



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

Mineral de la Reforma, Hgo., a 7 de enero de 2025

Número de control: ICBI-D/016/2025

Asunto: Autorización de impresión.

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

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; 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 en Geología Ambiental **César Augusto López Herrera**, quien presenta el trabajo de titulación **Caracterización de bentonita y dolomita del Estado de Hidalgo para sus posibles usos industriales**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

**Presidente:** Dr. Eleazar Salinas Rodríguez

**Secretario:** Dr. Juan Hernández Ávila

**Vocal:** Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

**Suplente:** Dr. Javier Flores Badillo

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

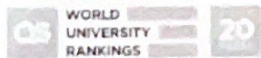
Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad 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@uaeh.edu.mx  
vergarar@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx



---

---

# ***UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO***

---

---

*INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA*

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

**“CARACTERIZACIÓN DE BENTONITA Y DOLOMITA  
DEL ESTADO DE HIDALGO PARA SUS POSIBLES  
USOS INDUSTRIALES”**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERIA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

**PRESENTA:**

CÉSAR AUGUSTO LÓPEZ HERRERA

**DIRECTOR: Dr. EDUARDO CERECEDO SAENZ**

**CODEIRECTOR: Dr. JUAN HERNÁNDEZ ÁVILA**

## INDICE.

Resumen.....	6
Introducción.....	7
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos.....	8
Capítulo I Antecedentes.....	9
1.1 Generalidades minerales.....	9
1.2 Generalidades Bentonita.....	10
1.2.1 Bentonita sódica.....	13
1.2.2 Bentonita cálcica.....	14
1.2.3 Propiedades físico - químicas.....	16
1.2.3.1 Superficie específica.....	16
1.2.3.2 Capacidad de intercambio catiónico.....	17
1.2.3.3 Capacidad de absorción.....	18
1.2.3.4 Hidratación e hinchamiento.....	18
1.2.3.5 Plasticidad.....	19
1.2.3.6 Tixotropía.....	19
1.2.4 Potencial geológico minero (México).....	19
1.2.4.1 Durango.....	21
1.2.4.2 Puebla.....	22
1.2.4.3 San Luis Potosí.....	23
1.2.4.5 Hidalgo.....	23
1.2.5 Método de extracción y beneficio.....	26
1.2.5.1 Minado.....	26
1.2.5.2 Almacenamiento de mineral.....	26
1.2.5.3 Trituración.....	26
1.2.5.4 Secado.....	27
1.2.5.5 Molienda final.....	27
1.2.5.6 Almacenamiento, empaque y embarque.....	27
1.2.6 Marco normativo.....	28
1.2.6.1 Normas nacionales.....	29
1.2.6.2 Normas internacionales.....	29

1.2.7 Principales usos.....	29
1.2.7.1 Fundición de metales.....	30
1.2.7.2 Absorbentes para desechos de mascotas.....	31
1.2.7.3 Fluidos de perforación.....	32
1.2.7.4 Peletización de mineral de hierro.....	32
1.2.7.5 Blanqueamiento y clarificación.....	33
1.2.7.6 Selladores ambientales.....	33
1.2.7.7 Ingeniería civil.....	34
1.2.7.8 Elaboración de jabones.....	35
1.2.7.9 Preparación de alimentos.....	35
1.2.7.10 Catalizador.....	35
1.2.7.11 Industria farmacéutica.....	36
1.2.7.12 Agricultura.....	36
1.2.7.13 Elaboración de cerámicos.....	36
1.2.7.14 Fabricación de pinturas.....	36
1.2.7.15 Industria papelera.....	36
1.2.7.16 Otros.....	36
1.3 Generalidades Dolomita.....	37
1.3.1 Propiedades químicas.....	39
1.3.1.1 Caracterización química y mineralógica de muestras de dolomita natural y dolomita comercial.....	40
1.3.2 Propiedades físicas.....	40
1.3.3 Potencial geológico minero (México).....	41
1.3.3.1 Coahuila.....	42
1.3.3.2 Nuevo León.....	43
1.3.3.3 Colima.....	43
1.3.3.4 Guerrero.....	44
1.3.3.5 México.....	44
1.3.3.6 Hidalgo.....	45
1.4 Método de extracción y Beneficio.....	45
1.4.1 Extracción.....	45
1.4.2 Trituración y Clasificación.....	45
1.4.3 Calcinación.....	46
1.4.5 Envase.....	46

1.5 Marco normativo.....	46
1.5.1 Normas nacionales.....	47
1.5.2 Normas internacionales.....	47
1.6 Principales usos.....	48
1.6.1 Dolomita en la industria siderúrgica.....	49
1.6.2 Dolomita en la industria del vidrio.....	50
1.6.3 Dolomita en la agricultura.....	51
Capítulo II Técnicas experimentales.....	51
2.1 Muestreo.....	51
2.1.1 Muestra.....	52
2.1.2 Tipos de muestreo.....	52
2.1.2.1 Sistemático:.....	52
2.1.2.2 Aleatorio:.....	52
2.1.2.3 Estratificado:.....	52
2.2 Caracterización Física.....	52
2.2.1 Granulometría.....	53
2.2.2 Absorción de aceite.....	54
2.2.3 Prueba de abrasión de los Ángeles.....	55
2.3 Caracterización Mineralógica.....	56
2.3.1 Difracción de rayos X.....	56
2.3.1.1 Interacción de los R-X con la materia. Difracción.....	56
2.3.1.2 Aplicaciones de la difracción de rayos x.....	57
2.3.2 Microscopia electrónica de barrido.....	59
2.4 Caracterización química.....	60
2.4.1 ICP (plasma de acoplamiento inductivo).....	60
2.4.1.1 Campos de aplicación.....	60
Capítulo III Aplicación Experimental y Resultados.....	61
3.1 Muestreo.....	61
3.2 Caracterización Física.....	61
3.2.1 Granulometría.....	62
3.2.1.1 Bentonita.....	63
3.2.1.2 Dolomita.....	63
3.2.2 Absorción de aceite.....	63
3.2.3 Prueba de desgaste de los Ángeles.....	65

3.3 Caracterización mineralógica.....	71
3.3.1 Difracción de rayos X.....	71
3.3.2 Microscopia electrónica de barrido. ....	72
3.3.2.1 Bentonita.....	72
3.3.2.2 Dolomita.....	74
3.4 Caracterización química. ....	75
3.4.1 ICP (plasma de acoplamiento inductivo.....	75
Capitulo IV Conclusiones .....	76
Referencias.....	78

## Resumen

Este trabajo analiza las propiedades químicas, físicas, mineralógicas y granulométricas de la bentonita y dolomita del estado de Hidalgo, con el objetivo de evaluar su idoneidad para diversas aplicaciones industriales. Se llevaron a cabo análisis granulométricos mediante tamices estándar, caracterización mineralógica por difracción de rayos X y pruebas específicas como absorción de aceite, prueba de abrasión y microscopía electrónica de barrido (MEB). Los resultados granulométricos indican que el mayor porcentaje de peso retenido se encuentra en la malla #220 para ambos minerales correspondientes a agregados finos, en el caso de la bentonita, se observó una alta capacidad de absorción de aceite (>80 %), lo que sugiere su potencial en industrias de fabricación de pinturas, cerámica (fabricación de pastas). Las pruebas mineralógicas identificaron la presencia de aluminosilicatos de sodio hidratado (gmelinita y paragonita), con una pureza significativa y sin minerales contaminantes. Por su parte, la dolomita presentó concentraciones superiores al 60 % de calcio y 30 % de magnesio, con características morfológicas bien definidas. Sus propiedades la hacen adecuada para aplicaciones en la industria siderúrgica (prolongación de vida útil de recubrimientos refractarios), agricultura (corrección de pH en suelos ácidos y fertilizantes) y construcción (agregado para concreto asfáltico y fabricación de cemento). Además, las pruebas de desgaste de Los Ángeles indicaron que la arena gruesa derivada de la dolomita es adecuada para concretos de bajas resistencias, dependiendo del tipo de trituradora empleada.

**Palabras clave:** Bentonita, dolomita, caracterización, aplicaciones

## Introducción.

La Bentonita y la Dolomita tienen en común ser minerales clasificados como no metálicos debido a la ausencia de metales en su composición química sin embargo con regularidad se pueden encontrar yacimientos de este tipo con algunas clases minerales como óxidos, sulfuros y sulfatos metálicos. En el país se pueden encontrar yacimiento de este tipo de minerales en diferentes regiones, en el caso de la bentonita se encuentran yacimientos en los estados de Durango, Puebla, Veracruz y San Luis Potosí. En el estado de Hidalgo las labores de extracción y beneficio de esta arcilla se encuentra en los municipios de Tulancingo, Tepatepec – San Miguel Acambay. Para el caso de la Dolomita se pueden localizar los principales yacimientos en la república mexicana en los estados de Coahuila y Nuevo León, en las ciudades de Monterrey, Monclova, Coahuila. Y Nueva Rosita, Coahuila.

Dentro del estado de Hidalgo se pueden encontrar yacimientos de dolomita en la localidad Las Delicias, municipio de Nicolás Flores, Hgo; A 40 km en línea recta al N 70° W de la Cd. de Pachuca, Hgo., se localizan calizas dolomitizadas de color gris claro.

En Tepatepec, municipio de Fco. I. Madero, Hgo., la dolomita se presenta en forma de vetas color gris oscuro con textura parcialmente porosa y microgranular.

La producción de estos materiales; en el caso de la Bentonita se utiliza principalmente en los lodos de perforación de pozos de petróleo, en mezclas de arenas para fundición como material aglutinante, en productos para la agricultura, etc. La dolomita por ser un carbonato doble de Calcio y Magnesio se utiliza como fundente en la fabricación de acero, además de ser una importante fuente de Magnesio al ser el carbonato de magnesio el de mayor contenido.

Este trabajo se ha realizado para determinar las características más importantes de estos materiales y así poder determinar un uso dentro de la industria o de un campo de trabajo específico, basado en normas oficiales tanto mexicanas como extranjeras, sin perder de vista los aspectos técnicos, administrativos y económicos que competen a su explotación, beneficio, embarque y comercialización.



### Objetivo general.

- Realizar la caracterización química, física, mineralógica y granulométrica de los minerales bentonita y dolomita de la región del Estado de Hidalgo. Así como determinar sus posibles aplicaciones de acuerdo a los resultados obtenidos.

### Objetivos específicos.

- Realizar las características de bentonita y dolomita con técnicas de ICP, difracción de rayos X, MEB, para identificar la composición química y mineralógica de estos minerales.
- Analizar la granulometría de la bentonita y dolomita; con la finalidad de determinar los tamaños de partícula para identificar sus posibles aplicaciones en las diferentes industrias
- Evaluar con base a especificaciones establecidas en las normas oficiales mexicanas los posibles usos industriales para estos minerales de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización

## Capítulo I Antecedentes

### 1.1 Generalidades minerales.

Un mineral es producido por procesos de naturaleza inorgánica, con una composición química característica y una estructura cristalina, que generalmente suele presentarse en formas o contornos geométricos. La composición química de un mineral tiene gran importancia, ya que de ella dependen, en una gran medida, todas las propiedades del mismo.

Dentro de la gran variedad de minerales que se han encontrado en el planeta, los especialistas han clasificado a todos estos en clases basados en su composición química tal y como se muestra en la tabla 1. (Klein & Hurlbut, 2018)

Tabla 1 Clasificación de minerales, ejemplos.

Clases minerales	Ejemplos
Elementos nativos	Oro (Au), Plata (Ag), Cobre (Cu)
Sulfuros	Argentita ( $\text{SAg}_2$ ), Cinabrio ( $\text{SHg}$ ), Pirita ( $\text{S}_2\text{Fe}$ )
Sulfosales	Estefanita ( $\text{S}_4\text{SbAg}_3$ ), Proustita ( $\text{S}_3\text{AsAg}_3$ ), Bournonita ( $\text{S}_3\text{SbPbCu}$ )
Óxidos	Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), Cincita ( $\text{ZnO}$ ), Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
Haluros	Halita ( $\text{ClNa}$ ), Querargirita ( $\text{ClAg}$ ), Fluorita ( $\text{F}_2\text{Ca}$ )
Carbonatos	<b>Dolomita (<math>\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2</math>)</b> , Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), Siderita ( $\text{FeCO}_3$ )
Nitratos	Nitratina ( $\text{NO}_3\text{Na}$ ), Nitro ( $\text{NO}_3\text{K}$ )
Boratos	Boracita ( $\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Mg}_3\text{Cl}$ ), Borax ( $\text{B}_4\text{O}_7\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ),
Fosfatos	Monacita ( $\text{PO}_4(\text{Ce,La,Y,Th})$ ), Trifilita ( $\text{PO}_4\text{LiFe}$ )
Sulfatos	Anhidrita ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ), Yeso ( $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Baritina ( $\text{SO}_4\text{Ba}$ )
Tungstano	Wolframita ( $\text{WO}_4(\text{Fe,Mn})$ ), Sheelita ( $\text{WO}_4\text{Ca}$ ), Wulfenita ( $\text{MO}_4\text{Pb}$ )
Silicatos	Willemita ( $\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$ ), Olivino ( $\text{SiO}_4(\text{Mg, Fe})_2$ ) <b>Bentonita (Montmorillonita)</b>

Es probable que la industria perciba a los metales o minerales brillosos como los más valiosos, sin embargo, se reconoce que los no metálicos tienen enormes usos, y es posible encontrarlos en nuestro día a día en diferentes estados; tanto de forma sólida, líquida y gaseosa. El INEGI define a los minerales no metálicos de la siguiente manera: “No tienen brillo propio ni conducen electricidad. Dentro de este grupo se ubican: arena, azufre, barita, caolín, celestita, diatomita, dolomita, fluorita, feldespato, fosforita, fluorita, grafito, sal, sulfato de sodio, sulfato de magnesio, wollastonita y yeso, entre otras”

Considerando que su composición carece de metales, entonces su presencia se da a través de enlaces químicos covalentes o iónicos, además de otros elementos químicos. Debido a que no contienen metales en su composición química, la bentonita y la dolomita se clasifican colectivamente como minerales no metálicos, pero ciertas clases de minerales, como óxidos, sulfuros y sulfatos metálicos, son comunes en este tipo de depósitos. (Outlet Minero, 2023)

## 1.2 Generalidades Bentonita.

El término "bentonita" fue introducido por Knight en 1898 para describir un material arcilloso con características jabonosas que provenía del "Benton Shale" en Wyoming, Estados Unidos. En 1917, Hewett identificó que esta arcilla era el resultado de la alteración de cenizas volcánicas. Más tarde, Ross y Shannon (1926) la definieron como: "Roca compuesta principalmente por un material cristalino, similar a una arcilla, que se forma a partir de la desvitrificación y alteración de un material ígneo vítreo, comúnmente cenizas volcánicas o tobas. El mineral de arcilla característico tiene un hábito micáceo, se exfolia fácilmente, presenta alta birrefringencia y una textura derivada de las cenizas volcánicas o de la toba". No obstante, esta definición es considerada restrictiva, ya que se basa en criterios genéticos. En la actualidad, la definición más aceptada es la proporcionada por R.E. Grim (1972): "Bentonita es una arcilla compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, con independencia de su génesis y modo de aparición". Desde este punto de vista la bentonita es una roca compuesta por más de un tipo de minerales, aunque son las esmectitas sus constituyentes esenciales y las que le confieren sus propiedades características" (Duran, S.f)

Este mineral constituye un grupo de sustancias minerales arcillosas pertenecientes al grupo de las esmectitas con una composición principalmente de “Montmorillonita” perteneciente al subgrupo de “Filosilicatos” (Waldo, 1967)

La bentonita, considerada como suelo arcilloso montmorillonítico es altamente plástica y altamente expansiva, es un sólido formado por laminas moleculares constituidas por arreglos tetraédricos de sílice y octaédricos de alúmina unidos covalentemente en relación Si:Al (2:1).

Como en el resto de los filosilicatos, su estructura se basa en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los oxígenos se unen formando capas de extensión infinita con coordinación tetraédrica. Tres de cada cuatro oxígenos están compartidos con los tetraedros vecinos. En el interior de los tetraedros se alojan cationes  $Si_4^+$ . Los hidroxilos forman capas con coordinación octaédrica. Los oxígenos tetraédricos sin compartir con otros oxígenos (oxígenos apicales) forman parte de la capa octaédrica adyacente. Los cationes octaédricos son, generalmente,  $Al_3^+$ ,  $Mg_2^+$ ,  $Fe_2^+$  o  $Fe_3^+$  y, más raramente,  $Li^+$ ,  $Cr_2^+$ ,  $Mn_2^+$ ,  $Ni_2^+$ ,  $Cu_2^+$  o  $Zn_2^+$  como se muestra en la figura 1. Una capa octaédrica entre dos tetraédricas, unidas fuertemente por enlace covalente, forman la unidad estructural básica de las esmectitas (CASTRO & CORAL, 2013)

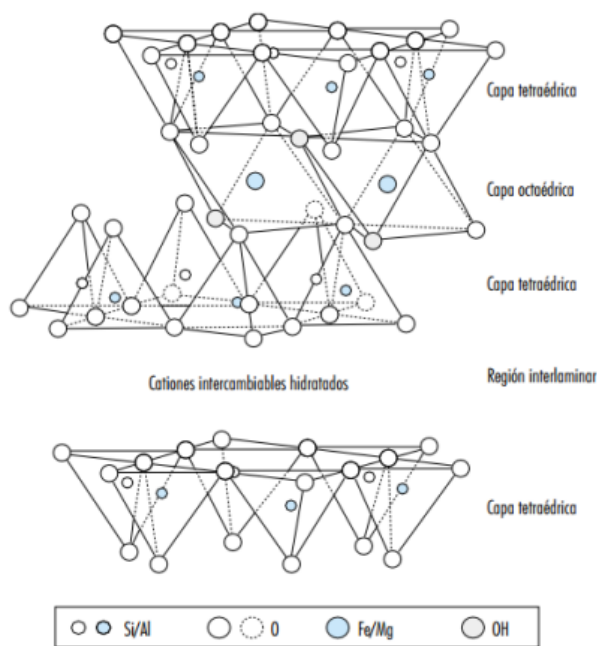


Figura 1 Estructura idealizada de una Montmorillonita

Las esmectitas se dividen en dos subgrupos, en función del tipo de ocupación de las posiciones octaédricas: dioctaédricas y trioctaédricas. Se denominan trioctaédricas aquellas en que están ocupadas todas las posiciones octaédricas y dioctaédricas las que sólo tienen ocupados 2/3 de los huecos.

