b, lo que nos indica que este tamaño de partícula, es el que compone en su mayoría a la muestra, la moda es señalada con una línea roja en el pico más alto ver figura 3.1.2 y por ningún motivo debe ser confundida con la el borde siguiente ya que por definición la moda es una medida de tendencia central la cual indica el la observación que más veces se repite. De acuerdo a estos resultados la muestra puede ser utilizada como material industrial alternativo en los ramos de plásticos como relleno, papel (cartón), pinturas; siempre y cuando este pase por un proceso de clasificación previo y adecuado para cada sector industrial.

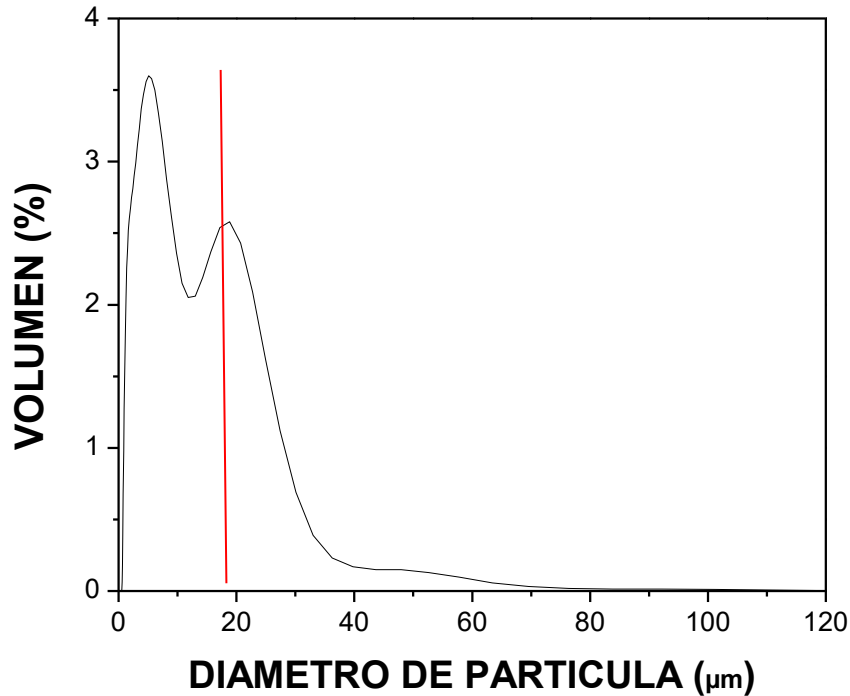


Tabla 17

Figura 20 Distribución de tamaño de “Z13” de partícula donde la moda se encuentra señalada con la línea roja.

Resultados del analizador de tamaño de partícula láser muestra Z13

MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL		μm
Media		8.30
Máximo		20.31
Mínimo		1.44
Moda		5.35

Tras el análisis granulométrico de la muestra llamada “gris” se obtuvieron los datos contenidos en la tabla 3.1.3a, en base a ellos obtenemos una descripción general de la muestra teniendo que las partículas de tamaños menores a 32 μm representan el 73.18% de la muestra. La muestra puede ser utilizada como material industrial

alternos en los ramos de plásticos, pinturas; siempre y cuando este pase por un proceso de clasificación previo y adecuado para cada sector industrial.

3.2 Caracterización mineralógica por DRX

Como resultado de la aplicación de la prueba de rayos X, se obtuvieron como resultados principales tres espectros de difracción los cuales se presentan a continuación.

El espectro presentado en la figura 26 fue obtenido tras el análisis de la muestra “Z13” del cual después de ser interpretado se confirmó la presencia de calcita formando completamente a la muestra. Hay una pequeña presencia de Mg en la estructura, lo que indica una traza de dolomitización, aunque no lo suficiente para clasificarla como dolomita.

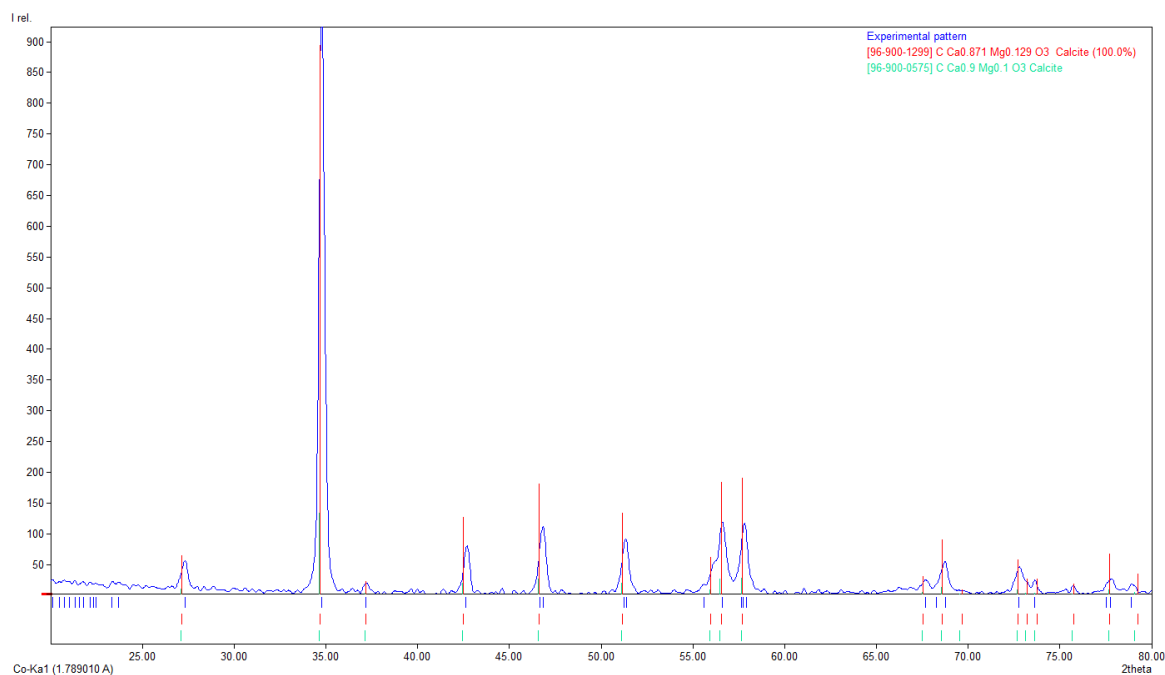


Figura 26 Espectro de difracción de rayos X de la muestra “Blanco Z13”.

En cuanto a la muestra “ZI5”, espectro mostrado en la figura 3.1.12, se ha confirmado como componente principal a la calcita el resto se encuentra en proporciones muy pequeñas y de acuerdo a la literatura esto sigue indicando la alta pureza de la caliza. ver figura 27.

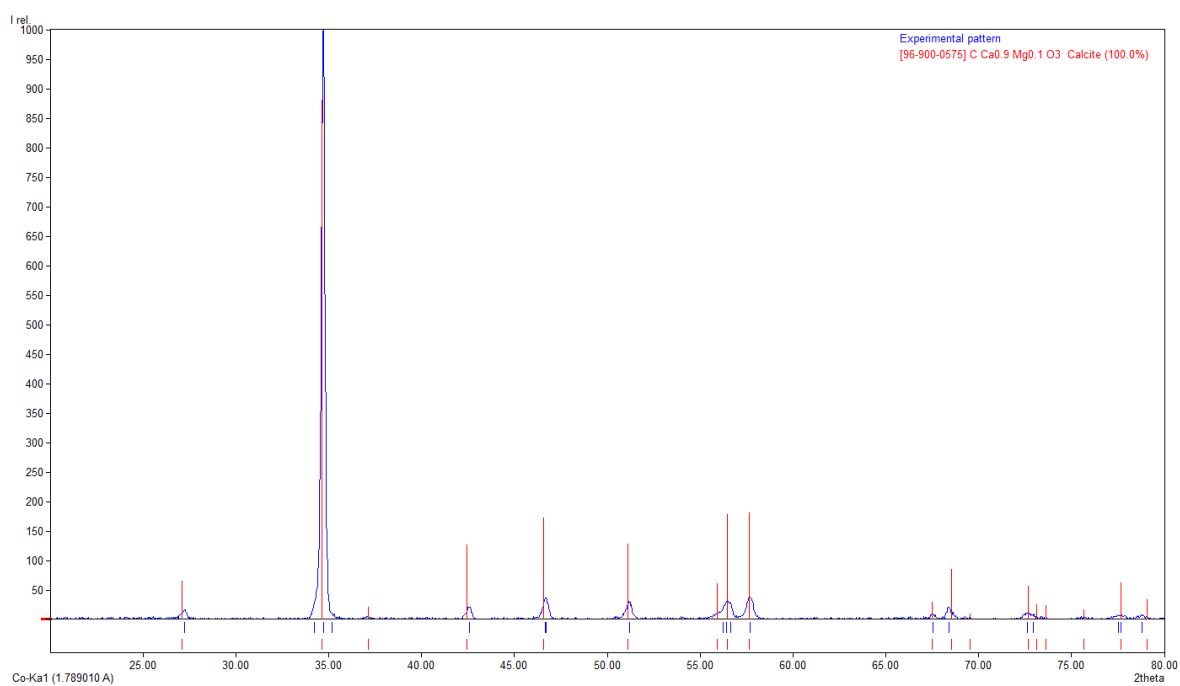


Figura 27 Espectro de difracción de rayos X de la muestra “ZI5”.

La muestra “ZI1”, figura 28, solo se pudo identificar como componente principal la calcita, por lo tanto la contaminación con Fe_2O_3 , revelado por ICP, como se ha sostenido hasta ahora se debe al almacenamiento y su trayecto en la maquinaria; una posible solución a esta contaminación sería ubicar el material en un área donde se reduzca su contacto con agentes extraños, otra solución sería embazar el material conforme se colecta y por último cambiar las partes del maquinaria que contribuyen a la contaminación.

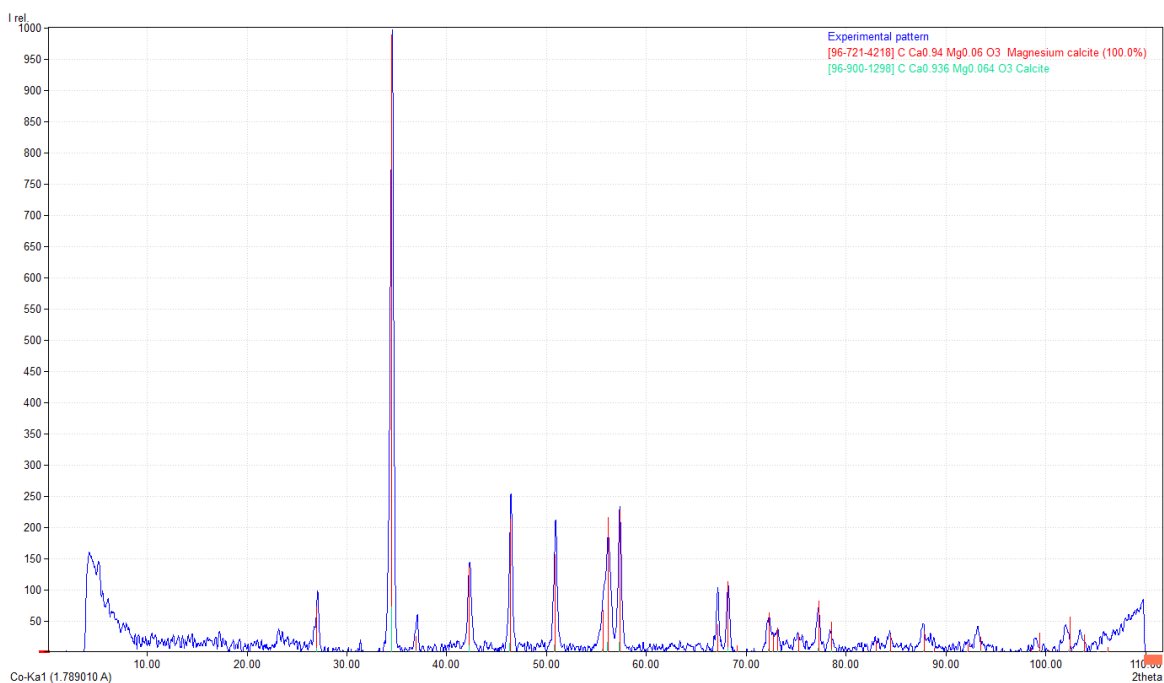


Figura 28 Espectro de difracción de rayos X de la muestra ZI1”.

3.3 Análisis químico por ICP

En la tabla 28 se presentan la concentración de los compuestos presentes en las muestras analizadas, Fe_2O_3 , SiO_2 , CaCO_3 , MgO , Na_2O y Al_2O_3 , por espectroscopia de plasma acoplado (ICP); después de la interpretación de los resultados.

El análisis químico mediante espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP) reveló un contenido mayoritario de carbonato de calcio del 80%, acompañado de un 15.5% de sílice (SiO_2) y 3.00% de alúmina (Al_2O_3), los cuales constituyen las principales impurezas. El bajo contenido de MgO (0.12%) indica una baja dolomitización, lo cual es favorable para aplicaciones industriales como pinturas, plásticos y carbonato precipitado (PCC), siempre que se aplique un proceso de purificación adecuado (flotación, clasificación óptica o calcinación selectiva). Aunque la presencia de Fe_2O_3 (0.17%) no impide aplicaciones generales, representa un obstáculo para mercados premium donde la blancura y pureza química son críticas. Por tanto, el yacimiento posee un potencial económico interesante con valor agregado si se implementan procesos de beneficio que reduzcan las impurezas silíceas y mejoren la blancura del producto final.

Tabla 23 Composición química de las muestras analizadas a través de Espectroscopia de Absorción Atómica.

MUESTRA	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	CaCO_3
Carbonato	15.5	3	0.17	0.12	0.184	80

3.4 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia de Energía Dispersa (EDS).

Como resultado del análisis por microscopia electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopía de energía dispersa se obtuvieron las imágenes y espectros que se presentan y discuten a continuación.

Figura 23 Microfotografía de mineral de caliza donde se observa una imagen general a 1000X obtenidas en un microscopio JSM-IT300 con un alcance de 500000 magnificaciones y una resolución de 20.00 KeV.

Mediante electrones secundarios se obtuvieron imágenes con partículas de 8 a 16 μm , predominando cristales anhedrales de calcita, lo que indica una cristalización rápida sin desarrollo de caras. Se identificaron fragmentos con núcleos esparíticos bien formados, evidenciando recristalización y cementación secundaria, típica de ambientes marinos someros. La matriz muestra micrita y limo fino, compatibles con una sedimentación. También se observaron fragmentos rotos de calcita, posiblemente por actividad tectónica o erosión. Mayormente CaCO_3

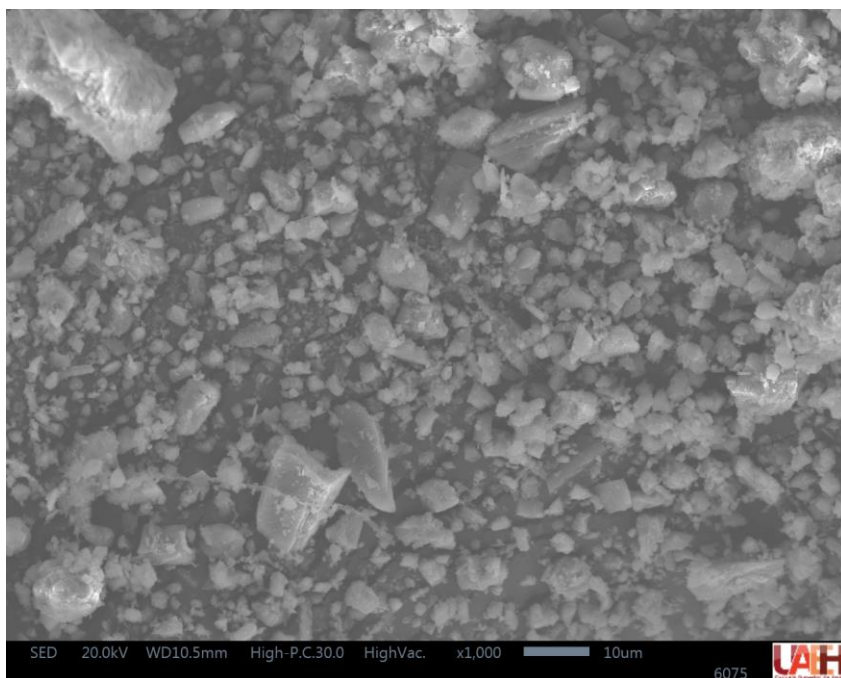
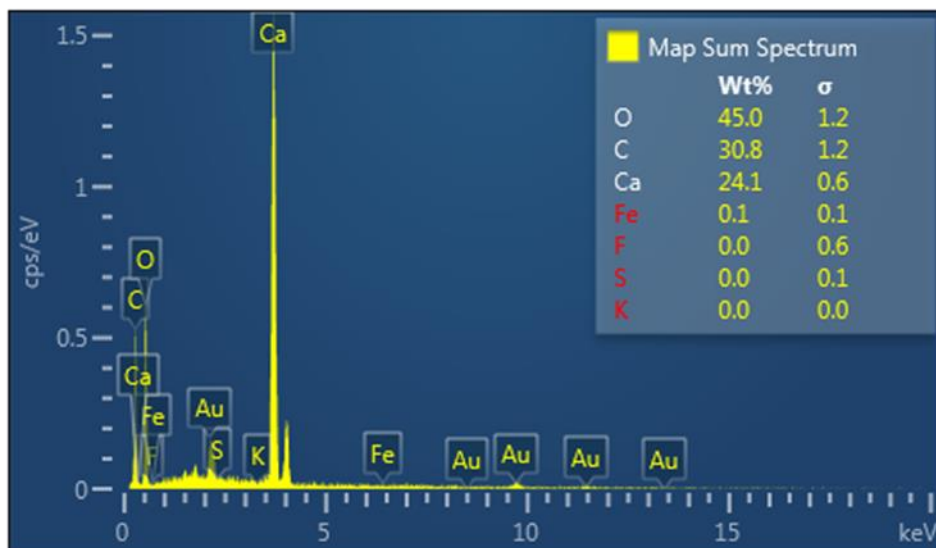
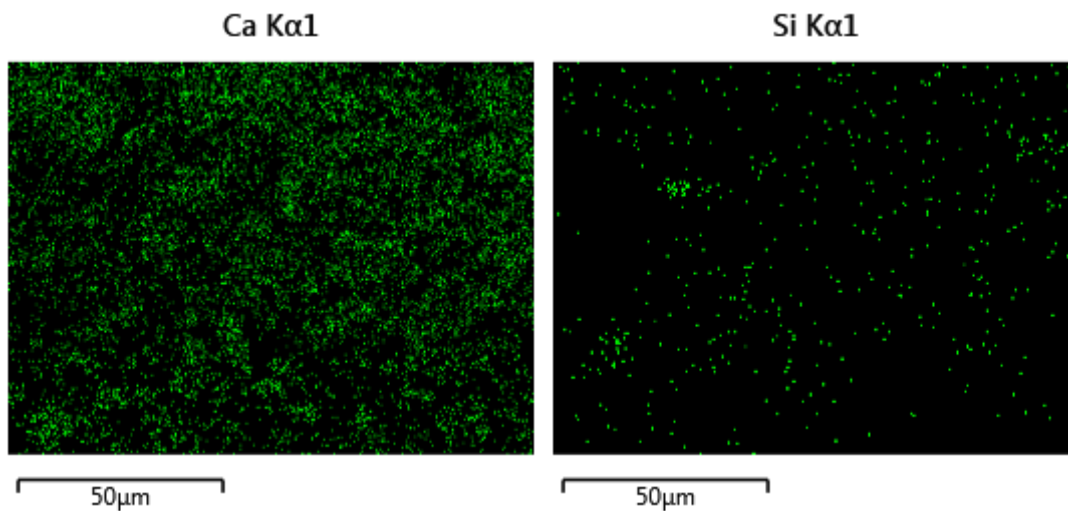