En cuanto a sus propiedades físicas se reconoce que están compuestas en un 92% de montmorillonita, un 3% de cuarzo y el 5% restante de feldespato; tienen una humedad máxima del 10% y soportan temperaturas que van desde los 280 °F hasta los 1500 °F, también cuentan con una fuerza de compresión seca de hasta 96 psi, además alcanzan un punto de fusión de entre los 1600 °C hasta los 1750 °C, su punto de ebullición tiende a sublimar hasta los 1750 °C y su solubilidad es prácticamente inexistente tanto en agua fría como en agua caliente; si se reconocen sus propiedades organolépticas en el color se caracteriza por ser iridiscente, su transparencia tiende a lo vidrio y blanco. En la figura 2 se observa el color de una bentonita sin procesar. (CASTRO & CORAL, 2013)



*Figura 2 Forma natural de la bentonita sin procesar*

Los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades fisicoquímicas; así la clasificación industrial más aceptada establece tipos de bentonitas en función de su capacidad de hinchamiento en agua. Según este criterio Patterson y Murray (1983) distinguen tres tipos principales:

- Bentonitas altamente hinchables o sódicas.
- Bentonitas poco hinchables o cálcicas.
- Bentonitas moderadamente hinchables o potásicas

Posteriormente Odom (1984), siguiendo los mismos criterios de clasificación las divide en:

- Bentonitas sódicas.
- Bentonitas cálcico-magnésicas.
- Tierras de Fuller o tierras ácidas. (Garcés, 2007)

### 1.2.1 Bentonita sódica.

La bentonita sódica es una variedad de bentonita caracterizada por la presencia predominante de sodio en su estructura cristalina, lo que le confiere propiedades especiales como una alta capacidad de hinchamiento y una considerable capacidad de intercambio catiónico. Este tipo de arcilla, formada principalmente por la mineral montmorillonita, es ampliamente utilizada en diversas industrias debido a sus características únicas. La bentonita sódica se diferencia de la bentonita cálcica por su mayor capacidad de expansión cuando se hidrata, lo que la hace especialmente útil en aplicaciones donde se necesita un sellado eficaz o una alta capacidad de absorción. (Grim, 2009)

La bentonita sódica es común en varias regiones del mundo, como Wyoming en los Estados Unidos, que es uno de los principales productores globales de este material. Las condiciones geológicas específicas, como la presencia de soluciones sódicas durante la alteración de las cenizas volcánicas, son esenciales para la formación de bentonita sódica de alta calidad, en la figura 3 se puede observar una muestra de bentonita sódica.



*Imagen 3 Bentonita Sódica*

Estas bentonitas son usadas en lodos para perforación y como ligante en la pelletización de mineral de hierro. (Servicio Geologico Minero Argentino, 2007)

La bentonita sódica natural tiene como excelentes propiedades tixotrópicas. Además, posee alta resistencia al calor y a la sequedad. Las arenas de moldeo unidas con bentonita sódica, tienen una alta plasticidad cuando se las mezcla con una cantidad óptima de agua. (Duran, S.f)

Esta variedad contiene un alto nivel de iones de sodio, se expande cuando se moja figura 4, absorbiendo varias veces su peso seco en agua y pudiendo aumentar hasta 12 veces su volumen.

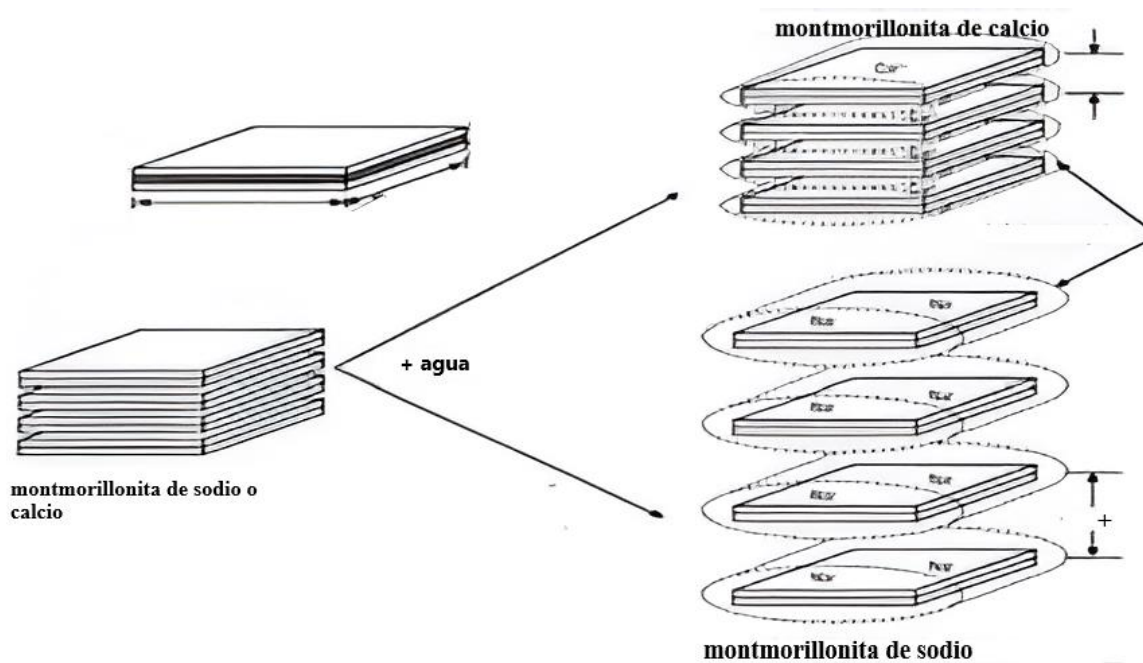


Figura 4 Representación de la diferencia del hinchamiento entre bentonita sódica y bentónica cálcica.

### 1.2.2 Bentonita cálcica.

También conocida como bentonita poco hinchable, están constituida por montmorillonita que contiene principalmente iones intercambiables de calcio. Este tipo tiene menor capacidad de hinchamiento en comparación con la bentonita sódica. La bentonita cálcica es más abundante en la naturaleza.

Presenta una resistencia menor a la sequedad y al calor que la bentonita sódica, colapsa más fácilmente y previene defectos de rotura en caliente. (Robledo, 2015)

La bentonita cálcica se forma principalmente a partir de la alteración de cenizas volcánicas ricas en vidrio volcánico y silicatos. Estos depósitos de cenizas, generalmente de origen riolítico o andesítico, se encuentran en cuencas sedimentarias que, tras la erupción, quedan expuestas a procesos de alteración hidrotermal o meteórica. (Toja, 2016) El proceso de formación de la bentonita implica la disolución de los minerales originales y la posterior precipitación de minerales arcillosos, en particular la montmorillonita, que pertenece al grupo de las esmectitas.

En particular, el contacto con soluciones acuosas que contienen iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) facilita la sustitución de los cationes de sodio ( $\text{Na}^+$ ) presentes en las cenizas originales por calcio. Este intercambio iónico es fundamental en la formación de la bentonita cálcica, ya que modifica la estructura de la montmorillonita, mineral clave en la composición de la bentonita, en la figura 5 se observa una imagen de la bentonita cálcica. (Al-Ani & Sarapää, 2008)



*Figura 5 Bentonita cálcica*

Tiene la propiedad de adsorber gran cantidad de moléculas de proteínas de soluciones acuosas, por lo que se utiliza en el proceso de vinificación, en camas sanitarias para gatos y en la producción de alimentos para animales.

Es usada como adsorbente de iones en solución, así como en grasas y aceites. Es un ingrediente principal activo de la tierra fuller, probablemente uno de los principales agentes de limpieza industrial. La bentonita cálcica puede ser convertida a bentonita sódica para exhibir muchas de las propiedades de esta última a través del proceso conocido como "intercambio de iones". Comúnmente esto significa la adición de un 5-10% de una sal de sodio soluble, como carbonato de sodio para humedecer la bentonita, mezclando bien y dando



tiempo para el intercambio de iones que se realizará y agua para eliminar el calcio intercambiado. (BELLO & BALMASEDA, 1996)

### 1.2.3 Propiedades físico - químicas.

En forma natural, la bentonita es una roca blanda, que tiene aproximadamente la consistencia de un caolín, es decir friable y untuosa. Generalmente tiene un color beige claro a oscuro, amarillo verdoso y excepcionalmente blanco cremoso o verdoso. (Waldo, 1967)

Las innumerables e importantes aplicaciones industriales de este mineral se basan en sus propiedades físico-químicas: superficie específica, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de absorción, hidratación e hinchamiento y plasticidad en la tabla 2 se puede observar algunas propiedades químicas de una bentonita sometida a experimentación. (Waldo, 1967)

*Tabla 2 Valores obtenidos para humedad, densidad real, superficie específica y análisis químico de una bentonita.*

Humedad	11.6 (%)
Superficie específica	34 m <sup>2</sup> /g
Densidad real	2.422 g/cm <sup>3</sup>
<b>Análisis Químico (sobre muestra seca, %en peso)</b>	
Pérdida por calcinación a 800°C	7.68 1
SiO <sub>2</sub>	56.6 1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.0 1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.60 1
Na <sub>2</sub> O	2.96 1
MgO	2.40 1
CaO	1.22 1
Ti <sub>2</sub> O	0.84 1
K <sub>2</sub> O	<b>0.79</b>

#### 1.2.3.1 Superficie específica.

La superficie específica de un área superficial de una bentonita, se define como el área de la superficie externa, más el área de la superficie interna de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m<sup>2</sup>/g. (Servicio Geologico Minero Argentino, 2007)

La bentonita por lo general posee un área superficial externa elevada, lo que se debe a su morfología laminar y el pequeño tamaño de los cristales. Las bentonitas sódicas en estado seco, presentan una superficie específica de 25 a 50 m<sup>2</sup> /g, mientras que en suspensión acuosa

este valor se eleva a 300 m<sup>2</sup> /g, y para las bentonitas cálcicas de 200 a 250 m<sup>2</sup> /g. (CASTRO & CORAL, 2013)

#### 1.2.3.2 Capacidad de intercambio catiónico.

Esta es una propiedad característica de las bentonitas, que son capaces de intercambiar fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de los cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. esto está vinculado al desbalance de cargas en la estructura atómica y la débil fijación de cationes en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras.

La capacidad de intercambio catiónico se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- a) Sustituciones isomorfas dentro de la estructura.
- b) Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- c) Disociación de los grupos de hidroxilos accesibles.

El caso a) es conocido como carga permanente y supone un 80% de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los casos b) y c) varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan estimativamente el 20% de la carga total de la partícula. En la tabla 3 se exponen valores comparativos de la capacidad de intercambio catiónico de algunos minerales respecto de la montmorillonita (Hevia, 2008)

Tabla 3 Capacidad de Intercambio Catiónico de algunos minerales

<b>MINERALES ARCILLOSOS</b>	<b>C.I.C. meq/100g</b>
Caolinita	3-5
Halloysita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Vermiculita	100-200
Montmorillonita	80-200

### 1.2.3.3 Capacidad de absorción.

La capacidad de absorción de una partícula está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan en forma aislada:

a) Absorción: cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad

b) Adsorción: cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la bentonita, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato

La capacidad de absorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa absorbente. (Servicio Geológico Minero Argentino, 2007)

### 1.2.3.4 Hidratación e hinchamiento.

Una de las propiedades más distintivas de la bentonita es su capacidad de hincharse considerablemente en agua, formando una masa gelatinosa. Este fenómeno ocurre por la hidratación del espacio interlaminar.

A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio. Si, por el contrario, tienen  $\text{Ca}^+$  o  $\text{Mg}^+$  como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

Para que una arcilla pueda ser considerada como bentonita, en el sentido comercial de la palabra, debe hincharse aumentando por lo menos cinco veces su volumen. Normalmente una bentonita de buena calidad se hincha en agua de 10 a 20 veces su volumen; en casos excepcionales esta relación llega a 30. (Servicio Geológico Minero Argentino, 2007)

#### 1.2.3.5 Plasticidad.

Las arcillas, particularmente las bentonitas son destacadamente plásticas. No obstante, se admite que la bentonita contiene de 20 a 40 veces mayor cantidad de materias arcillosas en forma coloidal que las arcillas plásticas usuales; por ello ejerce, incluso en pequeñas proporciones, una acción considerable sobre la plasticidad de los materiales cerámicos, aumentándola significativamente.

La plasticidad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. (Servicio Geologico Minero Argentino, 2007)

#### 1.2.3.6 Tixotropía.

Este es un fenómeno conocido únicamente en suspensiones coloidales, y se dice que una substancia presenta el fenómeno de la tixotropía, cuando la aplicación de un esfuerzo deformante, reduce su viscosidad.

La palabra "tixotropía" deriva del griego "thixis" que significa cambio, y se emplea para describir el fenómeno mediante el cual, las partículas coloidales en estado de reposo forman geles (de apariencia sólida), y cuando estos geles se someten a enérgicas agitaciones, se destruyen y forman fluidos viscosos. Cuando la agitación se detiene y la suspensión permanece inmóvil, se regeneran las características del gel original. (Servicio Geologico Minero Argentino, 2007)

#### 1.2.4 Potencial geológico minero (México).

La minería de bentonita en México se ubica en tres provincias geológicas: Durango, San Luis Potosí y Puebla, en la figura 6 representa los principales centros de producción de bentonita. (Secretaria de Economia, 2022)

Figura 6 Producción de Bentonita en México.



Figura 6 Producción de Bentonita en México.

En 2019, la región minera con mayor potencial productor de bentonita fue Durango, con aproximadamente 62% de la producción nacional; seguida a la distancia por Puebla, que participa con el 35% de la producción. Jalisco también tiene una producción muy pequeña de este mineral, representando el 0.34% de la bentonita extraída en el país, (Secretaria de Economía, 2022) en la figura 7 se observa la producción de bentonita por entidad federativa en los años 2018, 2019 y 2020 (Al-Ani & Sarapää, 2008)

Estados/Años	2018	2019	2020	2021
<b>Total:</b>	<b>264 800.00</b>	<b>24 321.00</b>	<b>79 219.00</b>	-
Durango	242 600.00	14 992.00	62 992.00	-
Jalisco	-	829.00	-	-
Puebla	8 200.00	8 500.00	16 227.00	-
San Luis Potosí	14 000.00	-	-	-

figura 7 Producción de Bentonita por Entidad Federativa (tonelada).

La producción anual de bentonita en el país de acuerdo con cifras del Servicio Geológico Mexicano tuvo un decremento en el año 2019 a pesar de que en el año 2018 fue una producción importante, siendo el estado de Durango el principal productor de este mineral,

y a pesar de seguir siendo el principal productor a nivel nacional; su capacidad de producción ha disminuido. En el año 2020 volvió a tener un alza en la producción sin embargo no ha logrado producir las cantidades que producía años antes del 2018. en la figura 8 se observa una gráfica representando estas variaciones en su producción.

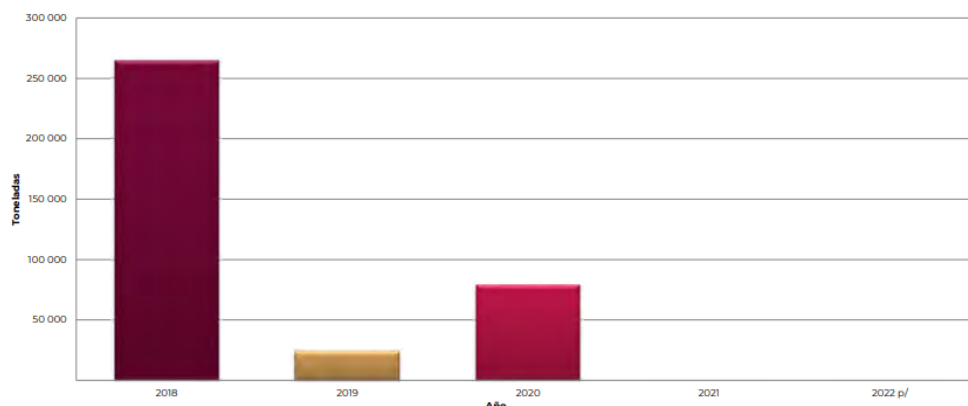


figura 8 Producción Nacional Anual de Bentonita (tonelada).

#### 1.2.4.1 Durango.

El área de interés se localiza en la porción centro oriental del estado de Durango, a 75 km al S11°W de la Cd. de Gómez Palacio, Dgo., en terrenos del Ejido “Gral. Severino Ceniceros”, Mpio de Cuencamé, Dgo.

Los yacimientos más importantes en el área son bentonita cálcica y sódica. La bentonita es una roca arcillosa de color verde, rojizo o cremosa, en la cual la montmorillonita es el principal mineral constituyente y en menor proporción cristobalita, feldespato, cuarzo y zeolitas. El feldespato presente puede constituir también la fuente original de la bentonita. En los mantos de bentonita es frecuente la presencia de vetillas de sulfato de calcio (selenita).