Figura 23 Micrografía de carbonato "Z11"

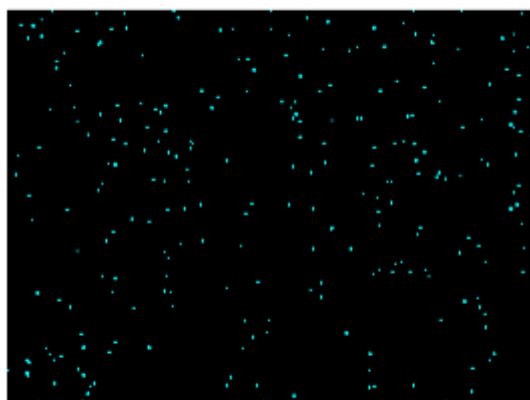
En el espectro de la figura 23 realizado por microanálisis de energías dispersivas EDS se puede apreciar la presencia de elementos mayoritarios calcio, carbón y oxígeno, teniendo como minoritarios el hierro.



En la figura 23 se presenta el mapeo correspondiente de la muestra de caliza donde se puede apreciar la presencia del calcio, carbón, oxígeno, hierro y magnesio principalmente. Teniendo como resultado 99.9 de carbonato de calcio

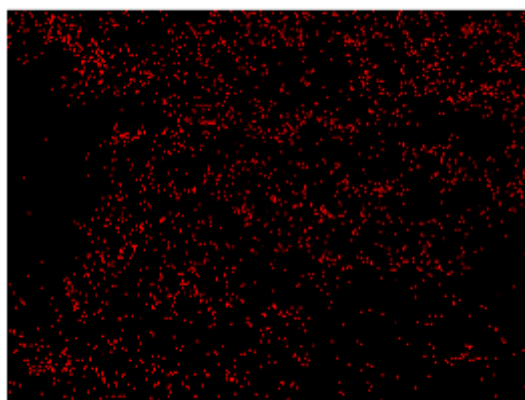


K K α 1



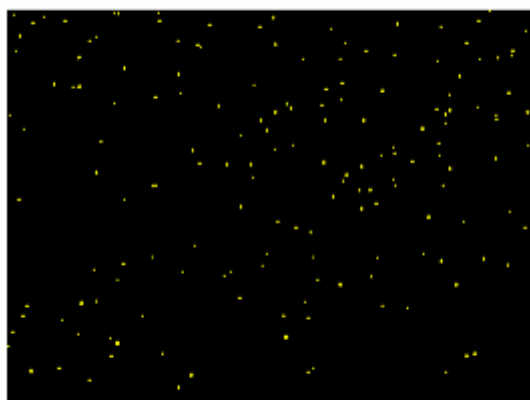
50 μ m

O K α 1



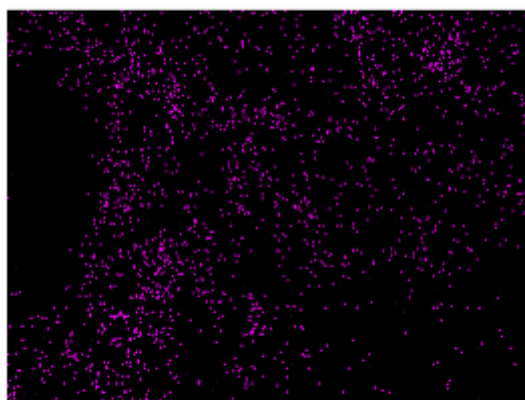
50 μ m

Ti K α 1



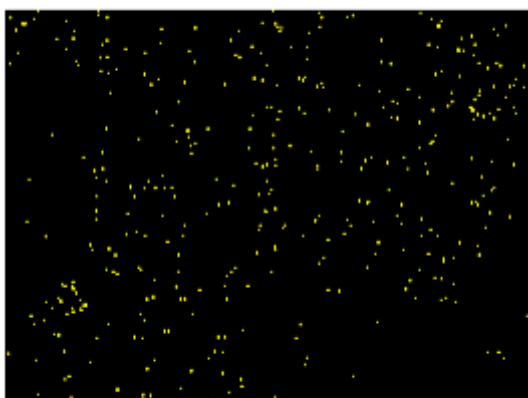
50 μ m

C K α 1_2



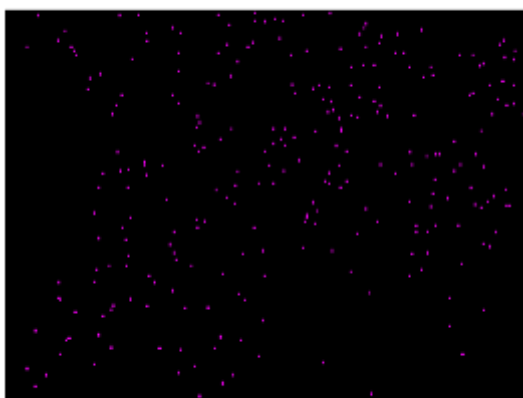
50 μ m

Al K α 1



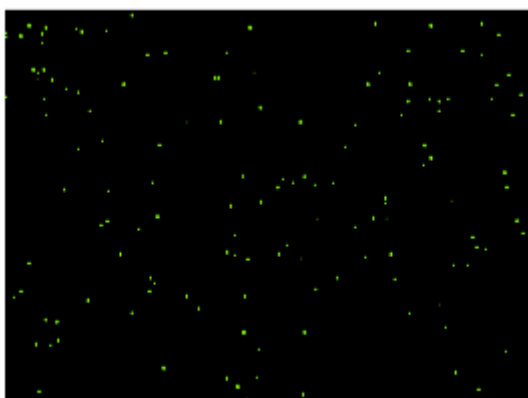
50 μ m

Mg K α 1_2



50 μ m

Fe K α 1



50 μ m

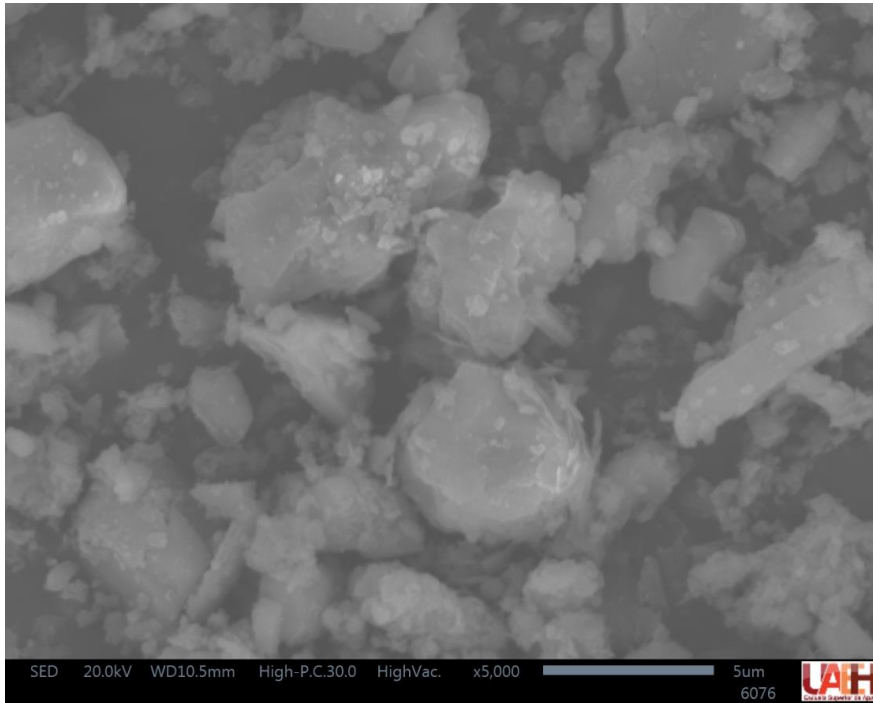
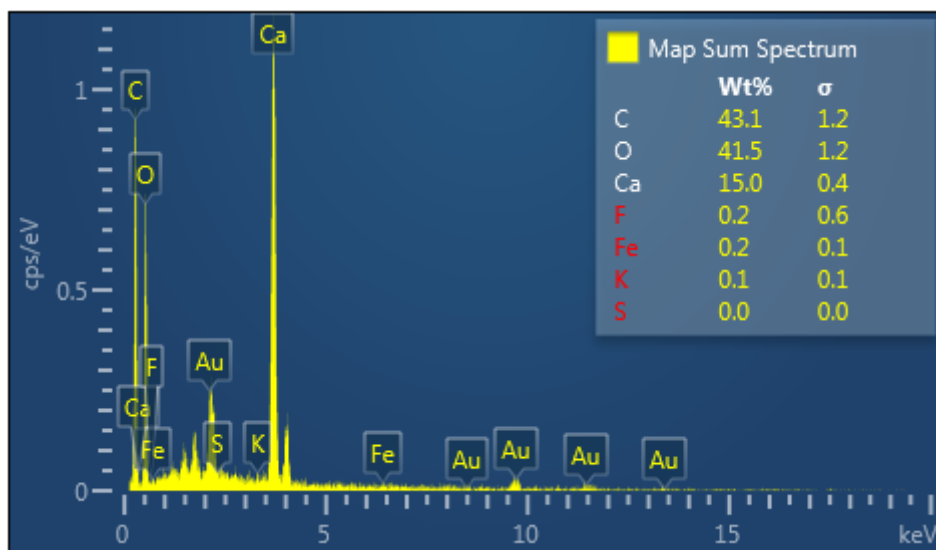