Según un informe consultado se tenía la siguiente composición química en la bentonita de esta región:

$SiO_2$ (66.75-70.18%)	$Fe_2O_3$ (1.10-2.54%)
$Al_2O_3$ (12.70-15.10%)	$K_2O$ (0.49-0.90%)
$CaO$ (0.88-2.95%)	$Na_2O$ (2.15-2.47%)
$MgO$ (3.23-5.05%)	$TiO_2$ (0.12-0.15%)

Reservas: 3.8 millones de ton posibles; 2.1 millones de ton potenciales.

#### 1.2.4.2 Puebla.

- Área Acatlán de Osorio

El área de interés se localiza en la porción occidental del municipio del mismo nombre. El interés geológico-minero radica en la Formación Tehuitzingo.

Presenta lentes de tobas con características físico-químicas apropiadas para su explotación mediante un tratamiento de molienda, clasificación y activación previa. Sus afloramientos se encuentran principalmente asociados a los cuerpos volcánicos, los horizontes tobáceos bentonizados afloran igualmente repartidos, como es el caso de los depósitos del Cerro de La Soledad, Angostura, Palomas, Tehuixtla, Rincón Chiquito, Palomas y Cerro Gordo. El afloramiento de la Formación Tehuitzingo dentro de esta región es en general formando cuerpos tabulares subhorizontales claramente estratificados y seccionados por la erosión. La explotación de bentonita es a muy pequeña escala y de manera intermitente. Por lo que se considera un área con potencial económico para la extracción de bentonita.

- Área Teotlalco

A través de un contrato de exploración y evaluación geológico-minera entre el Gobierno del Estado de Puebla y el Servicio Geológico Mexicano, se realizó una evaluación del yacimiento de bentonita del área de Teotlalco arrojando los siguientes resultados:

*SiO<sub>2</sub> (62.20%)*

*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13.54%)*

*Na<sub>2</sub>O (1.92%)*

*K<sub>2</sub>O (2.13%)*

*CaO (2.21%)*

*MgO (1.59%).*

Reservas positivas: 218,750 toneladas.

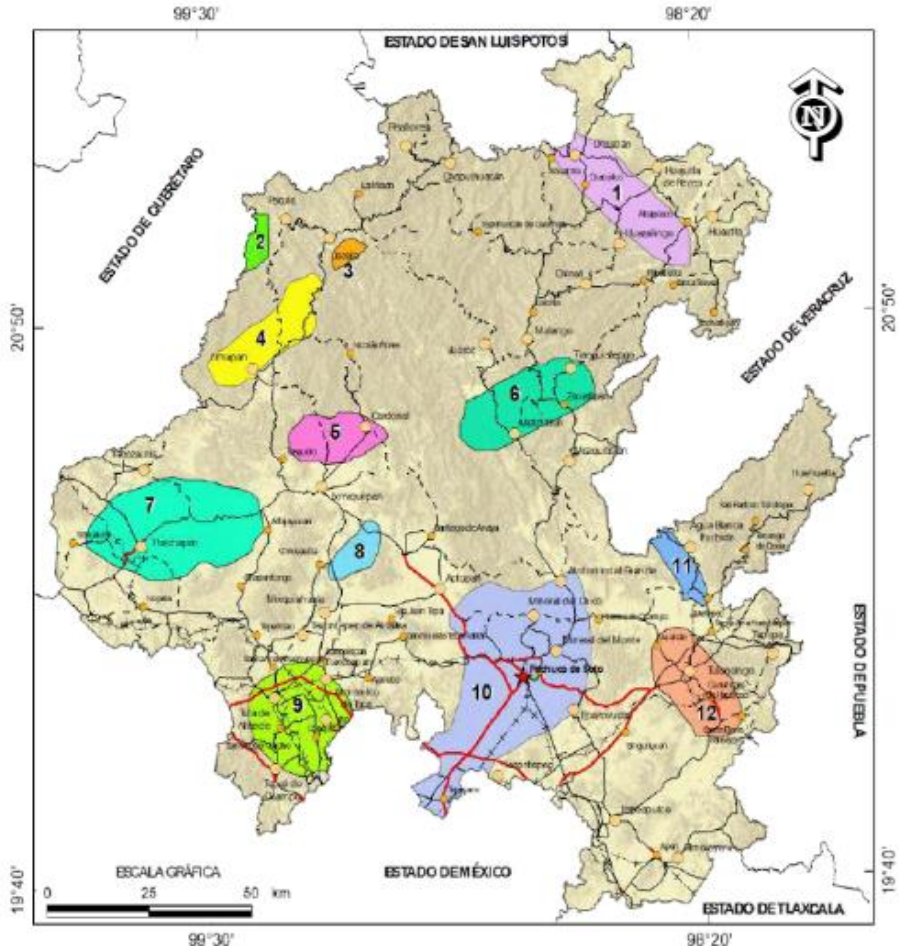
#### 1.2.4.3 San Luis Potosí.

En el sureste de esta entidad, una de las secuencias del Cretácico superior presenta caliza arcillosa que alternan con delgados horizontes de lutita y bentonita, la cual es denominada Formación San Felipe, su localidad tipo está en El Rancho San Felipe que está localizado en el km 540 de la vía de ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, su espesor varía de 50 a 130 m. Esta secuencia descansa concordantemente sobre la Formación Agua Nueva e infrayace a la Formación Méndez del Cretácico tardío que está representado por la Formación Méndez en la Estación Méndez del ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, como una alternancia de margas, lutitas y horizontes bentoníticos con un espesor variable de 70 a 200 m. Cabe mencionar que ésta última formación infrayace a la Formación Velasco, que corresponde al Terciario inferior y a la cual definieron como una secuencia constituida por lutita y bentonita, cuya localidad tipo se encuentra en la Estación Velasco del ferrocarril San Luis Potosí-Tampico y subyace discordantemente a sedimentos del Reciente. El espesor de esta unidad varía de 20 a 150 m. (Secretaría de Economía, 2022)

#### 1.2.4.5 Hidalgo

En el estado de Hidalgo las labores de extracción y beneficio de esta arcilla se encuentra en los municipios de Tulancingo, Tepatepec – San Miguel Acambay, (Servicio Geológico Mexicano, 2021) en la figura 9 podemos observar la ubicación de las regiones no mineras dentro del estado de Hidalgo ubicando con los números 8 para la región Tepatepec-San Miguel Acambay y 12 para la región de Tulancingo. Así mismo en la figura 10 representa una tabla con la información de las regiones mineras no metálicas, las zonas mineras y las sustancias (minerales) que son extraídos en el estado de Hidalgo.





**Explicación**

- |                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| ★ Capital del estado       | 1 La Huasteca                   |
| ○ Capital municipal        | 2 Pacula                        |
| ○ Ranchería                | 3 San Nicolás                   |
| — Carretera de 6 carriles  | 4 Zimapán                       |
| — Carretera de 4 carriles  | 5 Cordonal                      |
| — Carretera de 2 carriles  | 6 Zacualtipán                   |
| --- Terracería             | 7 Huichapan-Tecoautla           |
| .... Brecha                | 8 Tepatepec- San Miguel Acambay |
| + + + Vías del ferrocarril | 9 Tula                          |
| — Límite estatal           | 10 Pachuca-Atotonilco Actopan   |
|                            | 11 Agua Blanca                  |
|                            | 12 Tulancingo                   |

figura 9 Mapa del Estado de Hidalgo ubicación de las regiones productoras de minerales no metálicos. (Bentonita, Tepatepec y Tulancingo).

Región	Zona minera	Sustancias
Pachuca -Atotonilco Actopan	Actopan Atotonilco Real del Monte El Arenal El Chico	Arcillas Arena sílica Cantera Agregados pétreos
Tulancingo	Tulancingo	Piedra pómez Pumicita Cantera Bentonita
Agua Blanca	Agua Blanca Tulancingo Acaxochitlán	Caolín Arcillas Barita
Zacualtipán	Zacualtipán	Caolín Arcillas Obsidiana
Cardonal	El Cardonal	Diatomita Caliza Canteras
Huichapan -Tecoautla	Huichapan-Tecoautla	Mármol Calizas Canteras
Huasteca	Huautla San Felipe Orizatlán	Bitumen carbonoso
Pacula	Zimapán	Fosforita
San Nicolás	San Nicolás	Yeso
Zimapán	Zimapán Minas San Antonio Barranca de los mármoles	Mármol Caliza
Tepatepec -San Miguel Acabay	Tepatepec San Miguel Acambay	Dolomita Bentonita Barita Calcita
Tula	Tula de Allende Atotonilco de Tula Tepeji de Ocampo Progreso	Calizas Arcillas Caolín

figura 10 Regiones mineras no metálicas del Estado de Hidalgo.

## 1.2.5 Método de extracción y beneficio.

### 1.2.5.1 Minado

El método de minado más común de la bentonita es a cielo abierto, el cual involucra la remoción de materiales superficiales que sobreyacen en el yacimiento con el objetivo de exponer el mineral y tener el acceso para su extracción. Las capas de bentonita se deben quitar cuidadosamente para evitar que sea contaminada. Para ello se utilizan Bulldozer, rascadores, excavadoras y una combinación de este tipo de equipos para remover la capa superficial sobre el yacimiento, la cual es primeramente removida y separada en montones para redistribuirla durante el cierre de la mina y la recuperación del terreno a futuro.

Después que la bentonita es removida, la capa de recubrimiento del área adyacente es colocada en el área que quedó vacía y la secuencia continúa con el minado. Por medio del equipo minero antes mencionado se realiza la extracción de bentonita y se cargan los camiones para transportarla a las instalaciones de procesamiento.

La mayoría de las bentonitas minadas tienen una humedad entre 25 y 35 % en peso. El procesamiento usualmente requiere la combinación de secado al aire libre (en regiones áridas puede reducir la humedad a menos de 12%) y en planta.

### 1.2.5.2 Almacenamiento de mineral.

La bentonita es extraída y almacenada en los patios de la mina, con el fin de ser “secada al aire libre” para eliminar aproximadamente el 50% de la humedad, reducir el acarreo y los costos de secado final. Después, mediante cargadores frontales el mineral es cargado en camiones que lo transportan a las plantas de procesamiento y lo almacenan en montones, divididos en diferentes tipos y calidades de bentonita.

De las pilas de almacenamiento, la bentonita es transportada a un secador rotatorio para reducir el contenido de humedad.

### 1.2.5.3 Trituración.

Después del secado el mineral de bentonita es pasado a través de una combinación de trituradoras y molinos de rodillo con el objeto de reducir el tamaño del grano del mineral y prepararlo para la siguiente etapa, utilizando mallas para la clasificación por tamaños.

#### 1.2.5.4 Secado.

Generalmente se agrega soda ash (carbonato de sodio anhidro) antes del secado al aire o en planta. En el primer caso se agrega en pilas o sobre el mineral que ha sido extendido para ser secado. Las adiciones de soda ash en planta son para mojar la bentonita usando un mezclador de paletas para distribuir uniformemente los componentes. Se agrega agua para mejorar la reacción entre la soda ash y la bentonita, pero no se debe usar en exceso debido a los altos costos de secado asociados a la alta humedad. La soda ash sirve para mejorar las propiedades de dilatación de la bentonita. Las humedades típicas del producto final se encuentran entre 7 y 12% en peso aproximadamente.

A continuación, la bentonita se procesa a través de secadores rotatorios de carbón o gas, en adición a los calcinadores para reducir el contenido de humedad. El control de la temperatura en el secador es importante porque muchas de las propiedades de la bentonita pueden ser destruidas si se aplica demasiado calor. Como resultado del secado, la bentonita tiene aproximadamente entre 5 y 20 % de humedad.

#### 1.2.5.5 Molienda final.

Consiste en la reducción del tamaño de partícula de acuerdo a las aplicaciones. Una etapa de molienda fina adicional reduce más el tamaño de la partícula a menos de 20  $\mu\text{m}$ . Donde se requieren tamaños de partícula extremadamente fina, se usa la clasificación por aire durante o después de la molienda como una etapa separada de procesamiento.

Se agregan directamente polímeros para mejorar la viscosidad y perder fluido antes o después de la molienda. La adición de polímeros varía dependiendo de la aplicación, pero los niveles entre 0.25 y 1.50 lb (0.1 a 0.7 kg) por ton de arcilla son típicos. Las largas cadenas de polímeros solubles en agua son comúnmente usadas para mejorar el funcionamiento de bentonitas. El producto de bentonita es pulverizado y manufacturado de acuerdo a las especificaciones del cliente.

#### 1.2.5.6 Almacenamiento, empaque y embarque.

Después del procesamiento, la bentonita es almacenada y posteriormente envasada en contenedores de plástico o papel reforzado para ser embarcada y distribuida en el mercado por ferrocarril, camión o barco. El envío también puede ser a granel (Secretaría de Economía, 2022), en la figura 11 se representa el proceso de extracción, procesamiento, almacenamiento, empaque y embarque del mineral descrito anteriormente.



Figura 11 Proceso de extracción de bentonita.

### 1.2.6 Marco normativo.

En el Artículo 4o. de la Ley Minera, en el párrafo VI queda especificado que se sujetarán a ésta, entre otros minerales, los productos derivados de la descomposición de las rocas cuya explotación se realice preponderantemente por medio de trabajos subterráneos.

En el Artículo 5o. de la misma Ley, en el párrafo V se especifica que se exceptúan de la Ley Minera los productos derivados de la descomposición de las rocas, cuya explotación se realice preponderantemente por medio de trabajos a cielo abierto.

### 1.2.6.1 Normas nacionales.

Tabla 4 Normas nacionales.

Clave	Descripción
NMX-L-144-SCFI-2003	Exploración del petróleo - bentonita empleada en fluidos de perforación, terminación y mantenimiento de pozos petroleros - especificaciones y métodos de prueba (cancela a la NMX-L-144-1995-SCFI).
NOM-004-CNA-1996	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.

### 1.2.6.2 Normas internacionales.

Tabla 5 Normas internacionales.

Clave	Descripción
API Spec 13A ISO 13500:2009	Especificación para materiales fluidos de perforación. Industrias de gas natural y petróleo — Fluidos de perforación — Especificaciones y pruebas.
ASTM D5890-06	Método para determinar el índice de dilatación de los componentes minerales de arcilla de revestimientos geosintéticos de arcilla.

### 1.2.7 Principales usos.

La bentonita, en tanto mineral industrial, posee una gran gama de aplicaciones y por las posibilidades que brinda para obtener un alto valor agregado a través de su activación, puede alcanzar en casos puntuales valores de venta que superen a cualquier otro mineral. Un ejemplo lo constituyen las bentonitas organofílicas utilizadas en la industria de la pintura, o las activadas en medio alcalino para cosméticos. Por sus variadas propiedades, las diferentes industrias la utilizan en estado natural o activadas. Se comercializa en diferentes formas: en bruto, triturada, molida en diferentes mallas según el destino final, o activadas. Una síntesis de los diferentes usos, en función del tipo de bentonita seleccionada, se expone a continuación en la tabla 6. (CASTRO & CORAL, 2013)

Tabla 6 Usos industriales de las bentonitas y sus productos.

Industria	Bentonita natural Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	Bentonita natural Na <sup>+</sup>	Bentonita activada (alcalina)	Bentonita activada (ácida)	Bentonita organofílica
Fundición		Componentes en arenas para moldeo			
Petrolera		Agente tixotrópico			Tixotrópico (fluidos no iónicos)
Alimenticia	Refinación de azúcar, clarificación de jugos y vinos				
Química	Carga para caucho/plástico			Catalizadores, carga para caucho/plástico	
Cerámica	Pastas	Esmaltes			
Construcción	Plastificante en concretos, sellador, lubricante				
Farmacéutica	Materia prima para tierras medicinales, ungüentos y cosméticos				
Minera	Peletización de minerales				
Aceite/grasa comestible	Refinación, decoloración, purificación			Refinación, decoloración, purificación	
Limpieza	Aditivo en jabones				
Brea/alquitrán					Estabilizador de suspensiones de alquitrán
Pintura					Estabilizador y extendedor

#### 1.2.7.1 Fundición de metales.

- La fundición de metales es uno de los usos actuales más importantes de la bentonita. Bloques de motor, tambores de freno, cajas de transmisión, tapas de alcantarillas, desagües de calles, accesorios de agua de latón, sartenes de hierro fundido y más se producen a partir de moldes de fundición que contienen bentonita. En la mayoría de las fundiciones ferrosas y no ferrosas del mundo, se utiliza bentonita como agente aglutinante en un proceso conocido como arena verde.

El molde se elabora combinando arena, carbón y una pequeña cantidad de agua para crear una mezcla que se coloca alrededor de un patrón dividido en dos mitades. Una vez que se ha conformado la forma, se retiran los patrones, se unen las dos mitades del molde y se vierte el metal fundido en la cavidad abierta. Tras la solidificación y el enfriamiento parcial del metal, se sacude la arena y se procede a limpiar y mecanizar el metal fundido. Posteriormente, la mezcla de arena y arcilla se recicla para la creación de un nuevo molde. Se añade continuamente arena nueva, arcilla, carbón y agua a la mezcla reciclada a medida que se desechan los materiales viejos. En este proceso se emplean bentonitas de sodio y calcio, ya sea de forma individual o en combinaciones. La elección del tipo y la cantidad de bentonita depende del metal

que se funde, así como del tamaño y la complejidad de la fundición y del equipo utilizado. También se pueden incorporar otros aditivos, como almidón y harina de madera, para modificar las propiedades de la arena de moldeo. En comparación con otros materiales aglutinantes, las propiedades adhesivas de la bentonita ofrecen una unión superior para la arena en el molde antes, durante y después del vertido del metal fundido, lo que hace que el proceso de fundición de metales sea rápido, flexible y rentable. Se ha observado que las bentonitas de sodio naturales de los Estados Unidos son especialmente efectivas en aplicaciones de fundición y se utilizan ampliamente con este fin. Se estima que la industria de fundición de metales es el principal consumidor de bentonita, representando aproximadamente el 25% de la producción mundial total.

#### 1.2.7.2 Absorbentes para desechos de mascotas.

- Antes de los años 80, la mayoría de los productos destinados a la arena para mascotas estaban elaborados con arena o arcillas que no formaban grumos. Las cajas de arena que utilizaban estos materiales eran complicadas de mantener en condiciones higiénicas y requerían cambios frecuentes para conservar su frescura. A finales de esa década, se identificó que la bentonita sódica era particularmente adecuada para la fabricación de arena aglomerante para gatos. Este tipo de bentonita encapsula los desechos de las mascotas en grumos de arcilla absorbente, que pueden ser retirados de manera sencilla y completa de la caja de arena, lo que reduce el desperdicio de arena y ayuda a mantener las cajas limpias y sin olores. La innovación en la arena a base de arcilla, especialmente en la variedad aglomerante, ha jugado un papel crucial en la creciente aceptación de los gatos como mascotas de interior. En los últimos diez años, el consumo anual de arena aglomerante para gatos ha más que duplicado. Actualmente, los absorbentes de desechos de mascotas constituyen aproximadamente el 25% de la producción de bentonita en Estados Unidos y Europa. La arena para mascotas es, sin duda, la aplicación más reconocida de la bentonita debido a su uso directo por parte de los consumidores.



#### 1.2.7.3 Fluidos de perforación

- La bentonita sódica ha sido empleada en fluidos de perforación para la exploración de petróleo y gas desde la década de 1920. Además, constituye un componente esencial en los fluidos utilizados para perforar pozos de pequeño diámetro destinados a la extracción de agua, la exploración minera y los pozos de monitoreo ambiental. También se aplica en la técnica relativamente reciente de perforación direccional horizontal, que permite la instalación de cables y tuberías de servicios públicos bajo edificios, calles, carreteras y áreas ambientalmente sensibles, evitando así la necesidad de realizar zanjas superficiales costosas y disruptivas. Estos fluidos son especialmente adecuados para aplicaciones de perforación debido a su capacidad para lubricar la tubería de perforación y el cabezal de corte, así como para suspender los recortes de perforación, facilitando su extracción del pozo. La bentonita presente en el fluido también ayuda a limitar la pérdida de este en el suelo y la roca circundante al pozo de perforación. En la perforación sin base de agua y en muchos fluidos a base de emulsión, las bentonitas modificadas orgánicamente proporcionan muchas de las mismas propiedades.

#### 1.2.7.4 Peletización de mineral de hierro.

- El avance en el proceso de peletización del mineral de hierro a finales de los años 50 propició la utilización global de mineral de hierro de baja calidad en la producción de acero. Un elemento clave en este desarrollo fue la incorporación de bentonita sódica natural como aglutinante. En este procedimiento, el mineral se muele finamente para separar el óxido de hierro de la roca madre. Sin embargo, la finura del concentrado de mineral de hierro en polvo presenta dificultades en su manipulación durante el transporte y el procesamiento en el alto horno. Para solucionar estos inconvenientes, se mezcla una pequeña cantidad de bentonita y agua con el concentrado de mineral de hierro finamente molido, y posteriormente se procesa la mezcla en un peletizador, generando pellets esféricos de aproximadamente 1 cm de diámetro. Estos pellets son secados y luego sinterizados. Tras el enfriamiento, los pellets endurecidos son capaces de resistir el transporte y la manipulación a largas distancias sin fracturarse. Además, los pellets facilitan el flujo de gas en los hornos de reducción durante el

proceso de fabricación de acero. En ciertas ocasiones, los concentrados de mineral de hierro combinados con bentonita se compactan a alta presión para formar briquetas.

#### 1.2.7.5 Blanqueamiento y clarificación.

- En el transcurso del último siglo, el uso de bentonitas de calcio ha aumentado notablemente en la clarificación y decoloración, o "blanqueo", de aceites de origen animal, vegetal y mineral. Estos aceites suelen contener diversas impurezas, tales como gomas, fosfátidos, metales traza y ácidos grasos libres, que pueden dar lugar a productos de oxidación no deseados y acortar la vida útil del producto. Las arcillas blanqueadoras son capaces de eliminar muchas de estas impurezas, así como compuestos responsables del color, como la clorofila, las xantofilas y los carotenos. Las bentonitas de calcio demuestran una eficacia particular como arcillas blanqueadoras tras ser tratadas con ácido, lo que mejora su porosidad. Gracias a sus destacadas propiedades blanqueadoras, la producción global de bentonitas activadas con ácido ha alcanzado ya varios cientos de miles de toneladas anuales. Por otro lado, la bentonita sódica ha sido utilizada durante mucho tiempo como un agente clarificante en la elaboración de vino y jugo. El proceso de clarificación implica la adición de una sustancia adsorbente al líquido, con el fin de eliminar proteínas suspendidas y otros coloides orgánicos que, de no ser tratados, podrían precipitar o generar turbidez al enfriarse el líquido. Debido a su reducido tamaño y solubilidad, estos materiales indeseables son complicados de eliminar mediante métodos de filtración convencionales. La gran superficie y la alta carga negativa de la montmorillonita hacen que la bentonita sea especialmente adecuada para adsorber compuestos con carga positiva, como las proteínas, facilitando su eliminación a través de floculación.

#### 1.2.7.6 Selladores ambientales.

- La capacidad distintiva de la bentonita para absorber agua, expandirse considerablemente en comparación con su volumen seco y generar una permeabilidad al agua extremadamente baja la hace un sellador excepcional para aplicaciones ambientales. Los productos de bentonita natural de grano grueso, comúnmente denominados chips o grava, fueron diseñados para su utilización en el sellado de

tuberías al finalizar la perforación de pozos y para el relleno de pozos y cavidades subterráneas en el momento de su clausura. Los chips de bentonita tienen la capacidad de hundirse rápidamente en agua estancada y, una vez posicionados, se expanden para ejercer una presión considerable contra las paredes de la cavidad, creando un sello efectivo. Se ha logrado sellar con éxito pozos con agua de hasta 500 metros de profundidad de esta manera. En situaciones donde el espacio libre en un pozo es limitado y no se pueden emplear virutas de bentonita, se pueden utilizar lechadas de bentonita bombeables con un alto contenido de sólidos. Estos productos se elaboran a partir de bentonita que ha sido especialmente tratada para retrasar el inicio de la gelificación al mezclarse con agua, lo que permite su colocación mientras aún se encuentran en estado líquido. Las lechadas de bentonita también pueden ser inyectadas a alta presión directamente en el suelo para rellenar los poros y formar un sello de baja permeabilidad para los cimientos de edificaciones y otras estructuras subterráneas. Se han desarrollado diferentes productos de bentonita en forma de polvo y gránulos para el sellado de vertederos, lagunas de aguas residuales y estanques decorativos.

#### 1.2.7.7 Ingeniería civil.

- La bentonita sódica ha sido empleada desde al menos la década de 1940 para establecer barreras in situ que limitan la permeabilidad al flujo de aguas subterráneas y para crear cimientos in situ en edificaciones, en un procedimiento conocido como construcción de zanjas de lodo. Durante este proceso, se introduce lodo de bentonita en una zanja a medida que se excava, manteniéndola constantemente llena. A medida que el agua del lodo se filtra hacia el suelo, la bentonita genera una delgada película en las paredes de la zanja, lo que ralentiza el movimiento del agua y permite que la presión hidrostática del lodo estabilice las paredes de la zanja. Gracias a esta técnica, es posible excavar zanjas a profundidades de hasta cien pies o más, incluso en suelos de alta inestabilidad. Posteriormente, se puede introducir una mezcla de bentonita con tierra, cemento u otros materiales de relleno en la zanja, de acuerdo con las especificaciones del proyecto. Estas barreras se utilizan comúnmente para crear núcleos estables de baja permeabilidad en la construcción de presas de tierra, siendo la presa Wanapum en el río Columbia, en el sur del estado de Washington, un ejemplo

destacado de este método constructivo. Además, esta técnica se aplica frecuentemente para establecer barreras de baja permeabilidad en sitios de desechos peligrosos, con el fin de contener contaminantes hasta que se complete la remediación del área. Al utilizar hormigón como material de relleno, es posible construir un muro de cimentación in situ sin la necesidad de excavar grandes agujeros, colocar encofrados y rellenar el exterior de la cimentación. Esta práctica es habitual en la construcción de nuevos edificios en áreas urbanas densamente pobladas. Asimismo, los productos a base de bentonita son utilizados en la perforación de túneles para carreteras y sistemas de metro, así como en la instalación de tuberías para el transporte de agua potable, aguas pluviales y aguas residuales.

#### 1.2.7.8 Elaboración de jabones.

- En forma de carga en jabones por su poder emulsionante o por su afinidad por las partículas carbonatadas al efecto detergente debido a la suspensión viscosa del gel que contiene. Permite una rápida dispersión en el agua por el contenido de arcilla en estado coloidal que contiene. Ablanda las aguas duras y corrige el exceso de álcalis del jabón realizando un efecto autoprotector sobre los tejidos.

#### 1.2.7.9 Preparación de alimentos.

- Tiene aplicación en la preparación de alimentos para animales, como adsorbente de toxinas y como aglutinante en procesos de peletización o formación de gránulos y aditivo nutricional y actúa como promotor del crecimiento. Sirve de soporte para vitaminas, sales minerales, antibióticos y de otros aditivos. En la alimentación de aves incrementa la producción de huevos, su tamaño y endurece el cascarón. Impide la proliferación de hongos causados por humedad y temperatura. Como aglutinante no transmite sabor ni olor a los alimentos. En su función de aditivo nutricional favorece la interacción con proteínas, péptidos y aminoácidos, mejorando los rendimientos zootécnicos (Eisenhour & Brown, 2009)

#### 1.2.7.10 Catalizador.

- Como catalizador en procesos químicos, en reacciones de desulfuración de gasolina, isomerización de terpenos, polimerización de olefinas y cracking de petróleo.

#### 1.2.7.11 Industria farmacéutica.

- Se usa como excipiente por la industria farmacéutica debido a que no es tóxica ni irritante. Por no poder ser absorbida por el cuerpo humano se utiliza para elaborar preparaciones tópicas y orales, así como adsorbente, estabilizante, espesante, agente suspensor y modificador de viscosidad.

#### 1.2.7.12 Agricultura.

- En la agricultura para mejorar las propiedades de suelos arenosos, recubrir semillas con el fin de aumentar su tamaño, facilitar su distribución mecánica y mejorar la germinación. En pesticidas ampliamente usada como transportador en seco y diluyente.

#### 1.2.7.13 Elaboración de cerámicos.

- En aplicaciones cerámicas como agente de suspensión y plastificante en vidrios. En porcelanas eléctricas como un plastificante que incrementa la resistencia en seco y quemado y reduce la absorción.

#### 1.2.7.14 Fabricación de pinturas.

- Para la fabricación de pinturas tixotrópicas e impermeables, así como en la manufactura de grasas, lubricantes, plásticos y cosméticos para hincharse y dispersarse en disolventes orgánicos y utilizarse como agentes gelificantes y emulsionantes.

#### 1.2.7.15 Industria papelera

- En la industria papelera para desteñir el papel reciclado, clarificar aguas, como auxiliar de retención, cubierta y papel de copia sin carbón. Para desarrollar color en leuco colorantes y en papeles auto copiante se utilizan bentonitas activadas con ácido.

#### 1.2.7.16 Otros

- Entre otras aplicaciones se encuentran las siguientes: En electrodos para soldadura como estabilizadores de arco y la reducción del gas en películas plásticas.

### 1.3 Generalidades Dolomita

Las dolomías fueron descritas por primera vez el 30 de enero de 1791 por Déodat de Dolomieu en una carta dirigida a su amigo Picot de la Peyrouse. En esta carta, Dolomieu describió por primera vez la existencia de una roca que se disolvía lentamente en ácido clorhídrico diluido sin producir efervescencia y que había descubierto en rocas de edificios de Roma y en las montañas del Tirol, región conocida actualmente como Las Dolomitas. No fue hasta marzo del siguiente año cuando Nicolas-Théodore de Saussure propuso, en honor a Dolomieu, el nombre de dolomie (dolomía) para esta nueva roca. (Guerra, 2017)

La dolomita es un carbonato doble de calcio y magnesio, su fórmula química es  $(CaMg(CO_2)_2)$ ; es más que una simple variante de la caliza, contiene el 30,41% de CaO, 21,86% de MgO y el 47,73% de  $CO_2$ , en su forma más pura. Normalmente se presenta en cristales romboédricos y, por lo general, estos cristales son de hábito deformado, muy aplastados, curvos en forma de silla de montar o en formas masivas, compactas o bien en forma de pequeñas geodas, en la figura 12 se pueden observar cristales romboédricos de una dolomita 42. Como impurezas puede contener hierro y manganeso. Su color varía entre blanco, gris rosado, rojizo, negro, a veces con matices amarillento, parduzco o verdusco, predominando el incoloro o blanco grisáceo. Presenta un aspecto vítreo a perlado y es de transparente a translúcida. Tiene una dureza de 3.5 a 4, un peso específico de 2.9 g/cm<sup>3</sup> y forma la roca denominada dolomita. (Coordinación General de Minería, 2022)



*figura 12 Cristales romboédricos de dolomita.*

La dolomita es un mineral bastante común en las rocas sedimentarias continentales y marinas, se puede encontrar en capas de varios cientos de metros, y es uno de los minerales más difundidos en las rocas sedimentarias carbonatadas; se forma por la acción del agua rica en

magnesio, sobre depósitos calcáreos, en dónde se produce una progresiva substitución del calcio por el magnesio; a este proceso se le denomina dolomitización, y es un caso concreto de los procesos de sustitución en general o metasomatismo (sustitución de una sustancia por otra), también se forma por actividad hidrotermal. (Alfonso, Silvana, & Walter, 2014)

La dolomita -  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  - contiene a varios componentes de una serie de solución sólida con una relación similar pero no idéntica de Mg/Ca, esta característica de solución sólida le da al mineral la capacidad de cambiar su relación de Ca y Mg sin afectar en gran medida las propiedades ópticas de las dolomitas (Warren, 2000). La variación del pH, la presión y la temperatura (entre otras) favorecen una transformación sutil en su red (estructura) cristalina, similar a la que ocurre en otras series isomórficas, como los feldespatos en la serie de las plagioclasas (anortita – andesita; Land, 1985). Así como los feldespatos forman una serie isomórfica continua de variaciones químicas, al cambiar su relación de Mg/Ca a condiciones más estequiométricas (fases más estables y ordenadas), la dolomita forma un espectro de fases que van de un polo más cálcico a otro más magnésico.

En ambientes diagenéticos, cada dolomita nueva se forma a partir de la disolución completa o parcial de la dolomita anterior (los núcleos turbios suelen ser residuos del cristal anterior). Este continuo reequilibrio que ocurre durante la historia diagenética, reduce significativamente la capacidad de retener la composición original en elementos traza (para entender las condiciones de deposición o precipitación) y constantemente reequilibra la composición isotópica originales de la dolomita.

Otra característica de este mineral es que esta continua disolución-reprecipitación, permite crear o destruir porosidad y permeabilidad un número indeterminado de veces en la historia diagenética. La dolomitización también crea nuevos cristales con crecimientos romboedricos que siguen las zonas de disolución de su precursor menos estable. La repetición de estos procesos, sin una cementación completa de los poros, puede generar porosidad intercrystalina repetidas veces durante la historia de enterramiento de la roca. (Aguinaco, 2009)

La dolomita es un mineral complejo. Puede precipitar directamente de soluciones que tienen iones de magnesio, calcio y carbonato para formar cemento o sedimento no litificado. No obstante, la mayor parte de la dolomita se forma mediante la alteración química de la roca carbonatada o del sedimento precursor; principalmente caliza o lodos calcáreos. Estos

carbonatos tienden a ser inestables y están compuestos fundamentalmente por calcita o su polimorfo termodinámicamente más inestable, la aragonita. Si estos materiales precursores se exponen a fluidos ricos en contenido de magnesio, es probable que una porción de los iones de calcio sea reemplazada por iones de magnesio para formar un carbonato más estable de calcio y magnesio denominado dolomita (M, W, & N., 2009)

### 1.3.1 Propiedades químicas.

Por lo general este mineral reacciona levemente al aplicársele ácido clorhídrico diluido al 5% pero en forma distinta que el carbonato de calcio puro. La dolomita es más que una simple variante de caliza, contiene el 30.41% de CaO, 21.86% de MgO y el 47.73% de CO<sub>2</sub>, en su forma más pura. Normalmente se presenta en cristales romboédricos y por lo general estos cristales son de hábito deformado, muy aplastados, curvos en forma de silla de montar o en formas masivas, compactas o bien en forma de pequeñas geodas (en dolomías). A menudo se encuentra como masas granulares. (Coordinación General de Minería, 2022)

En la tabla 7 se presenta la relación entre la caliza y la dolomita, obtenido de una empresa canadiense.