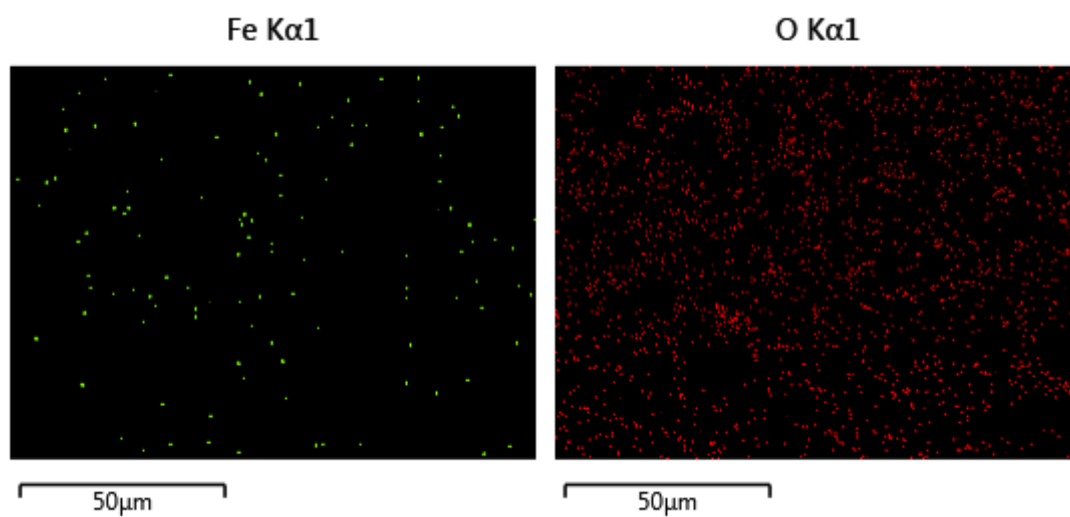
Figura 24 Micrografía de la “Z15”

Figura 24 Microfotografía de mineral de caliza donde se observa una imagen general a 1000X obtenidas en un microscopio JSM-IT300 con un alcance de 500000 magnificaciones y una resolución de 20.00 KeV. Mediante el uso de electrones secundarios se obtienen imágenes en las que se observan partículas con tamaños entre 1 y 6 μm , presentando cristales anhedrales de calcita, lo que sugiere un proceso de cristalización rápida sin desarrollo de caras cristalinas definidas. Se identifican fragmentos carbonáticos con núcleos de esparita bien desarrollados dentro de una matriz de micrita y limos finos, características de un ambiente de sedimentación marina. Asimismo, se observan cristales de calcita fracturados, lo que podría estar asociado con actividad tectónica o procesos de erosión mecánica.

El análisis EDS confirma una composición mayoritariamente calcítica (CaCO_3) con un nivel de sustitución de magnesio, sugiriendo una posible dolomitización incipiente. No se identifican evidencias significativas de palygorskita en la muestra, lo que sugiere que la influencia de las fallas en la mineralogía del depósito podría ser menor de lo esperado.



En la figura 24 se presenta el mapeo correspondiente de la muestra de caliza donde se puede apreciar la presencia del calcio, carbono, oxígeno, hierro y magnesio.



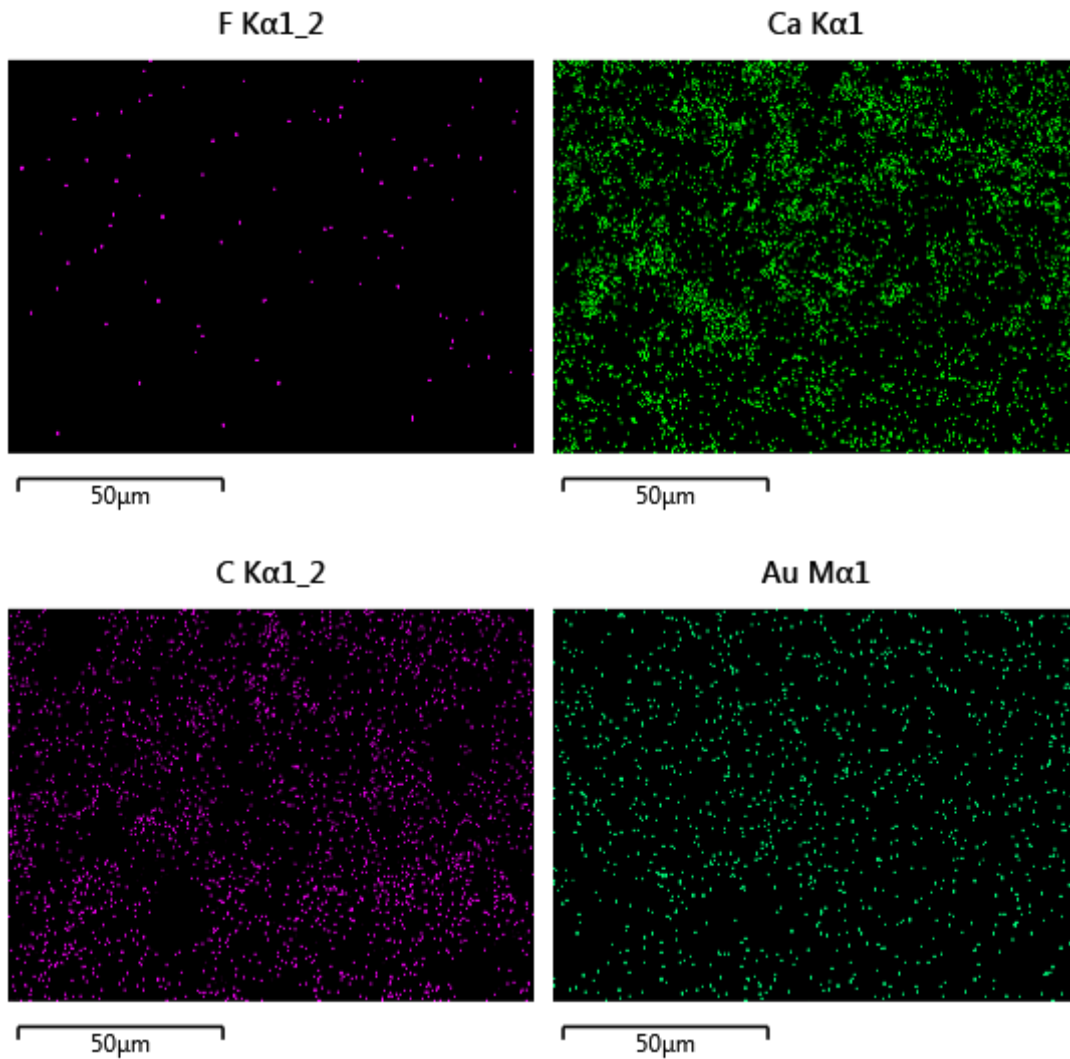


Figura 25 Microfotografía de mineral de caliza donde se observa una imagen general a 1000X obtenidas en un microscopio JSM-IT300 con un alcance de 500000 magnificaciones y una resolución de 20.00 KeV.

Mediante el uso de electrones secundarios se obtienen imágenes en las que se observan partículas con tamaños entre 3 y 8 μm , presentando cristales anhedrales de calcita, lo que sugiere un proceso de cristalización rápida sin desarrollo de caras cristalinas definidas. Se identifican fragmentos carbonáticos con núcleos de esparita bien desarrollados dentro de una matriz de micrita y limos finos, características de un ambiente de sedimentación marina. Asimismo, se observan cristales de calcita fracturados, lo que podría estar asociado con actividad tectónica o procesos de erosión mecánica.

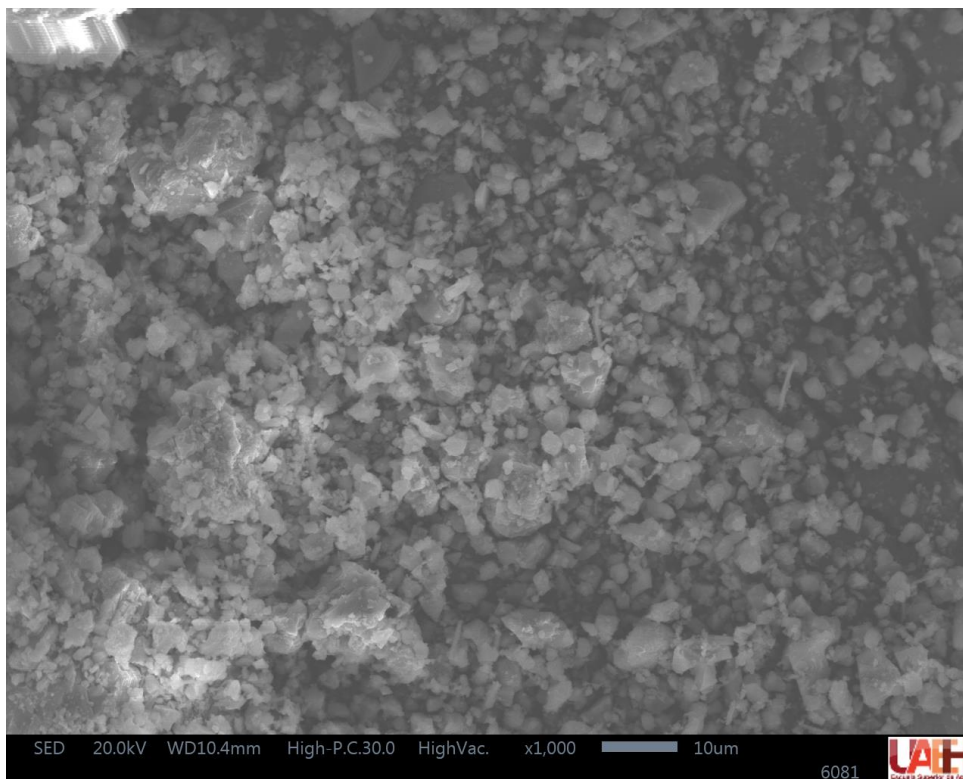
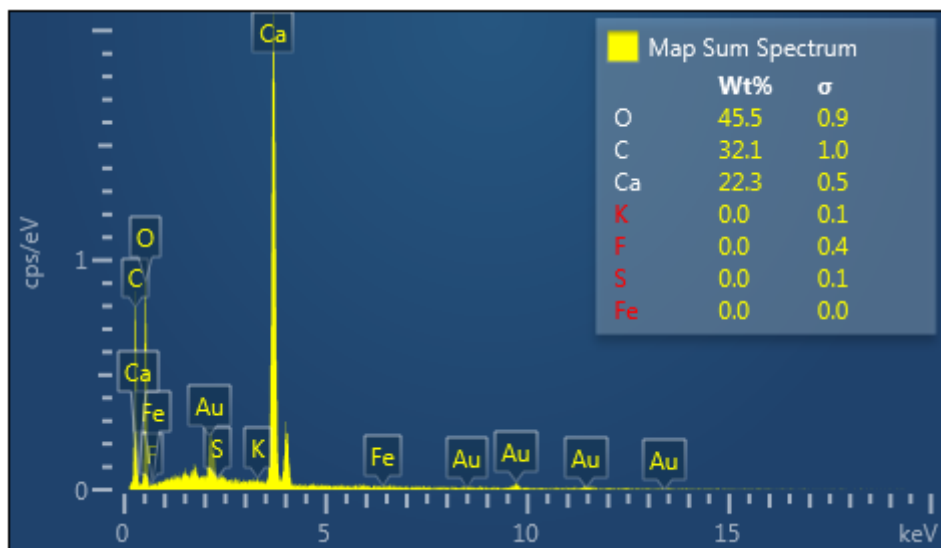
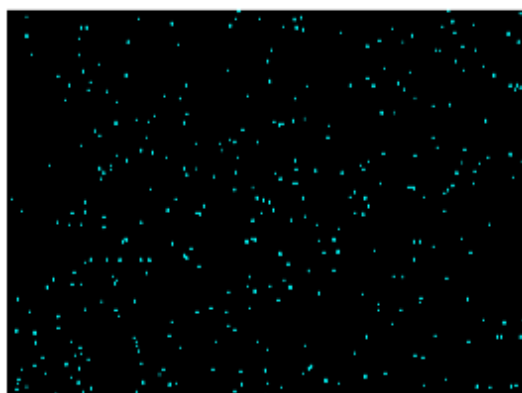


Figura 25 Muestra "Z14" morfología cubica de las partículas de carbonato de calcio obtenido a partir de la caliza.

En el espectro de la figura 25 realizado por microanálisis de energías dispersivas EDS se puede apreciar la presencia de elementos mayoritarios calcio, carbono y oxígeno, teniendo como minoritarios el hierro