*Tabla 7 Propiedades químicas de la Dolomita.*

<b>Propiedades químicas</b>	<b>Caliza alta en calcio</b>	<b>Dolomita</b>
Carbonato de calcio, CaCO <sub>3</sub>	98.00 %	55.35 %
Óxido de calcio, CaO	54.80 %	31.00 %
Carbonato de magnesio, MgCO <sub>3</sub>	0.73 %	42.25 %
Óxido de magnesio, MgO	0.35 %	20.20 %
Silice, SiO <sub>2</sub>	0.66 %	1.65 %
Óxido de hierro, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10 %	0.23 %
Alúmina, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22 %	0.21 %
Azufre	0.01 %	0.01 %
Na <sub>2</sub> O	0.01 %	0.03 %
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01 %	0.02 %
TiO <sub>2</sub>	0.02 %	0.01 %
K <sub>2</sub> O	0.05 %	0.08 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00 %	0.00 %
Pérdida por ignición	43.30 %	46.40 %



### 1.3.1.1 Caracterización química y mineralógica de muestras de dolomita natural y dolomita comercial.

En la tabla 7 y 8 podemos ver la diferencia en la composición química de una dolomita natural a una dolomita comercial observando que la comercial se encuentra más refinada en su análisis químico.

Tabla 7 Análisis químico natural de la Dolomita.

Componente	Composición química (%)
SiO <sub>2</sub>	0.15
CaO	30.43
MgO	21.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06
TiO <sub>2</sub>	<0.01
MnO	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.107
SrO	<0.01
BaO	<0.01
Pérdida por calcinación	46.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.1

Tabla 8 Análisis químico de la Dolomita comercial.

Componente	Composición química (%)
SiO <sub>2</sub>	0.15
CaO	30.43
MgO	21.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06
TiO <sub>2</sub>	<0.01
MnO	0.05

### 1.3.2 Propiedades físicas.

Como impurezas puede contener hierro y manganeso. Su color varía entre blanco, gris rosado, rojizo, negro, a veces con matices amarillento, parduzco o verdusco, predominando el incoloro o blanco grisáceo. Presenta un aspecto vítreo a perlado y es de transparente a translúcida. Tiene una dureza de 3.5 a 4, un peso específico de 2.9 g/cm<sup>3</sup> y forma la roca denominada dolomita.

Este mineral con alto grado de pureza es muy importante particularmente para aplicaciones como dolomita refractaria y vidrio plano; otras aplicaciones importantes son como fundente en metalurgia; en la manufactura de cerámica, pinturas y cargas blancas; en la agricultura, la dolomita al igual que la calcita, es una fuente de magnesio y calcio que constituye un fertilizante indispensable al modificar el pH del suelo, logrando regular su acidez, mejorándolo e incrementando el rendimiento de los cultivos; en la industria química, para la preparación de sales de magnesio y como mena de magnesio (Mg) metálico; como material de construcción, para cementos especiales y como piedra ornamental; de interés científico y coleccionista; es un excelente aislante térmico y es utilizada también para desacidificar el agua. (Coordinación General de Minería, 2022)

*Tabla 9 Propiedades físicas de la Dolomita*

<b>Propiedades Físicas</b>	<b>Caliza alta en calcio</b>	<b>Dolomita</b>
Gravedad específica, volumen, ASTM C127	2.710	2.773
Absorción, ASTM C127	0.25 %	0.75 %
Abrasión, ASTM C131	27.60 %	20.20 %
Valor sulfato de magnesio, ASTM C88	1.04 %	0.34 %
Partículas trituradas	100.00 %	100.00 %
Partículas elongadas	0.00 %	0.00 %
Índice del trabajo de enlace	10.8 kWh/ton corta	0.8 kWh/ton corta

### 1.3.3 Potencial geológico minero (México).

Los principales productores de dolomita en México en 2017 fueron: Chihuahua (74%), Coahuila (20%), y Nuevo León (5%). El Anuario Estadístico de la Minería Mexicana estima que la producción, en 2017, es de 6 millones de toneladas, un 16% inferior a la producción de 2016, en la figura 14 se observa un mapa de la república mexicana señalando los principales estados productores de Dolomita.



Figura 14 Principales estados productores de Dolomita.

### 1.3.3.1 Coahuila.

En Ramos Arizpe existen estratos de caliza dolomítica pertenecientes a la Fm. Cupido del Cretácico inferior. Esta zona de caliza dolomítica, mantiene un comportamiento más o menos uniforme, presentando un espesor promedio de 40 m, el cual se puede seguir en superficie por espacio de unos 1,500 m. Por otra parte, la dolomita se aprecia en mantos de gran extensión, mismos que constituyen la Sierra de la Paila, es por eso que las dimensiones son enormes. Esta roca cambia transicionalmente a caliza. La caliza en la cima constituye estratos gruesos a masivos. Las rocas antes mencionadas se consideran pertenecientes a la Formación La Paila de edad Albiano inferior.

En Monclova, las calizas arrecifales dolomitizadas deben su origen a procesos post-sedimentarios por una diferenciación diagenética durante la precipitación de las calizas. Se

presentan en forma muy irregular y sin mantener un patrón bien definido para su comportamiento, es muy característico que sean cuerpos aislados sin presentar mayor continuidad lateralmente y a profundidad se terminan bruscamente al llegar al contacto con estratos arcillosos y delgados.

En el municipio de Saltillo, la mineralización consiste en mantos de dolomita de 1 a 2 m de espesor en la caliza Cupido del Cretácico inferior.

#### 1.3.3.2 Nuevo León.

En el municipio de Bustamante se pudo comprobar la presencia de varias zonas dolomitizadas dentro de la Formación Aurora del Cretácico inferior, la cual se considera de mayor importancia, ya que es en la que se presentan una serie de estratos y calizas dolomitizadas. Las zonas dolomitizadas existentes dentro del área corresponden a una intercalación de estratos de calizas con calizas dolomitizadas de 1 a 4 m de espesor emplazados dentro de la Formación Aurora del Cretácico inferior.

Se definieron 4 zonas dolomitizadas, que, de acuerdo a sus espesores, encaje y topografía se considera pueden ser explotables. Las leyes son de entre 16 y 19 % de MgO. El marco geológico regional lo forman en su totalidad rocas sedimentarias (calizas), cuyas edades van desde el Cretácico inferior hasta el Cretácico superior. Estructuralmente constituyen parte del flanco oriental del gran anticlinal que forman las sierras Morena y de Bustamante, el cual guarda una orientación general NW-SE.

En el municipio de Santa Catarina el depósito se observa en una zona en la que se considera a la caliza de la Formación Aurora del Cretácico inferior por sus características megascópicas y que presenta estratos o mantos de calizas dolomitizadas. Es un yacimiento clasificado como de reemplazamiento el depósito se observa en forma de estratos concordantes con la roca encajonante, en forma de mantos de espesores considerables, en el cual hay estratos más ricos en contenido de dolomita. Se tienen en estratos de 2 a 5 m en un rango de 40 m y longitud de 500 m. Existen otros afloramientos con espesores menores. Se reportan valores de hasta 20% de MgO.

#### 1.3.3.3 Colima.

En el municipio de Colima, hacia el sur, en la unidad litológica de rocas calcáreas pertenecientes a la Formación Morelos se localizan calizas dolomíticas y yesos, los cuales

son resultados de cambio de ambiente durante la depositación de sedimentos en el Cretácico. El bajo contenido de magnesio en las calizas indica una incipiente dolomitización. Al SE de la ciudad de Colima, se localiza un cuerpo de dolomita, el cual se presenta constituyendo una franja mineralizada de forma tabular con ley promedio de 15.98%. Esta dolomía es de origen diagenético por reflujo evaporítico. Este proceso consistió en la formación de una salmuera enriquecida en magnesio, la cual circula a través de la caliza para poder dolomitizarla, realizándose este fenómeno en donde la evaporación del agua de mar es intensa.

#### 1.3.3.4 Guerrero.

Al NE del poblado El Rincón, municipio de Chilpancingo, Gro., se localizan rocas sedimentarias constituidas por calizas y calizas dolomíticas de la Formación Morelos que ocupan una gran extensión. Al parecer, dicha formación está compuesta por dos miembros, uno de calizas puras y otro de calizas dolomíticas. Estas últimas son de aspecto sacaroide y brillo algo resinoso, masiva compacta de color gris oscuro, cuya alteración la torna a negra, diferenciándola localmente de las calizas. Las leyes oscilan entre 17% y 20% de MgO y de CaO entre 31% y 37%.

En el poblado de Teacalco, municipio de Taxco de Alarcón, Gro., afloran dolomitas de la Formación Morelos. La presentación de las dolomitas es muy variada y hay cambios a cortas distancias tanto en coloración, granulometría y textura.

Predominan las tonalidades grises que van de gris claro a gris oscuro; también se observa en algunas partes colores beige y crema. La granulometría varía de muy fina a mediana, con texturas de cristalina a sacaroide. Se presentan tanto en forma masiva como con estratificación predominando la primera. Sus leyes promedian entre 19% y 20% de MgO, con 2.33% de SiO<sub>2</sub>, 27.68% CaO y 20.18% de MgO. El potencial es de 7'385,212 ton.

#### 1.3.3.5 México.

Se localiza en el Cerro Blanco municipio de Apaxco, Estado de México. El área de estudio está representada por una unidad de calizas continentales dolomitizadas de color gris claro, de estratificación delgada a masiva con nódulos y bandas de pedernal, además de estilolitas y material aluvial. Las leyes promedio obtenidas son 34.36% de CaO, 18.60% de MgO, 0.32% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 46.12% de PXC, 1.29% de insolubles, 0.04% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 1.17% de SiO<sub>2</sub>. El potencial es de 7'822,500 ton.

#### 1.3.3.6 Hidalgo.

En la localidad Las Delicias, municipio de Nicolás Flores, Hgo., el material de importancia lo constituye una unidad metamórfica, conformada por un mármol, el cual localmente varía su composición tanto a una caliza recristalizada como a una caliza dolomítica. Se cubió un tonelaje de 484,937 ton., como reservas probables “in situ” de caliza dolomitizada y marmolizada con contenidos de óxido de magnesio entre 17.3% y 19.9%, que corresponde a la porción norte del predio Las Delicias, conocida como El Despacho. A 40 km en línea recta al N 70° W de la Cd. de Pachuca, Hgo., se localizan calizas dolomitizadas de color gris claro, de estratificación gruesa-masiva con nódulos y bandas de pedernal, además de estilolitas y material aluvial.

En Tepatepec, municipio de Fco. I. Madero, Hgo., la dolomita se presenta en forma de vetas color gris oscuro con textura parcialmente porosa y microgranular, la cual se originó por la concentración de sales de magnesio debido a la escasa circulación y poca profundidad, permitiendo así el reemplazamiento químico de las rocas carbonatadas por dolomita. El potencial es de 5'114,500 ton de dolomita con leyes de 64.04% de  $\text{CaCO}_3$ , 35.38% de  $\text{CaO}$ , 15.05% de  $\text{MgO}$ , 45.15% de PXC, 0.45% de  $\text{SiO}_2$ , 0.42% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0.23% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . (Coordinación General de Minería, 2022)

### 1.4 Método de extracción y Beneficio.

#### 1.4.1 Extracción.

El yacimiento de dolomita debe tener una ley mínima de 17% de  $\text{MgO}$  y su explotación se realiza a tajo abierto utilizando el sistema de tumbe mediante bancos. La cual se realiza perforando barrenos de 3.5 pulgadas de diámetro y profundidad máxima de 40.0 metros con equipo Wagon Drill, así como el uso de explosivos. El mineral tumbado se levanta o rezaga con cargador frontal para luego acarrearlo con camiones fuera de carretera de 35 toneladas hasta la sección de trituración.

#### 1.4.2 Trituración y Clasificación.

En esta etapa del proceso el mineral pasa a una quebradora de quijada 30 x 42", el producto de ésta se clasifica produciendo varios tamaños, principalmente para la industria siderúrgica. Se producen trozos (-3"+11/2") gravilla (-2 1/2"+1 1/2"), granulados (-7/8"+3/8") y finos (1 1/2"+7/8"). Además, se cuenta con pulverizadores para producir finos a un tamaño de -200 con porcentajes de 20% de  $\text{MgO}$  para la industria del vidrio.

### 1.4.3 Calcinación.

El mineral triturado se calcina en dos hornos verticales con capacidad de producción de 500 toneladas por día. La descomposición de los carbonatos ocurre entre los 730 y 790° centígrados y cerca de los 900° centígrados.

### 1.4.5 Envase.

Mediante bandas transportadoras se lleva el mineral a silos para cargar tractocamiones de 30 toneladas y/o se almacena para que con una ensacadora llene súper sacos de 1 a 2 toneladas, (Coordinación General de Minería, 2022) en la figura 13 se observa el proceso de extracción y beneficio ejemplificado.

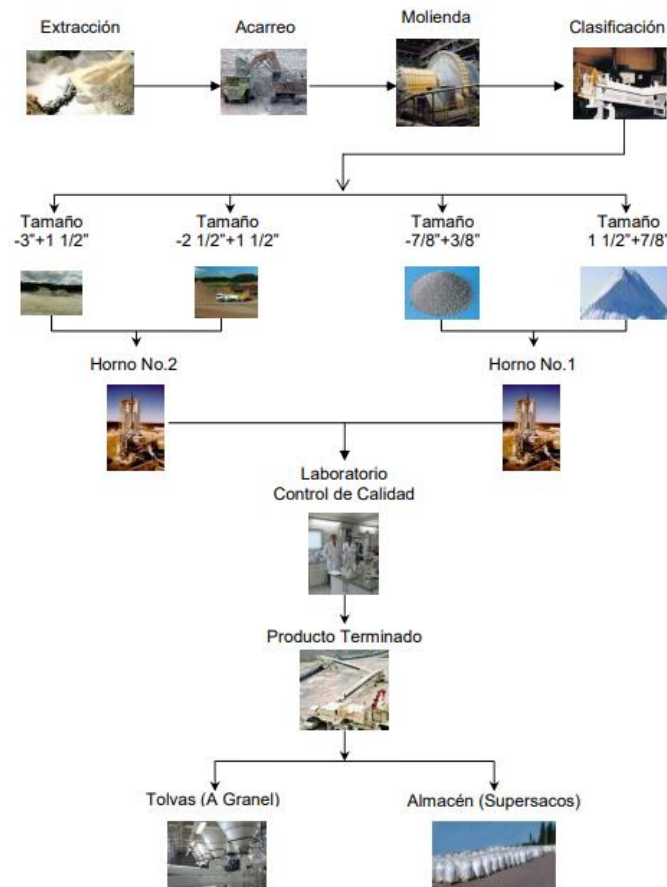


figura 13 Principales estados productores de Dolomita.

## 1.5 Marco normativo.

En el Artículo 4o. de la Ley Minera queda especificado que se sujetarán a ésta, los minerales o sustancias de los que se extraiga magnesio, así como los minerales o grupos de minerales

de uso industrial, entre los cuales se encuentra la dolomita. (Coordinación General de Minería, 2022)

### 1.5.1 Normas nacionales.

Tabla 10 Normas nacionales de la Dolomita.

Clave	Título
NMX-O027-3-1985	Productos generales para uso industrial – Materiales refractarios, análisis químico de magnesita y dolomita
NMX-O-044-1991	Productos generales para uso industrial – Materiales refractarios – Dolomita refractaria granular calcinada a muerte – Determinación de la hidratación.
NMX-O-047-1982	Materiales refractarios – Dolomita granular – Clasificación.
NMX-P-018-1976	Arena de dolomita empleada como materia prima en la industria del vidrio

### 1.5.2 Normas internacionales.

Las normas internacionales relativas a la dolomita que pueden ser consultadas se encuentran en la ASTM (American Society for Testing and Materials). En la tabla 11 se resumen algunas de las principales normas internaciones.

Tabla 2 Normas Internacionales de la Dolomita<sup>17</sup>

Clave	Título
C492-92 (2013)	Método de prueba para la hidratación de la dolomita refractaria granular calcinada a muerte.
D4373-02 (2007)	Método de prueba para la determinación rápida del contenido de carbonato en suelos.
C227-03	Método de prueba para la reactividad potencial del álcali de las combinaciones de Cemento - Agregado (Método del Mortero-Barra)
E1652-03	Especificación para el polvo de óxido de magnesio y de óxido de aluminio y aisladores usados en la fabricación de termómetros resistentes de platino forrado de metal, termopares de metal base y termopares de metal noble.



C1105-08a	Método de prueba para el cambio de longitud del concreto debido a la reacción de la roca Álcali-Carbonato.
C357-07 (2009) e1	Método de prueba para la densidad de volumen de materiales refractarios granulares.
C88-05	Método de prueba para la validez de agregados por uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
C127-07	Método de prueba para la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso.
C131-06	Método de prueba para la resistencia a la degradación del agregado de tamaño grueso a pequeño por abrasión e impacto en la máquina "Los Ángeles".
C71-08	Terminología relativa a refractarios
C503-08a	Especificación para roca dimensionable de mármol (mármoles cubiertos aquí clasificados como calcita o dolomita).

## 1.6 Principales usos.

Los usos de la dolomita dependen principalmente de sus propiedades físicas y químicas. De acuerdo a sus propiedades físicas la podemos usar como piedra para edificios; por sus propiedades químicas las podemos usar en la manufactura de cementos Portland o cal; plásticos; pinturas; polvos para dientes; antiácido; en la eliminación de dióxido de azufre de los gases de combustión y producción de dióxido de carbono; entre otros.

La variedad de dolomita negra es utilizada principalmente en la industria del vidrio y fundición de hierro; mientras que la dolomita blanca además de ser utilizada en la industria del vidrio y fundición de hierro, también se usa en la industria de alimentos balanceados y cerámica.

La dolomita además de compartir los usos comunes con la caliza, es considerada una fuente vital de magnesio para la industria del acero, del vidrio y agrícola.

Actualmente, algunos productores de acero han estado utilizando una cal más dolomítica, pues ésta alarga la vida del ladrillo refractario en los altos hornos.

La cal dolomítica corresponde a aquella conformada fundamentalmente por carbonatos de magnesio que se obtiene de una roca sedimentaria denominada como caliza, formada fundamentalmente por tres elementos denominados granos, matriz y cemento.