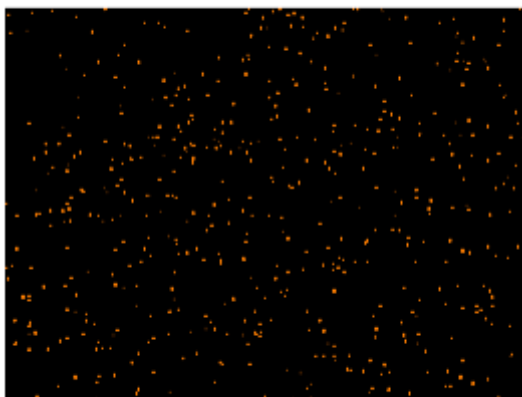


K K α 1



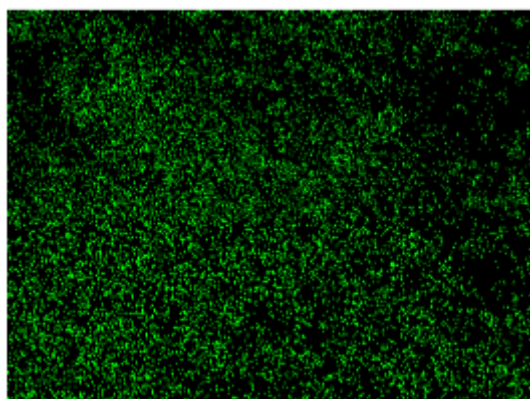
50 μ m

S K α 1



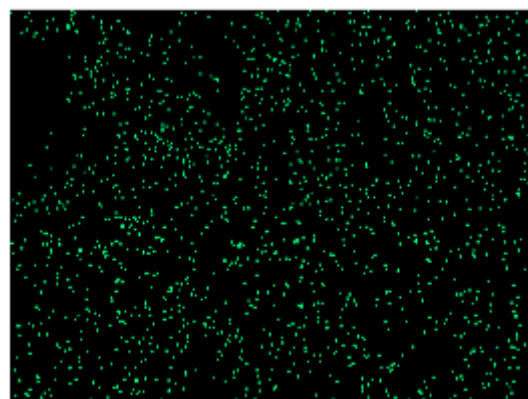
50 μ m

Ca K α 1



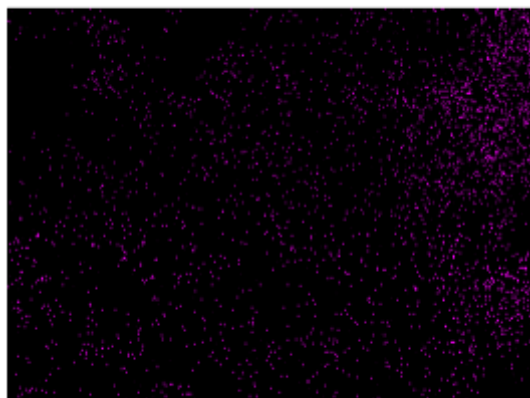
50 μ m

Au M α 1



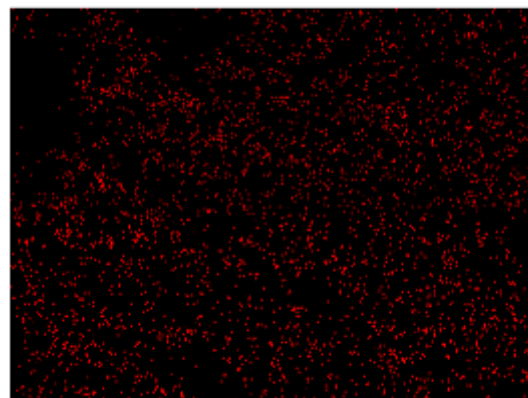
50 μ m

C K α 1_2



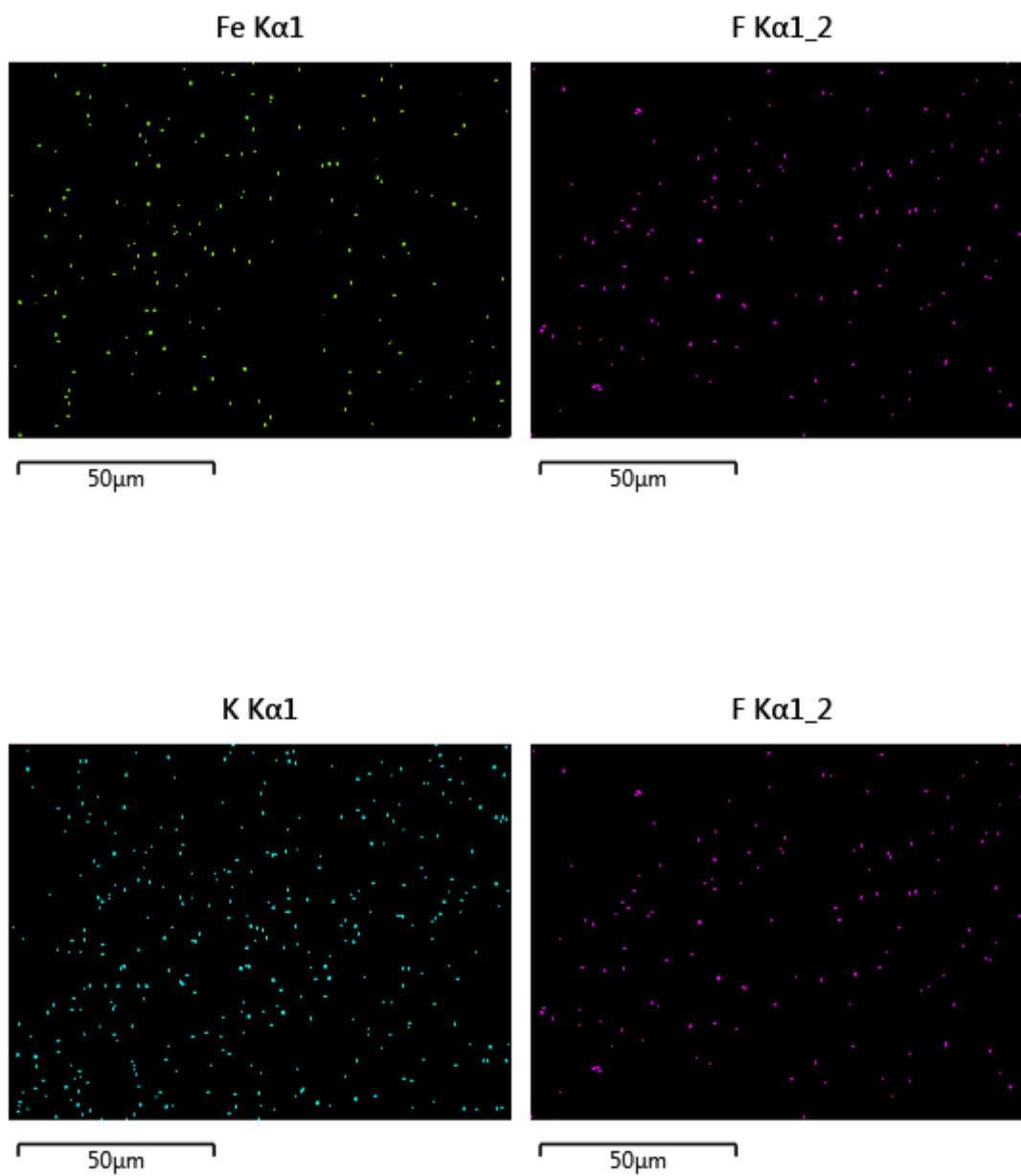
50 μ m

O K α 1



50 μ m

En la figura 25 se presenta el mapeo correspondiente de la muestra de caliza donde se puede apreciar la presencia del calcio, carbón, oxígeno, hierro y magnesio principalmente.



3.5 Pruebas Físicas

Absorción de aceite

Los resultados de la prueba de aceite se muestran en la tabla 22, dichos resultados indican que la muestra ZI1 es la muestra con mayor valor de absorción de aceite, lo que indica una elevada área superficial. La muestra ZI4 presenta los valores intermedios; lo que concuerda con el análisis granulométrico. En tanto que la muestra denominada ZI5 es la que tiene menor valor. Estos valores son muy similares a los que ofrecen algunos productos ya existentes en el mercado, la ventaja es que estas muestras no cuentan con ningún proceso de molienda ni de clasificación por tamaños, lo que la hace una opción a considerar si se desea incursionar en este mercado.

Muestra	Absorción de aceite %
ZI4	17.4
ZI1	32.52
ZI5	17.08
ZI3	29.04

Tabla 17 Valores de absorción de aceite de las muestras analizadas.

3.6 Absorción y masa específica a granel

De acuerdo a las fórmulas presentadas en la sección de metodología de esta prueba Presentadas en el tema 2.4.7; se calcularon los valores de absorción y masa específica a granel de las tres muestras analizadas con estas pruebas. Dichos resultados se presentan en la tabla 23. Dichos resultados son de suma importancia en el control del agua en el concreto, en la proporción de mezclas y control del concreto; por lo que deben ser reportados.

Tabla 18 Resultados de porcentaje de absorción y masa específica a granel.

Nombre de la muestra	Porcentaje de absorción	Masa específica a granel (Kg/m ³)
Mezcla ZI4	1.56	2.60
Gris ZI5	4	2.60
Blanco ZI3	1.55	2.60

3.7 Cono de arena

De esta prueba se calcularon la masa volumétrica suelta y el porcentaje de compactación de las muestras. Estos resultados se presentan en la tabla 24

Muestra	Masa suelta	volumétrica	Porcentaje de compactación
ZI3	1220		31.57
ZI5	1220		31.45
ZI4	1220		31.55

Tabla 19 Masa volumétrica suelta y porcentaje de compactación de las muestras analizadas.

En base a los resultados obtenidos y la masa volumétrica requerida para agregados pétreos, presentados anteriormente, encontramos que nuestro material no cumple con esta condición; pues de acuerdo a la norma N-CTM-2-02-002/02 el máximo valor de masa volumétrica suelta para agregados gruesos y finos es de 1040.

3.8 Prueba de los ángeles

Tras la ejecución de la prueba de los ángeles a cada una de las muestras analizadas y la realización de los cálculos adecuados se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 25, que de acuerdo con la literatura se encuentran dentro de los límites establecidos, deben estar por debajo del 50% de ser utilizados para un concreto utilizado en aplicaciones con abrasión, presentando las muestras valores tales como 16.10 para la muestra ZI5, 22.52 para la muestra ZI3 y 16.6 para la muestra ZI4. Por tal motivo estas muestras en base a estas pruebas pueden ser utilizadas como agregados pétreos en concretos o asfaltos utilizados en ambientes abrasivos tales como caminos y carreteras.

Tabla 20 Resultados de la prueba de abrasión de los Ángeles

Nombre muestra	Porcentaje de abrasión (%)
ZI5	16.10
ZI3	22.52
ZI4	16.6

3.9 Sanidad por sulfato de sodio

Los resultados obtenidos de la prueba para medir la sanidad por sulfato de sodio se presentan en la tabla 26, en dicha tabla podemos apreciar que la muestra ZI3 es la que presenta mayor pérdida en este análisis; esto podría deberse a que la solución de sulfato de sodio, aun cuando se utilizó una solución previamente utilizada para evitar el ataque excesivo en la muestra, ataca a esta muestra debido a que es su mayoría carbonato de calcio, calcita; sin embargo, aun así la muestra se encuentra dentro de los límites permitidos para su utilización como agregado.

Tabla 21 Porcentajes de pérdida por sulfato de sodio.

Muestra	Porcentaje de pérdida (%)
ZI5	5
ZI3	8
ZI4	3

En cuanto a las muestras ZI4 y ZI5, ambas presentan bajos valores por lo tanto son recomendables para su utilización como agregados pétreos ya que la norma NMX-C-075 ONNCCE indica que los valores requeridos para esta prueba deben ser iguales o menores al 10% de pérdida.

3.10 Prueba de calcinación

Como resultado de la prueba de calcinación se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 27, como principal característica del carbonato de calcio es que no existe cambio alguno en la coloración, aplicable solo a las muestras ensayadas, un aspecto importante en cuanto a la apariencia de las muestras es la aparición de pequeños gránulos frágiles al tacto; lo que podría deberse a la migración del CO_2 de. En cuanto a las perdidas por calcinación todas las muestras presentaron perdidas por arriba del treinta por ciento rondando entre los porcentajes límites para esta prueba (42 a 45 %).

Tabla 22 Resultados de la prueba de calcinación

Muestra	Perdida por calcinación (%)	Color de quemado
ZI5	42	Blanco
ZI3	43	Blanco
ZI4	43	Blanco
ZI1	44	Blanco

4.0 Estimación y cálculo de reservas

Para el cálculo se consideraron 20 ha, se realizaron triangulaciones para obtener el volumen por secciones y posterior el volumen total, esto debido a la geometría compleja del banco de material, teniendo un total de 14 secciones, que se volvieron pirámides y polígonos al visualizarlos en tercera dimensión.



Figura 29 Secciones

Tabla 4. Volúmenes obtenidos		
Sección	Volumen	Volumen total
1	880,652.10 m ³	9,696,453.71 m ³
2	1,065,140.79 m ³	
3	834,585.71 m ³	
4	360,061.70 m ³	
5	479,354.61 m ³	
6	261,503.77 m ³	
7	741,247.48 m ³	
8	605,161.87 m ³	
9	779,847.94 m ³	
10	1,200,159.80 m ³	
11	756,367.75 m ³	
12	531,635.19 m ³	
13	431,414.32 m ³	
14	769,320.66 m ³	

[Tabla 24 Volúmenes de secciones](#)

El volumen total obtenido del cálculo de reserva fue de 9,696,453.71 metros cúbicos y considerando una densidad de 2.6 ton/m³ obtenemos su tonelaje de las reservas probadas, dicha cantidad lo afectamos por el 50%, terminando en 4,848,226.85 metros cúbicos, obteniendo reservas probables, posteriormente, para poder calcular las reservas inferidas, se considera el área de la superficie de las reservas probadas el volumen total se afecta por un 25% resultando 2,424,113.43 metros cúbicos.



Figura 29 Área total

Total, de reservas preliminares de caliza en predio "Denganthza"			
Nombre	Volumen	Tonelaje	Densidad del material
Reservas Probadas	9,696,453.71 m ³	25,210,779.64 ton	2.6 gr/cm³
Reservas Probables	4,848,226.85 m ³	12,605,389.82 ton	
Reservas Inferidas	2,424,113.43 m ³	6,302,694.91 ton	
TOTAL	16,968,793.99	44,118,864.37 ton	

[Tabla 25 Tonelajes finales](#)

Considerando la estimación total de reservas con potencial económico que se presentan en el área visitada, de acuerdo con las consideraciones realizadas se estima un potencial de: Probadas: 25,210,779.64 toneladas, Probables: 12,605,389.82 toneladas, Inferidas: 6,302,694.91 toneladas y el Gran total: 44,118,864.37 toneladas.

Viabilidad del aprovechamiento del Carbonato de calcio en posibles usos industriales.

La caracterización del lote minero “El Don Jua” permitió identificar propiedades clave del carbonato de calcio. De acuerdo con las pruebas mineralógicas, químicas y físicas realizadas, se puede afirmar que el yacimiento presenta condiciones geológicas favorables para su aprovechamiento, aunque requiere procesos de beneficio para alcanzar los estándares exigidos por sectores industriales de alto valor agregado. Los resultados de difracción de rayos X (DRX) confirmaron la presencia predominante de calcita como fase mineral principal, lo que valida el potencial del yacimiento como fuente de carbonato de calcio. La presencia de otros minerales fue menor, lo cual facilita los procesos de purificación. Por su parte, las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) mostraron cristales de calcita anhedrales, lo que sugiere una cristalización rápida. La identificación de fracturas en los cristales puede deberse a actividad tectónica y puede facilitar la trituración en etapas de procesamiento. Adicionalmente, se observó esparita dentro de una matriz micrítica, propia de ambientes de sedimentación marina, lo que concuerda con la interpretación geológica de origen arrecifal.

El análisis químico por ICP reveló un contenido promedio de 80% de CaCO_3 , con impurezas representadas principalmente por sílice (15.5%) y óxidos de aluminio (3.0%) y hierro (0.17%). Estos niveles de impurezas, aunque moderados, afectan la blancura y pureza del material, lo cual limita su aplicación directa en las industrias farmacéutica o alimentaria. No obstante, estos valores se encuentran

dentro de rangos tratables mediante flotación selectiva o PCC por lo que el material es viable para producir carbonato de calcio micronizado o caliza de grado industrial tras procesos de beneficio.

Desde el punto de vista físico, los resultados obtenidos en las pruebas de granulometría, masa específica, sanidad, desgaste (Los Ángeles) y absorción de aceite mostraron comportamientos típicos de una caliza compacta y de buena calidad estructural. Estos parámetros permiten considerar el material apto como agregado para concretos y aplicaciones en la construcción, además de usos en pinturas, plásticos y adhesivos si se ajusta la granulometría y blancura.

A pesar de la ausencia de palygorskita, que podría haber implicado una alteración hidrotermal o tectónica intensa, sí se identificó una leve sustitución de magnesio en la red cristalina del carbonato de calcio ($\text{Ca}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{CO}_3$), indicando una dolomitización incipiente que no compromete la calidad del yacimiento, pero debe ser monitoreada si se busca producir carbonato de grado farmacéutico.

En conjunto, las reservas estimadas en más de 44 millones de toneladas, considerando las reservas probadas, probables e inferidas en una extensión de 20 hectáreas le permitirían al yacimiento una escala suficiente para soportar un proyecto minero de mediano a largo plazo. No obstante, dada la dificultad para acceder a financiamiento con garantías hipotecarias, se propone una estrategia de integración escalonada. Esta consistiría en iniciar operaciones con una planta de trituración y molienda, que permita generar ingresos y capitalizar la operación, para posteriormente incorporar procesos de purificación como la flotación inversa u otras alternativas tecnológicas adecuadas al mineral.

Conclusiones

Los resultados demuestran que el lote “El Don Jua” posee reservas suficientes y calidad adecuada para abastecer, en una primera fase, los mercados de construcción y agricultura. Mediante un esquema escalonado de beneficio (clasificación → micronizado → beneficio), la pureza puede ampliarse hasta aplicaciones de alto valor (plásticos, PCC, grado alimenticio).

-

El sistema de bancos múltiples garantiza selectividad y reducción de estéril, mientras que la cercanía a calizas bentoníticas sugiere un núcleo esparítico preservado que mejora con la profundidad. El proyecto, por tanto, integra factibilidad geológica, técnica, económica y una ruta clara de diversificación de productos.

El estudio integral confirma que el yacimiento posee las dimensiones, la calidad geológica y las características operativas necesarias para convertirse en un proyecto carbonatado competitivo y de largo plazo. A partir de un muestreo sistemático, se obtuvo un conjunto de datos mineralógicos (DRX, MEB-EDS), químicos (ICP) y físicos que revelan un núcleo esparítico con contenidos de CaCO_3 superiores al 92 %, flanqueado por micritas ligeramente más impuras y una delgada capa meteorizada superficial.

La concentración promedio de 80 % CaCO_3 en la mezcla global, la baja presencia de MgO (0.12 %) y los niveles moderados de Fe_2O_3 (0.17 %) demuestran que, con una simple clasificación inicial, la pureza puede

elevarse a valores aptos para la industria de pinturas, plásticos o incluso para carbonato de calcio precipitado (PCC).

Las pruebas físicas de laboratorio confirman que el material ofrece buena resistencia mecánica y química, por lo que satisface las normas de agregados para concreto hidráulico y cal viva “blanca” demandada por la industria.

La estimación volumétrica de 44 millones de toneladas (probadas, probables e inferidas) garantiza más de tres décadas de operación continua a ritmos iniciales de 50000–100000 ton/año, mientras que la proximidad a mercados industriales de Puebla, Ciudad de México y el Bajío brinda acceso logístico favorable.

En conjunto, los resultados validan la viabilidad técnica y económica de una estrategia de explotación escalonada que arranca con trituración-clasificación para abastecer construcción y a la agricultura.

Consideraciones

1. **Explotación selectiva**

Se recomienda establecer un sistema de explotación basado en bancos múltiples, priorizando los horizontes de mayor pureza mineral (hasta 94 % CaCO_3). Al evitar el primer metro superficial, donde predominan los efectos de meteorización, se optimiza la calidad del mineral extraído y se minimizan las impurezas. Esta selectividad mejora la eficiencia energética en calcinación y reduce el rechazo en etapas posteriores.

2. **Inserción al mercado mediante agregados y cal viva blanca**

El material cumple con las normas técnicas para agregados utilizados en concreto hidráulico, además de reunir las condiciones químicas y físicas requeridas para cal viva blanca, especialmente valorada en la restauración de monumentos históricos. Por ello, se sugiere iniciar operaciones con un esquema comercial enfocado en constructoras regionales e instituciones, aprovechando la baja presencia de magnesio y hierro en las muestras más limpias.

3. **Modelo de explotación por bancos múltiples y terrazas**

Para maximizar el aprovechamiento del yacimiento y mantener una operación continua y segura, se plantea un modelo de explotación por bancos de 4 metros de altura y terrazas de 8 metros de ancho. Esta geometría facilita la circulación de maquinaria, la clasificación selectiva en frentes de cantera y el control geotécnico, además de permitir el escalonamiento vertical según la calidad del mineral en profundidad.

4. Fortalecimiento socioeconómico a través de alianzas locales

La operación se proyecta como un modelo incluyente donde los ejidatarios participen en la extracción del mineral y la empresa del proponente se encargue del procesamiento, comercialización y gestión técnica. Esta sinergia busca generar empleo formal, facilitar acuerdos con fleteros locales para reducir costos logísticos y aplicar a fondos estatales o federales de fomento minero para adquirir equipo clave sin comprometer la liquidez inicial del proyecto.

Bibliografía

1. Araujo, J. F. (2011). Requerimientos establecidos por las normas ISO para papeles permanentes. Información, cultura y sociedad, (24), 87-96.
2. Area, M. C. (2008). Química del extremo húmedo: carbonato de calcio. Mari Papel & Corrugado, 21 (4), 32-46.
3. Calvo Carbonell Jordi. 2009: PINTURAS Y RECUBRIMIENTOS INTRODUCCIÓN A SU TECNOLOGÍA. Ed. Diaz Santos. Pág. 21.
4. Chatterjee, A., y Gautam, R. (2021). Fundamentos del procesamiento de minerales. Elsevier.
5. COEDE, Norma Técnica Ecológica Estatal NTEE-COEDE-001/2000, 01-10 (2000).
6. COREMI, Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2000, COREMI, 286-289 (2003).
7. COREMI, Estudio Geológico del Área de Tepatepec, Fco. I. Madero, COREMI, 2-3, 5-7 (1994).
8. Díaz, M., Rodríguez, L., & Pérez, G. (2019). "Efecto del carbonato de calcio sobre el pH del suelo y el crecimiento de las plantas". Revista de Ciencias Agrícolas , 15(3), 78-85.
9. Dirección de Minería del Estado de Hidalgo, Fichas Técnicas de Algunos Proyectos Mineros en el Estado de Hidalgo, Dirección de Minería del Estado de Hidalgo, 1-2 (1994)
10. Dirección General de Promoción Miera de la SE, Perfil de Mercado de la caliza y sus Derivados, Secretaría de Economía, 17-24, anexo 1-7, anexo 2-3 (1999)
11. Dirección General de Promoción Minera Estudio de Mercado de Roca Caliza 2002.