Los compuestos de magnesio, como es el caso de la cal dolomítica aprovechan las propiedades del primero como material refractario en hornos para la producción de hierro y acero, metales no férreos, cristal y cemento, aunque se debe decir que es también utilizado en compuestos a prueba de fuego y extintores, cosméticos y dentífricos. Otras aplicaciones son como material de relleno, supresor de humo en plásticos, laxante y antiácido. ( Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, S.f)

#### 1.6.1 Dolomita en la industria siderúrgica

Existen tres principales usos para la dolomita en la industria siderúrgica.

**La primera** es como fundente, adicionándola pura al alto horno, en la primera etapa del proceso siderúrgico.

Muchos de los grandes productores de acero tienen estratégicamente para este propósito sus propias minas donde la dolomita es triturada, cribada y adicionada a la mezcla sinterizada con el mineral de hierro y coque, todo esto pasa al horno de fundición.

El fundente (caliza/dolomita) se convierte en la escoria que remueve el sulfuro y otras impurezas. El operador del alto horno mezcla la dolomita y la caliza para producir la escoria deseada, elaborada con las propiedades químicas óptimas, tales como puntos de fusión bajo y alta fluidez. La dolomita pura aquí no es tan importante como en otras aplicaciones de la siderurgia.

**En segundo lugar**, está la caliza dolomítica; (dolomita que ha sido calcinada alrededor de los 1,100°C o más.) El producto resultante contiene alrededor de 58% CaO y 38% de MgO. Este es agregado al horno de oxigenación básica, para ampliar el periodo de vida de las cubiertas refractarias, protegiéndolas de las impurezas presentes en el metal fundido.

La adición de caliza dolomítica crea el MgO en la solución en la escoria, ésta proporciona una excelente capacidad de pulido mientras que las partículas en suspensión de MgO proporcionan un revestimiento protector excelente.

Una gran cantidad de productores de cal, también producen caliza dolomítica, la cual es también usada en morteros para la construcción y otros sectores.

**En tercer lugar**, existe la dolomita refractaria, siendo ésta una dolomita calcinada a temperaturas mucho más altas (aproximadamente a 1,600°C) utilizando una dolomita de alta pureza (superior a 97% de CaO + MgO) para producir lo que llamamos dolomita calcinada a muerte. Ésta se utiliza como protector del ladrillo refractario en el horno de fundición y del cucharón, pero también es la materia base junto con el magnesio para la elaboración de la dolomita refractaria de magnesio.

La cal dolomítica, se puede utilizar también como lubricante en el proceso de trefilado (fabricación de alambres), este mismo concepto es aplicado para los moldes de fundición ya que estos la utilizan para evitar la adherencia del metal fundido al molde, especialmente en el lingoteado, adicionalmente se la utiliza como neutralizador de los ácidos usados en el proceso de limpieza del acero. Otra aplicación es el uso de la lechada de cal como aislante de oxígeno cuando se brindan tratamientos térmicos al acero.

#### 1.6.2 Dolomita en la industria del vidrio

La dolomita se utiliza principalmente en la manufactura de vidrio plano, donde el óxido de magnesio actúa como estabilizador para mejorar la resistencia general del vidrio al ataque natural o químico ocasionado por gases o humedad.

El vidrio plano se refiere al vidrio manufacturado en láminas, el cual puede ser nuevamente procesado para cristal de seguridad, vidrio automotriz, entre otros.

En el mismo proceso, la dolomita también actúa para disminuir la temperatura de fusión, la cual mejora la manejabilidad y el magnesio inhibe cualquier reacción entre el estaño fundido y el vidrio.

La composición típica del vidrio plano está representada, generalmente, por el 51% de arena sílica, 16% de carbonato sódico, 15% de desechos (vidrio reciclado), 4% de caliza, 1% de sulfato de sodio y 13% de dolomita. La dolomita pura en el sentido estricto, nunca se utiliza sin roca caliza, debido a que el exceso de magnesio afecta la fundición. Lo ideal es una caliza dolomítica con una relación 3:2 de CaO y MgO. Sin embargo, más que buscar una dolomita

con esta composición exacta, es más fácil para los fabricantes de vidrio plano balancear la dolomita y la caliza juntas.

### 1.6.3 Dolomita en la agricultura

Éste es el tercer mercado más grande para el uso de la dolomita y casi todos los productores suministran algún material agrícola. El mercado agrícola tiene utilidad en tiempos de crisis de la industria del acero. Existen dos principales vertientes a conocer de la dolomita: como aditivo del suelo y la dolomita que se usa como materia base para los fertilizantes de magnesio de calcio.

Aumenta la productividad del terreno por el rápido aumento del pH del suelo (disminuye la acidez) y/o ayuda a corregir deficiencias de magnesio y/o ratios (cocientes) de calcio - magnesio. Cuando se aplican en 2.5 ton/ha puede alcanzar resultados similares a la relevación del pH y reducir la toxicidad de aluminio.

La dolomita es también utilizada hasta cierto punto como aditivo de alimento para animales. La dolomita para uso en la industria del fertilizante debe contener mínimo 90%  $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$  combinado, así como un contenido de sílice que no exceda del 5%. La dolomita de grado bajo con 15 a 20% MgO puede ser usada como acondicionador de suelos. Ayuda a proteger el ácido láctico producido en dietas de grano y a reducir los efectos de la acidosis láctica. (Chávez, 2009)

## *Capítulo II Técnicas experimentales*

### 2.1 Muestreo.

El muestreo de los materiales cuando estos se hayan in situ o cuando han sido depositados por diversas causas y condiciones en un lugar ajeno a su origen. Tiene por objeto principal el de conocer sus valores y características para determinar la posibilidad de exploración en lo que se refiere al sistema en sí, como a la importancia desde el punto de vista económico.

El muestreo se lleva a cabo tomando parte del volumen del mineral total, de tal modo que sea representativa del total. Esta gran responsabilidad recae en una muestra muy pequeña, así que es esencial que esta muestra sea verdaderamente representativa, por lo que es muy importante llevar a cabo una técnica de muestreo definida y realizarla con precaución para

que pueda con considerarse como un promedio seguro de las variaciones que se encuentran en cualquier material. (Universidad de Sonora, S.f)

### 2.1.1 Muestra.

Es una parte del lote, generalmente obtenida por la unión de varios incrementos o fracciones del lote, y cuyo objetivo es representar el lote en las operaciones subsecuentes. El muestreo se define como la técnica de recoger muestras representativas de un conjunto o universo, el método empleado o la selección de una pequeña parte estadísticamente determinada para inferir el valor de una o varias características del conjunto. (Sironvalle, 2002)

### 2.1.2 Tipos de muestreo.

Cuando se habla de tipos de muestreo podemos clasificarlos de distintas maneras, uno por el método que se aplica y el otro en donde se realiza puesto que el muestreo es diferente tanto en interior mina como en superficial.

Existen tres tipos de muestreo:

#### 2.1.2.1 Sistemático:

Las muestras se toman en forma regular en el espacio o en el tiempo

#### 2.1.2.2 Aleatorio:

Las muestras están aleatoria mente distribuidas en el espacio o en el tiempo

#### 2.1.2.3 Estratificado:

Las muestras se distribuyen en diversas poblaciones que en sí mismas pueden considerarse homogéneas (capas, estratos). Se muestrea cada una de ellas independientemente. (PAUL & PARI, 2012)

## 2.2 Caracterización Física.

Dentro de las técnicas de caracterización física del mineral insitu suelen aplicarse pruebas de dureza que es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, y las deformaciones permanentes entre otras, para medir este parámetro suele utilizarse la escala de dureza de Mohs que es una relación de diez minerales ordenados por su dureza, de menor a mayor grado. Se utiliza como referencia de la dureza de un material dado. Fue propuesta por el geólogo alemán en 1825 y se basa en el principio de que una sustancia cualquiera puede rayar a otras más blandas, pero no de forma

contraria. Mohs eligió diez minerales, a los que asignó un determinado número equiparable a su grado de dureza, estableciendo así una escala creciente. Empezó por el talco, que recibió el número 1, y terminó con el diamante, al que asignó el número 10. Cada mineral raya a los que tienen asignado un número inferior a él, y lo rayan aquellos que tienen un número superior al suyo. Otro parámetro a evaluar puede ser la raya de un mineral la cual se refiere al color de un mineral en forma de polvo, que puede o no ser idéntico al color de la muestra de mano. La forma más común de evaluar esta propiedad se hace rayando la muestra de mano contra una placa de porcelana y observando el color del polvo del mineral que queda en la superficie de la placa de porcelana. La raya de un mineral es independiente de los elementos traza o de cualquier alteración de la superficie a causa de la intemperie. La raya es más a menudo distintiva de los minerales metálicos en contraste con los minerales no metálicos, la característica de lustre o brillo de un mineral es una técnica que nos puede ayudar a identificar a simple vista minerales metálicos y no metálicos ya que el lustre es el aspecto que presenta la superficie de un mineral al reflejar la luz, una propiedad que no depende del color y sí de su naturaleza química: es más intenso en sustancias que tienen enlaces metálicos y menor en las sustancias que presentan enlaces iónicos o covalentes. El tipo y la intensidad del brillo dependen del índice de refracción y del poder reflector (relación entre la luz absorbida y porcentaje de luz reflejada); el color es básicamente el tono de color que observamos del mineral a simple vista es una de sus propiedades físicas más importantes, pero, no siempre es constante, por lo tanto, debe emplearse con precaución en la identificación de ciertas especies, también en la caracterización nos puede ayudar el observar su hábito cristalino que es la apariencia morfológica externa de un determinado monocristal. Aunque todos los minerales están compuestos de cristales, no todos los minerales exhiben un hábito bien definido ya que la forma cristalina perfecta sólo puede ser desarrollada si el mineral crece sin restricciones, lo cual se observa con muy poca frecuencia, generalmente los cristales crecen en agregados del mismo cristal o con cristales de diferentes minerales en una roca. Además, en muchas ocasiones el tamaño de los cristales es tan pequeño que no es posible determinar su hábito a simple vista (Omassi, Morales, & Ramírez, S.f)

### 2.2.1 Granulometría.

La granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del

agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría). (CAÑAS, 2017)

### 2.2.2 Absorción de aceite.

Este es una medición que expresa en porcentaje de líquido que puede absorber algunos materiales 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 consiste 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 15). A continuación, 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. (ORTEGA, 2012)



*figura 15 mezcla del mineral con aceite de linaza dentro de una lata de acero.*

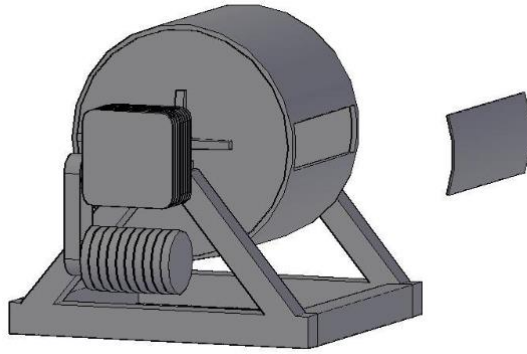
### 2.2.3 Prueba de abrasión de los Ángeles

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 1 ½” (3.75 mm) y agregados gruesos de tamaños mayores de ¾”, por medio de la máquina de Los Ángeles.

#### ***Máquina los Ángeles:***

Se utiliza en ensayos para áridos como rocas, escorias y grava triturada y sin triturar. En lo referente al desgaste, también puede utilizarse para determinar los límites de abrasión indicados. Su rotación debe estar comprendida entre 30 y 33 revoluciones por minuto. Debe estar contrapesada e impulsada de modo de mantener una velocidad periférica uniforme. Está constituida por un tambor cilíndrico hueco de acero de 500 mm de longitud y 700 mm de diámetro aproximadamente, con su eje horizontal fijado a un dispositivo exterior que puede transmitirle un movimiento de rotación alrededor del eje. El tambor tiene una abertura para la introducción del material de ensayo y de la carga abrasiva; dicha abertura está provista de una tapa. (figura 16) (Casstillo, S.f)





*figura 16 Esquema de máquina de desgaste de los Ángeles.*

## 2.3 Caracterización Mineralógica.

### 2.3.1 Difracción de rayos X.

Los Rayos X se descubrieron en 1895 por el físico alemán Röntgen y recibieron ese nombre porque se desconocía su naturaleza en ese momento. En 1912 se estableció de manera precisa la naturaleza de los rayos X.

En ese año se descubrió la difracción de rayos x en cristales y este descubrimiento probó la naturaleza de los rayos X y proporcionó un nuevo método para investigar la estructura de la materia de manera simultánea.

Los R-X son radiación electromagnética de la misma naturaleza que la luz, pero de longitud de onda mucho más corta. La unidad de medida en la región de los r-x es el angstrom ( $\text{\AA}$ ), igual a  $10^{-10}$  m y los rayos x usados en difracción tienen longitudes de onda en el rango 0.5-2.5  $\text{\AA}$  mientras que la longitud de onda de la luz visible está en el orden de 6000  $\text{\AA}$ .

#### 2.3.1.1 Interacción de los R-X con la materia. Difracción.

La difracción es esencialmente un fenómeno de dispersión en el que coopera un gran n° de átomos. Puesto que los átomos están dispuestos periódicamente en una red los rayos dispersados por ellos tienen unas relaciones de fase definidas entre ellos; estas relaciones de fase son tales que en la mayoría de las direcciones se produce una interferencia destructiva, pero en unas pocas direcciones se produce una interferencia constructiva y se forman rayos difractados.

La dispersión de r-x por un átomo es la resultante de la dispersión por cada electrón. El factor de dispersión atómico,  $f$ , de un átomo es por tanto proporcional al nº de e- que posee ese átomo. La diferencia de fase en la onda generada por 2 e- origina una interferencia parcialmente destructiva; el efecto neto de interferencia entre los rayos dispersados por toda la e- en el átomo origina un descenso gradual en la intensidad dispersada al aumentar el ángulo  $2\theta$ .

La amplitud dispersada por una celda unidad se obtiene sumando la amplitud dispersada por todos los átomos en la celda unidad, de nuevo la suma debe tener en cuenta la diferencia de fase entre todas las ondas dispersadas.

#### 2.3.1.2 Aplicaciones de la difracción de rayos x.

##### - Identificación de fases.

Una fase cristalina dada siempre produce un patrón de difracción característico, bien esté en estado puro o como constituyente de una mezcla. Este hecho es la base para el uso de la difracción como método de análisis químico. El análisis cualitativo se realiza mediante la identificación del patrón de esa fase. Para la identificación cualitativa se usa la Powder Diffraction File, esta base de datos contiene datos de  $d$ -I además de información cristalográfica y bibliográfica para gran cantidad de fases.

##### - Pureza de muestras.

En una mezcla de compuestos cada fase cristalina presente va a contribuir al patrón de difracción de r-x global. En química preparativa de materiales esto puede utilizarse para identificar el grado de avance de una reacción y la pureza del producto.

La difracción de r-x también puede utilizarse para identificar impurezas, bien sean reactivos que no han reaccionado completamente o subproductos de reacción. Sin embargo, esto tiene una limitación: la impureza debe ser cristalina, además la capacidad para detectar una impureza depende de la capacidad de ésta para dispersar la radiación y eso depende de  $Z$ .

##### - Medida de tensiones.

Cuando un grano se somete a una tensión uniforme perpendicular a los planos de difracción el espaciado se hará mayor que  $d_0$  (espaciado en ausencia de tensión) y, según se deduce de

la ley de Bragg, el pico de difracción se desplaza a un ángulo más bajo. Si la tensión no es uniforme hay zonas con espaciado mayor que  $d_0$  y zonas con espaciado menor que  $d_0$  produciéndose un ensanchamiento del pico de difracción que es el resultado observado experimentalmente. En la práctica el stress se determina a partir de la posición  $2\theta$  de una única reflexión midiendo el espaciado a diferentes valores de  $\psi$  (diferentes orientaciones de la muestra).

- Análisis cuantitativo.

Los métodos de análisis cuantitativos basados en la difracción de r-x pueden clasificarse en dos grandes grupos: métodos que emplean picos seleccionados y métodos que utilizan todo el difracto grama.

- Determinación de estructuras cristalinas

El proceso de determinación de una estructura mediante drx comienza con la toma de datos con suficiente precisión en un intervalo amplio de  $2\theta$ . La siguiente etapa es el indexado, los programas más habituales para llevar a cabo el indexado son ITO, TREOR y DICVOL entre otros. La siguiente etapa, ajuste de perfil, permite asignar intensidades, forma y anchura de picos, background; existen dos técnicas diferentes: el método de Le Bail y el método de Pawley.

Una vez obtenidas las intensidades de las reflexiones es necesario obtener una aproximación inicial de la estructura, para ello se pueden emplear métodos tradicionales como los de Patterson o directos, así como métodos basados en el espacio directo. Por último, se realiza el refinamiento de la estructura utilizando el método de Rietveld en el que se minimiza la diferencia entre la intensidad calculada y la medida experimentalmente.

- Estudio de texturas.

Cada grano en un agregado policristalino normalmente tiene una orientación cristalográfica diferente de la de sus vecinos. Considerado como un todo, las orientaciones de todos los granos pueden estar aleatoriamente distribuidas o pueden tender a agruparse, en mayor o menor grado alrededor de una o varias orientaciones particulares. Cualquier agregado caracterizado por esta condición se dice que posee orientación preferente o textura. La

orientación preferente puede tener una gran influencia sobre las intensidades de los picos de difracción.

- Difracción de R-X a Temperatura variable.

La drx puede realizarse sometiendo la muestra a un programa de T controlado. De esta manera es posible realizar estudios como los siguientes.