12. Dr. Jorge de la Torre Robles, I. M. 1990: MANUAL DE PROCESAMIENTO DE MINERALES COMPAÑIA REAL DEL MONTE . Pachuca de Soto.
13. Ed. Katz Henry S., John Milewski. 1987. HANDBOOK OF FILLER FOR PLASTICS. Ed. Van Nostrand Reinhold. Pag. 23,116
14. Editado por Kellar Jon J. 2007. FUNCTIONAL FILLERS AND NANOESCALE MINERALS: NEW MARKETS/NEW HORIZONS. Editorial SME.
15. Editor O. Valderrama Jose. INFORMACIÓN TECNOLÓGICA. Vol. 12. 2001
16. EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria). (2022). "Carbonato de calcio como aditivo alimentario: seguridad y aplicaciones". EFSA Journal, 20(7), 2345.
17. Elton N. Kaufmann. 2003: CHARACTERIZATION OF MATERIALS, Volume 1, Ed. John Wiley and sons, Inc. Estados Unidos de América.
18. Eric Le Bourhis. 2008: GLASS MECHANICS AND TECHNOLOGY. Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA. Alemania.
19. Fatma Coskun*a, Canan Senoglu*. Abril 2011: THE EFFECT OF USING DIFFERENT LEVELS OF CALCIUM CARBONATE ON THE PHYSICAL, CHEMICAL AND SENSORY PROPERTIES OF YOGHURT. Namık Kemal Univ, Faculty of Agriculture, Department of Food Engineering, Tekirdağ Enerjik Catering, Kavack, Beykoz, Esatanbul. Vol. 3. 3ra. Ed. GIDA /The Journal of FOOD. Pág 1 y 2.
20. Fernández Navarro José María. 2003: EL VIDRIO. Ed. Artegraf, S.A. Pag. 142.
21. Fernández, J., Sánchez, R., & López, M. (2020). Extensores de pigmentos y su papel en formulaciones de pintura. Elsevier.
22. Fideicomiso de Fomento Minero, CADENAS PRODUCTIVAS, 2003.
23. FUNCTIONAL FILLERS FOR PLASTICS, Marzo 2012.

24. García, D. A. M., & Hernández, E. H. O. (2022). Estudio del carbonato de calcio como agente estabilizador de subrasante. Polo del Conocimiento, 7(7), 2302-2315.
25. Gómez, P., Ramírez, T., & Cruz, E. (2021). "Propiedades abrasivas del carbonato de calcio en productos de limpieza y pulido". Materials Science Reports, 27(4), 102-115.
26. Gul, S., Irfan, M. y Hasan, S. (2021). Avances en el procesamiento industrial de minerales. Springer.
27. Gupta, A., y Yan, D. (2018). Diseño y operaciones de procesamiento de minerales: una introducción. Elsevier.
28. Herrera Herbert, J., & Pla Ortiz de Urbina, F. (2006). Métodos de minería a cielo abierto.
29. Hossain, A., y Nazmul, R. (2020). "El papel del carbonato de calcio en la fabricación de papel". Revista de aplicaciones industriales, 12(2), 45-58.
30. Industrial Minerals and Rocks 6th Edition 1988.
31. Investigación de campo, análisis de INFOTEC, Sistema de Información Comercial de México (SICM)
32. Jiménez, C., Herrera, D., & Torres, J. (2021). "Carbonato de calcio en la industria de la construcción: aplicaciones y beneficios". Construction Materials Review, 34(1), 89-105.
33. Leja, J. (2017). Química de superficie de la flotación por espuma. Springer.
34. Marras, G. (2020). Aspectos geológicos y de procesamiento de carbonatos industriales. Wiley.
35. Martínez, A., & López, B. (2018). Materiales cerámicos y sus técnicas de procesamiento. Springer.
36. Martins Silva Lucas, Öchsner Andreas and Adams Robert. 2011: HANDBOOK OF ADHESION TECHNOLOGY. Ed. Springer Heilderberg. Pág 301-302.

37. Mendoza Rumiguano, Á. L. (2011). Evaluación de compuestos de polipropileno y carbonato de calcio para aplicaciones industriales (Bachelor's thesis, ESPOL. FIMCP.).
38. Milovski, A. K. 1988: MINERALOGÍA. Moscú, Rusia: Mir. Pag. 140-149 y 217-220
39. Mukadi-Mukadi, L. (2013). Proyecto de explotación del yacimiento “Camarioca Este”. Ciencia & Futuro, 3(1), 1-13.
40. Norma ASTM C88-05 SATANDAR TEST MEDHOD FOR SOUNDNESS OF AGGREGATES BY USE OF SODIUM SULFATE OR MAGNESIUM SULFATE.
41. Norma ASTM- D 281-89, SATANDARD TEST FOR OIL ABSORBTION OF PIGMENTS BY SPATULA RUB-OUT.
42. Norma Mexicana NMX C-111; ESPECIFICACIONES GENERALES DE AGREGADOS PÉTREOS PARA ELABORAR CONCRETOS HIDRÁULICOS.
43. Norma NMX-C-073 ONNCCE INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – AGREGADOS – MASA VOLUMÉTRICA Y METODO DE PRUEBA.
44. Norma NMX-C-075 ONNCCE INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – AGREGADOS— DETERMINACIÓN DE LA SANIDAD POR MEDIO DE SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO.
45. Norma NMX-C-164 ONNCCE INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – AGREGADOS— DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO GRUESO.
46. Norma NMX-C-196 ONNCCE INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – AGREGADOS –RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN POR ABRACIÓN DE IMPACTO DE AGREGADO GRUESO UNA MAQUINA DE LOS ANGELES – METODO DE PRUEBA.
47. Nuria Cubero, Albert Monferrer, Jordi Villalta. 2000: ADITIVOS ALILMENTARIOS. Mundi-Prensa Libros Pág. 45 y46.

48. Okoro, W., y Oyeibisi, S. (2023). Evaluaciones mecánicas y de durabilidad del hormigón geopolímero a base de escoria de acero y polvo de concha marina. *Heliyon* , 9 (2).
49. Oliveira, F. V., & Martins, A. H. (2009). Precipitação de carbonato de cálcio para aplicação industrial. *Rem: Revista Escola de Minas*, 62, 175-183.
50. PLASTICS ADITIVES HANDBOOK, Marzo 2012.
51. Prado, M., Gutiérrez, F., & Rivas, A. (2021). "Carbonato de calcio como fundente en la fabricación de vidrio". *Glass Science Journal* , 39(5), 56-73.
52. Resio, L. (2023). Dolomía y dolomita: un abordaje desde las perspectivas geológica, cerámica y refractaria. *Tesla Revista Científica*, 3(2), e237-e237.
53. Rodríguez Gómez, C. (2012). Análisis espacial geológico-minero para la definición de áreas de interés prospectivo en los municipios de Actopan y Pachuca, Estado de Hidalgo, México.
54. Rojas, E., Sánchez, M., & Torres, J. (2019). "Molienda ultrafina de carbonato de calcio: una revisión". *Minerals Engineering Journal* , 126, 34-42.
55. Salisbury Dana Edward Y William E. Ford: 1982. TRATADO DE MINERALOGIA, Ed. Continental, S.A. de C.V., México.
56. Schweiggeer Enrique. 2005: MANUAL DE PINTURAS Y RECUBRIMIENTOS PLÁSTICOS. Ediciones Díaz de Santos. Pág. 27-34.
57. Sistema de Información Comercial de México (SICM)
58. Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la Tierra. Universitario, 32.
59. Tegethoff Wolfgang F., Rohleder Johannes, Kroker Evelyn. 2001: CALCIUM CARBONATE: FROM THE CRETACEOUS PERIOD INTO THE 21st CENTURY. Ed. BirkhäuserVerlag, member of the BertelsmannSpringer Publisher Group. Pag.8-35.

60. Wills, BA, y Finch, J. (2016). Tecnología de procesamiento de minerales de Wills: una introducción a los aspectos prácticos del tratamiento de minerales y la recuperación de minerales . Elsevier.
61. Wilson, BW (1955). Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana , 1-10.
62. Wroe Gill. 2011: CALCIUM CARBONATE.Ed. Academic online. Pag.8
63. Xiaoyu Chen, XuerenQian, and Xianhui An. Aug 2011: USING CALCIUM CARBONATE WHISKERS AS PAPERMAKING FILLER.Vol. 3. 3ra ed. EBSCO Industries, Inc. Pág. 1 y 2.
64. Zhang, L., Wang, Y. y Chen, X. (2019). "Carbonato de calcio como agente de refuerzo en compuestos poliméricos". Polymer Engineering & Science , 59(11), 1372-1384.
65. Zweifel Hans, Maier Ralph D., and Schiller Michael. 2009: PLASTICS ADDITIVES HANDBOOK. 6ta ed. USA: Hanser.Pag. 920.