- Seguimiento del grado de avance de una reacción química.
- Seguimiento de transiciones de fase.
- Estudio de disoluciones sólidas.
- Determinación de coeficientes de expansión térmica.
- Estudios de crecimiento de grano. (Sironvalle, 2002)

### 2.3.2 Microscopia electrónica de barrido.

El desarrollo del microscopio de barrido comenzó en 1933, cuando Manfred Von Ardenne, vio la posibilidad de construir un instrumento electrónico de Barrido que permitiera la observación de superficies sin los problemas que traía la preparación de muestras para transmisión (secciones ultrafinas).

Los Trabajos de Von Ardenne fueron truncados debido a la destrucción del microscopio durante un ataque aéreo en la Segunda Guerra Mundial. Por eso fue que recién en 1965 se produjo en Inglaterra el primer SEM comercial. (V.E. & Peter, 2021)

El microscopio electrónico de barrido, conocido por sus siglas inglesas SEM, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes. (Ipohorski & Bozzano, 2013)

## 2.4 Caracterización química.

### 2.4.1 ICP (plasma de acoplamiento inductivo).

La espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (del inglés Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) es conocida como ICP-MS. Esta técnica de análisis elemental e isotópico se ha venido imponiendo para las más diversas aplicaciones en las últimas dos décadas. Esto se debe principalmente a su capacidad de discriminar isótopos y a sus bajos límites de detección, que pueden llegar a ser inferiores a los  $10^{-6}$  mg L. Dichos límites son muchos más bajos que los de otras técnicas analíticas más convencionales. Como fluorescencia de rayos, espectrometría de emisión o absorción atómica, etc. (Heinert, Endara, & Solórzano, 2020)

Hoy en día, el ICP-MS se ha consolidado como una técnica estándar en diversos laboratorios de prestigio para análisis de control rutinarios de, por ejemplo, aguas, suelos, alimentos, muestras clínicas, y otras. Este tipo de instrumento resulta ideal para medir concentraciones de metales pesados como As, Se, Cd, Pb y Hg.

El ICP-MS se puede acoplar a distintos sistemas de introducción de muestras sólidas, líquidas o gaseosas. En este trabajo, nos restringiremos a describir los elementos esenciales de los sistemas convencionales de introducción de muestras acuosas. Cada marca y modelo de ICP-MS tiene sus particularidades; sin embargo, el principio de funcionamiento es generalmente similar al aquí expuesto. (Litter, Armienta, & Farías, 2009)

#### 2.4.1.1 Campos de aplicación

- Medio ambiente: Calidad de aguas potables, caracterización de residuos tóxicos, contaminación de aguas, control de contaminación atmosférica, caracterización de suelos, especiación de contaminantes.
- Energía: Análisis de combustibles sólidos y líquidos, análisis elemental de productos de combustión, control de empobrecimiento/enriquecimiento isotópico, control de impurezas en combustibles nucleares.
- Química: Caracterización de materias primas, control de calidad de productos terminados, química fina, pureza de productos de alto valor añadido.

- Geología: Medidas cuantitativas y semicuantitativas, análisis de lantánidos y actínidos, mapas de distribución superficial, relaciones isotópicas, caracterización de rocas, minerales y sedimentos.
- Electrónica: Pureza de materiales semiconductores, defectos en cerámicas, dopantes en superconductores, trazas y ultra trazas en reactivos, control de calidad en materiales para dopado, RoHS/WEEE para Pb, Cd, Cr y Hg.
- Biomedicina: Estudios con trazadores isotópicos, especiación bioinorgánica, trazas y ultra trazas en tejidos y fluidos biológicos.
- Arte y Arqueometría: Caracterización por determinaciones isotópicas, análisis inorgánico de pigmentos, bases y materias primas, análisis de bronce, metales y aleaciones, caracterización de cerámicas por análisis de ultra trazas, autenticación de piezas de arte.
- Ciencia y tecnología de alimentos: Control de materias primas, contaminación y control de toxicidad, migración elemental desde envases, control de calidad de productos manufacturados. (Universidad de Burgos, 2022)

## Capítulo III Aplicación Experimental y Resultados.

### 3.1 Muestreo

Los minerales de dolomita y bentonita utilizados en el desarrollo de este trabajo fueron extraídos propiamente de la comunidad de Santa Rosalía, predio “El recreo” municipio de Agua Blanca, Hgo, para el caso de la bentonita; y la comunidad Cerro Colorado municipio Atotonilco el Grande Hgo, para la dolomita, de la cantera se extrajeron cinco muestras de cada mineral, aproximadamente de 1.5 Kg cada una, utilizando un muestreo de tipo canal (dimensiones 2m\*30cm). Después estas muestras fueron mezcladas para homogenizarlas y de esta manera tener un material representativo de la zona.

### 3.2 Caracterización Física.

Las técnicas utilizadas en esta sección tienen como objetivo medir las propiedades del material, abrasividad, porcentaje de absorción y tamaño de partículas entre otras; pues de

acuerdo con estas propiedades se determinan los posibles usos del mineral grueso. Los resultados obtenidos en ambos minerales representan una base de conocimientos de los cuales se pueden basar la determinación de algunos procesos que pudieran ser aplicados a cada uno de estos, ya sea como la forma de beneficio, lavado, calcinación, trituración, molienda, sincronizado, cribado, etc.

### 3.2.1 Granulometría.

El análisis granulométrico para la muestra de Bentonita y Dolomita se llevó a cabo mediante la medición de tamaño de partícula, utilizando un juego de tamices U.S. Estándar Testing Sieve No. 80, 100, 200, 220, 325, 400 y -400 (Figura 17); tamizándose para cada mineral una muestra de 50 a 100 g los resultados obtenidos de cada mineral por malla utilizada se presentan en las tablas 12 y 13.



*figura 17 juego de tamices U.S. Estándar Testing Sieve*

### 3.2.1.1 Bentonita.

Tabla 12 Análisis granulométrico de bentonita.

<b>Malla</b>	<b>% en peso retenido</b>
80	0
100	2
200	12
220	45
325	27
400	7
-400	7

### 3.2.1.2 Dolomita.

Tabla 3 Análisis granulométrico de Dolomita

<b>Malla</b>	<b>% en peso retenido</b>
80	0
100	5
200	9
220	40
325	30
400	9
-400	7

La obtención de la granulometría es muy importante cuando de minerales se trata ya que esta es la base para conocer y determinar de qué forma, con que equipos, con cuanta energía, entre otros parámetros pueden ser aplicados a estos materiales; de esta forma se han obtenido estos resultados para cada uno de los materiales que se han analizado. De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 11 y 12 para cada mineral correspondiente se puede observar que el mayor porcentaje en peso retenido se obtuvo propiamente en la malla #220

### 3.2.2 Absorción de aceite.

Esta prueba se realizó únicamente en el mineral de Bentonita. Para la realización de esta prueba se realizó la metodología ya escrita anteriormente la cual consistió en el pesado 5 g de muestra, con una sensibilidad de 0.001, y se colocó en una lata de acero impermeable, lo



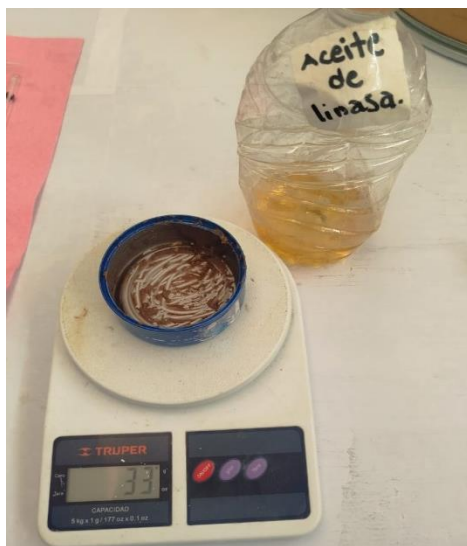
suficientemente grande para evitar pérdidas de material. A continuación, se agregó aceite de linaza gota a gota y se batió al mismo tiempo hasta que se obtuvo una pasta dura y manejable, que no se rompiera (figura 18); se dejó reposar un día para estar seguros de no haber sobre saturado la muestra (figura19), una vez que se observó que no estaba sobre saturada la muestra se procedió a pesar el recipiente con el aceite una vez más (figura 20).



*figura 18 pasta de bentonita resultado con la mezcla de aceite de linaza*



*figura 19 muestra de bentonita sin sobre saturar de aceite de linaza*



*figura 20 muestra de bentonita pesada con el aceite de linaza*

Una vez teniendo el material con el aceite pesado se procedió a seguir la siguiente formula *Absorción de aceite*:  $\left(\frac{\text{Peso inicial aceite}-\text{Peso final aceite}}{\text{Peso de la muestra}}\right) * 100$ ; para obtener los resultados que se observan en la tabla 14

$$\text{Absorción de aceite: } \left(\frac{29g - 33}{5gr}\right) * 100$$

Tabla 14 Absorción de aceite de la Bentonita

<b>Muestra</b>	<b>% de absorción</b>
<b>Bentonita</b>	<b>80%</b>

### 3.2.3 Prueba de desgaste de los Ángeles

Esta prueba se realizó únicamente en el material de dolomita. Esta prueba consiste en determinar la resistencia a la trituración o abrasión de los materiales pétreos utilizados en la mezcla asfálticas. Para determinar la resistencia se hace actuar una carga abrasiva sobre la muestra del material a utilizar. Las cargas abrasivas las proporciona unas esferas metálicas estandarizadas que al actuar con la muestra de material dentro de la máquina de los ángeles alteran su composición granulométrica triturando el material, como resultado se obtendrá una pérdida de material con respecto a su masa inicial que determinará la calidad del mismo ante el desgaste o la abrasión. Las siguientes pruebas determinan las propiedades físicas necesarias como agregado pétreo y fino utilizable en diferentes etapas de la construcción, así como sus características químicas y mineralógicas. En las siguientes tablas 15,16,17 y 18 se observan los resultados obtenidos de esta prueba.

Tabla 15 informe de calidad de grava

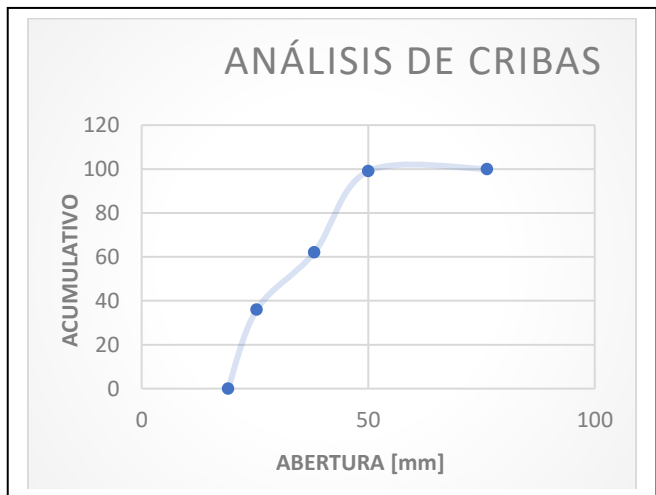
<b>INFORME DE CALIDAD DE GRAVA</b>
TIPO DE MATERIAL: (DOLOMITA)

**COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA**

PRUEBAS FISICAS	NORMA MEXICANA VIGENTE UTILIZADA	RESULTADOS ARENA	LIMITES ESPECIFICADOS
MASA ESPECIFICA (MES55) (kg/m <sup>3</sup> )	NMX-C-164	2.60	
ABSORCIÓN (%)	NMX-C-164	1.55	
MASA VOLUMETRICA SUELTA (kg/m <sup>3</sup> )	NMX-C-073	1220	
MASA VOLUMETRICA VARILLADA (kg/m <sup>3</sup> )	NMX-C-073	1605	
PERDIDA POR LAVADO CRIBA No. 200(%)	NMX-C-084	9.90	% MAX.
ABRASIÓN LOS ÁNGELES (%)	NMX-C-196 ONNCCE	16.10	% MAX.
COEFICIENTE VOLÚMETRICO (%)	AFCR	0.17	% MIN.
SANIDAD POR SULFATO DE SODIO (%)	NMX-C-075 ONNCCE	4.00	% MIN.
PARTÍCULAS LIGERAS (%)	NMX-C-072 ONNCCE	0.0	% MAX.
PARTÍCULAS DEZLENABLES (%)	NMX-C-071 ONNCCE	0.0	% MAX.

**NMX-C-077 ONNCCE EN VIGOR**

CRIBA	% RETENIDOS LIMITES		MATERIAL % PASA
	MAX.	MIN.	
3	0	0	-----
2	0	0	-----
1 ½	0	0	-----
1	0	0	-----
¾	10	0	0.0
½	-	-	36
3/8	80	45	62
No. 4	100	90	99
No. 8	100	95	100
CAROLA	100	100	
M.F.			



LÍMITE DE CONSISTENCIA
LÍMITE LÍQUIDO (S.C.T.)
LÍMITE PLÁSTICO (S.C.T.)
ÍNDICE PLÁSTICO (S.C.T.)
CONTRACCIÓN LINEAL (S.C.T.) (%)

LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOLO AFECTAN A LA MUESTRA ENSAYADA.  
OBSERVACIONES: ESTE MATERIAL CUMPLE COMO AGREGADO PARA CONSTRUCCION

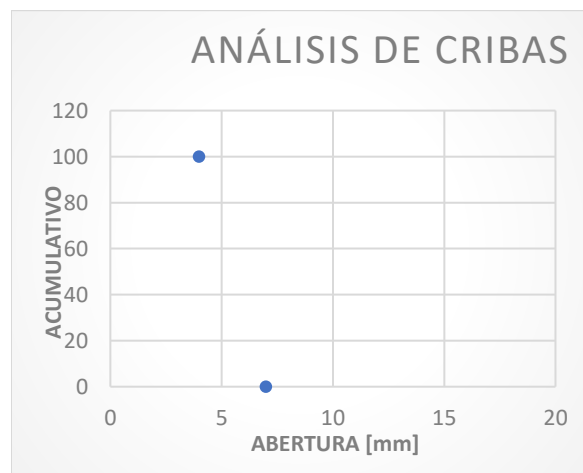
Tabla 16 informe de calidad de agregado para concreto asfaltico

**INFORME DE CALIDAD DE AGREGADO PARA CONCRETO ASFALTICO**

TIPO DE MATERIAL: (DOLOMITA) PARA UTILIZARSE EN: AGREGADO PETREO			
<b>PRUEBAS FISICAS</b>	<b>NORMA MEXICANA VIGENTE UTILIZADA</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>LIMITES ESPECIFICADOS</b>
MASA ESPECIFICA SECA	NMX-C-164	2.60	2.4
ABSORCIÓN (%)	NMX-C-164	1.55	----
MASA VOLUMETRICA SUELTA (kg/m <sup>3</sup> )	NMX-C-073	1220	----
PARTICULAS ALARGADAS (%)	ASTM -D-4791	16.00	35.0 % MAX.
PARTICULAS LAJEADAS (%)	ASTM -D-4791	16.5	35.0 % MAX.
ABRASIÓN LOS ÁNGELES (%)	NMX-C-196	22.52	40.0 % MAX.
EQUIVALENTE DE ARENA (%)	AASTHO-T-175	-	-
SANIDAD POR SULFATO DE SODIO (%)	NMX-C-075 ONNCCE	4.00	12% MIN.
CONTRACCION LINEAL (%)	-	0	-
DESPRENDIMIENTO POR FICCION (%)	-	0	25.0 % MAX.

**COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA  
NMX-C-77 ONNCCE EN VIGOR**

% QUE PASA			
CRIBA	MIN.	MAX.	RESULTADOS OBTENIDOS
1"			
¾"			
½"	100		
3/8"	95.0	100.0	100.00
¼"			
No. 4			
No. 8	0.0	5.0	1.0
No. 10			
No. 16			
No. 20			
No. 40			
No. 50			
No. 60			
No. 80			
No. 100			
No. 200			



LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOLO AFECTAN A LA MUESTRA ENSAYADA.  
OBSERVACIONES: MATERIAL QUE CUMPLE ESPECIFICACIONES COMO SELLO 3 A

Tabla 17 informe de calidad de agregado para concreto asfáltico

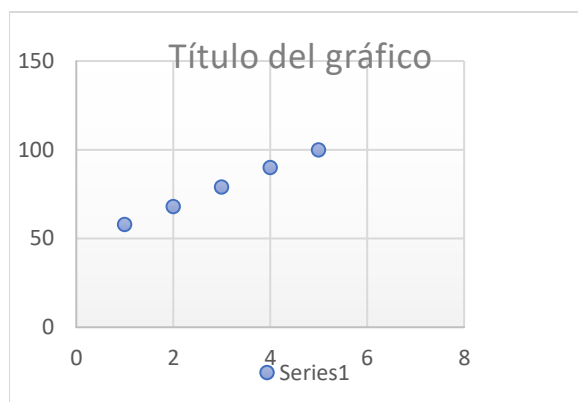
INFORME DE CALIDAD DE AGREGADO PARA CONCRETO ASFALTICO			
TIPO DE MATERIAL: (DOLOMITA)		PARA UTILIZARSE EN: AGREGADO PETREO	
PRUEBAS FISICAS	NORMA MEXICANA VIGENTE UTILIZADA	RESULTADOS OBTENIDOS	LIMITES ESPECIFICADOS
MASA ESPECIFICA SECA	NMX-C-164	2.60	2.4
ABSORCIÓN (%)	NMX-C-164	1.55	----
MASA VOLUMETRICA SUELTA (kg/m <sup>3</sup> )	NMX-C-073	1220	----
PARTICULAS ALARGADAS(%)	ASTM -D-4791	16.10	35.0 % MAX.
PARTÍCULAS LAJEADAS (%)	ASTM -D-4791	16.50	35.0 % MAX.
ABRASIÓN LOS ÁNGELES (%)	NMX-C-196	16.10	40.0 % MAX.
EQUVALENTE DE ARENA (%)	AASTHO-T-175	-	-
SANIDAD POR SULFATO DE SODIO (%)	NMX-C-075 ONNCCE	4.00	12% MIN.
CONTRACCION LINEAL (%)	-	0	-
DESPRENDIMIENTO POR FICCION (%)	-	0	25.0 % MAX.

**COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA  
NMX-C-77 ONNCCE EN VIGOR**

% QUE PASA
------------

**COMPOSICIÓN GRANULOMETRICA  
NMX-C-77 ONNCCE EN VIGOR**

CRIBA	MIN.	MAX.	RESULTADOS OBTENIDOS
1"	100.00	100.00	
¾"	88.0	100.00	100.0
½"	73.00	100.00	90.00
3/8"	95.0	100.0	79.00
¼"		80.00	68.00
No. 4		68.00	58.00
No. 8	0.0		
No. 10		48.00	
No. 16			
No. 20		34.00	
No. 40		23.00	
No. 50			
No. 60		18.00	
No. 80			
No. 100		13.00	
No. 200		10.00	



LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOLO AFECTAN A LA MUESTRA ENSAYADA.  
OBSERVACIONES: ESTA GRAFICA CORRESPONDE A LA UTILIZACIÓN DE 42% DE GRAVA

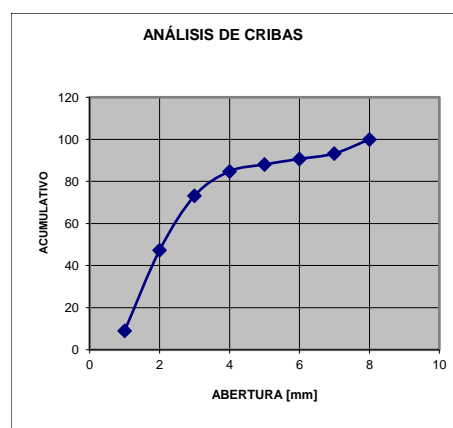
Tabla 18 informe de calidad de agregado para concreto asfaltico

<b>INFORME DE CALIDAD DE AGREGADO PARA CONCRETO ASFALTICO</b>
TIPO DE MATERIAL: ( DOLOMITA ) PARA UTILIZARSE EN: AGREGADO PETREO

PRUEBAS FISICAS	NORMA MEXICANA VIGENTE UTILIZADA	RESULTADOS ARENA	LIMITES ESPECIFICADOS
MASA ESPECIFICA (MES55) (kg/m <sup>3</sup> )	NMX-C-164	2.60	
ABSORCIÓN (%)	NMX-C-164	4.00	
MASA VOLUMETRICA SUELTA (kg/m <sup>3</sup> )	NMX-C-073	1240	
MASA VOLUMETRICA VARILLADA (kg/m <sup>3</sup> )	NMX-C-073	1605	
PERDIDA POR LAVADO CRIBA No. 200(%)	NMX-C-084	4.00	% MAX.
ARCILLA POR SEDIMENTACION (%)	SRH	0.20	% MAX.
MATERIA ORGANICA (%)	NMX-C-058-ONNCCE	0.00	% MAX.
PARTICULAS DEZLENABLES (%)	NMX-C-071 ONNCCE	0.0	% MAX.
PARTÍCULAS LIGERAS (%)	NMX-C-072 ONNCCE	0.0	% MAX.
ABRASIÓN LOS ÁNGELES (%)	NMX-C-196 ONNCCE	16.10	% MAX.

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA  
NMX-C-077 ONNCCE EN VIGOR

CRIBA	% RETENIDOS % PASA		MATERIAL	
	LIMITES		RET.	ACUM.
	MAX.	MIN.		
No. 4	5	0	0	9
No. 8	20	0	47.3	47.3
No. 16	50	15	25.9	73.2
No. 3	75	40	11.6	84.8
No. 50	90	70	3.3	88.1
No. 100	98	90	2.5	90.7
No. 200	---	---	5.9	96.6
CAROLA	100	100	3.4	100
M.F.				3.90



LÍMITE DE CONSISTENCIA	
LÍMITE LÍQUIDO (S.C.T.)	19.0
LÍMITE PLÁSTICO (S.C.T.)	18.5
INDICE PLÁSTICO (S.C.T.)	0.5
CONTRACCIÓN LINEAL (S.C.T.) (%)	0.0

LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOLO AFECTAN A LA MUESTRA ENSAYADA.

OBSERVACIONES: ESTE MATERIAL ARROJA RESULTADOS CON MODULO DE FINURA FUERA DE LOS LIMITES, DEBIDO AL TITPO DE TRITURACION EN EL LABORATORIO POR LO QUE EN LA PRODUCCION SE OBTENDRA MEJOR CURVA GRANULOMETRICA.

La muestra corresponde a una dolomita de color grisácea, de la cual se obtuvo grava de  $\frac{3}{4}$  a criba No. 4 y arena para su análisis. La muestra se trituro; en una trituradora de quijada que da un producto lajeado, que es el más desfavorable para la evaluación de la resistencia a la abrasión y los resultados en partículas lajeadas y alargadas son mayores que cuando se usa una quebradora de impacto.

De acuerdo a lo que mayor se usa tanto en la elaboración de concreto para construcción y asfalto se decidió elaborar una granulometría para una grava de  $\frac{3}{4}$  a la No. 8 y así evaluaría a la abrasión por desgaste de los Ángeles y obtener las propiedades más importantes y más representativas. En la determinación de las propiedades físicas de la roca se llevaron a cabo los procedimientos de la prueba establecidas en las normas oficiales mexicanas que rigen actualmente y que son necesarias para formar un criterio adecuado en la obtención de cada uno de los resultados encontrados. Los resultados encontrados en cada prueba nos permiten establecer en que parámetros se encuentra la roca y determinar que usos se les pueden dar, escogimos las pruebas índices, las que establecen de una forma más drástica la calidad del material.

Los registros granulométricos no se incluyen ya que se cumplen de acuerdo con la trituración, separación de tamaños del material, lavado con agua y otro tratamiento de acuerdo a como se presenta cada requisito y cada material que se desee producir.

Es necesario establecer que todo material necesita de un tratamiento y de acuerdo a la calidad con que se le de este tratamiento, es el producto que se obtiene; aunque en la tabla que se presenta se incluyen los resultados de la arena triturada, en el informe de calidad el resultado es de una arena gruesa que su uso resulta como un agregado indispensable en la elaboración de concreto asfáltico y dependiendo del tipo de trituradora que se tenga en la planta se podrá utilizar como agregado para concreto de bajas resistencias, así como su uso para agregado para la fabricación de cemento. Las tablas de resumen de las pruebas que se le hicieron al material presentadas anteriormente se encuentran acompañadas de las principales especificaciones que manejan tanto la SCT, así como las especificaciones de materiales usados en la fabricación de concreto hidráulico de acuerdo a las normas (NMX-C-111; especificaciones generales de Agregados Pétreos para Elaborar Concretos Hidráulicos). Para los diferentes usos que pueda tener su material.

### 3.3 Caracterización mineralógica.

De los análisis que se han aplicado a los materiales, la caracterización mineralógica es de las más importantes ya que se determinaron la cantidad de especies minerales contiene las muestras de mineral tanto de la bentonita como el de la dolomita, de igual forma se pudo determinar y conocer la calidad de estos materiales en base a los contenidos que determinan su pureza, su eficiencia y eficacia a la hora de ser utilizados. Para conocer las principales especies minerales se llevó a cabo análisis mediante difracción de Rayos-X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

#### 3.3.1 Difracción de rayos X.

El análisis realizado a la bentonita dio como resultado tres clases minerales presentes los cuales fueron Aluminosilicato de sodio hidratado conocido como Gmelnita, de igual forma el difractómetro arrojó un mineral de tipo Aluminosilicato de sodio hidratado y por último se detectó una clase mineral de tipo Paragonita (Figura 21).

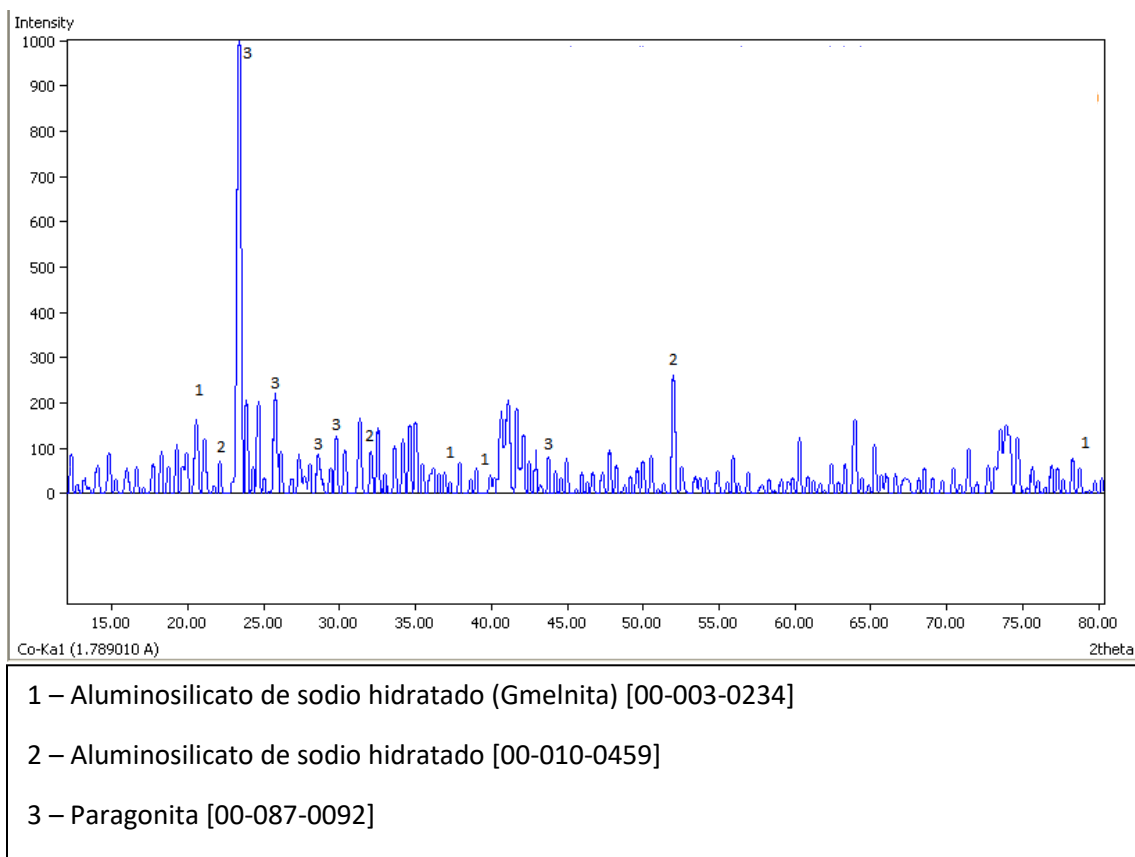


Figura 21 Difracto grama de Bentonita

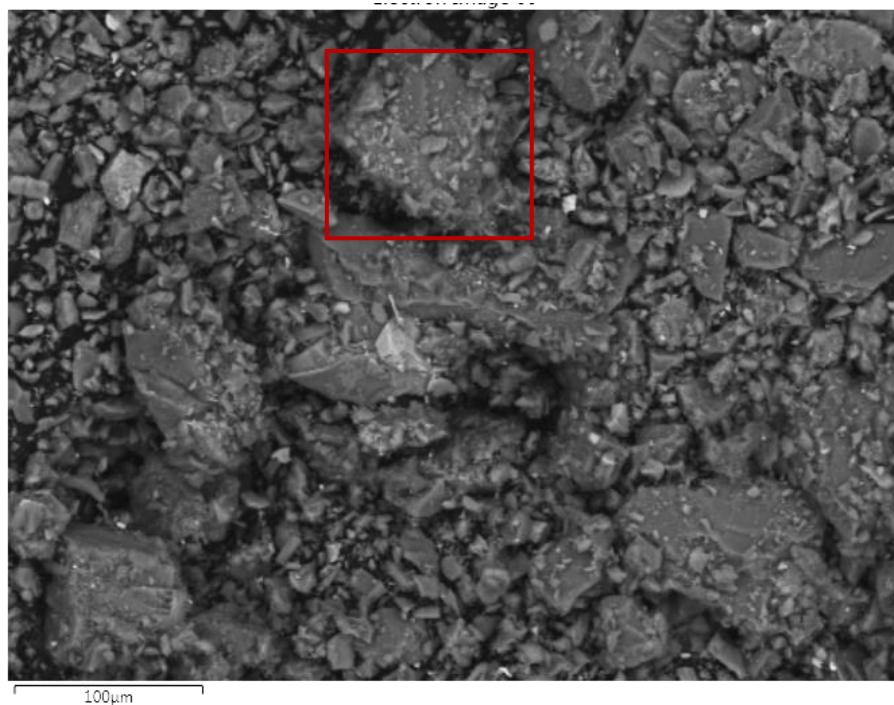


### 3.3.2 Microscopia electrónica de barrido.

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

#### 3.3.2.1 Bentonita

En la figura 22 se observa la micrografía de una bentonita en la cual se observan agregados con formas euhedrales o idiomorfos con límites rectilíneos que corresponden a caras del cristal, presentando un hábito de cristales granulares y laminares, con fracturas irregulares, lo que nos indica la presencia de calcita, por otra parte se observan cristales individuales con hábitos aciculares propios a minerales de silicio; Así mismo se observan cristales con hábitos tubulares o prismáticos lo que nos indica la presencia de aluminio



*figura 22 Microfotografía de bentonita*

En la figura 23 se observa una Grafica de contenidos por elemento en Bentonita. Donde se puede observar un alto contenido de sílice y aluminio, y en la tabla 18 podemos observar estos minerales en porcentaje de peso lo cuales corresponden al porcentaje mayor.

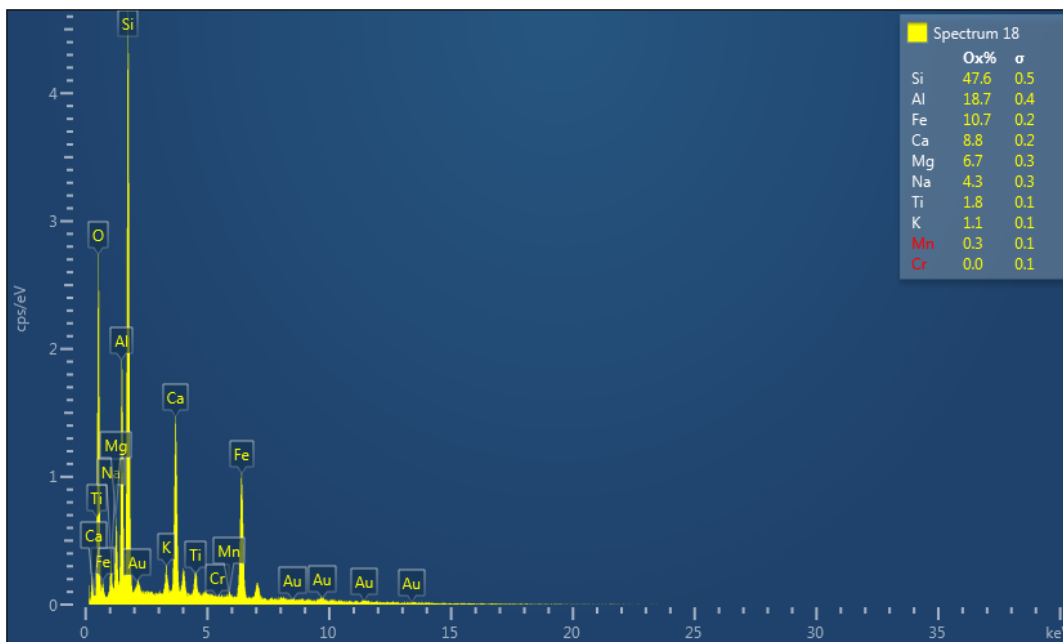


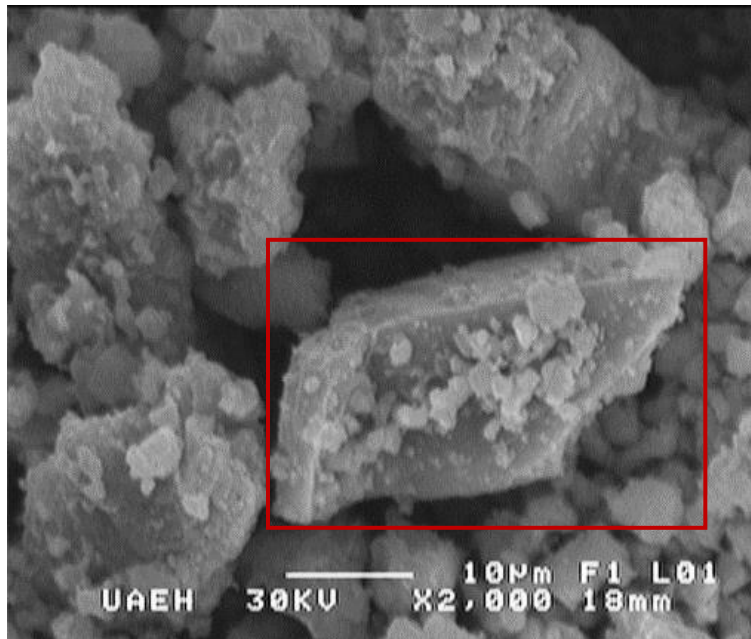
figura 23 Grafica de contenidos por elemento en Bentonita.

Tabla 19 Elementos en Bentonita en función en el porcentaje de su peso.

Element	Wt%
O	43.79
Na	3.15
Mg	4.05
Al	9.88
Si	22.25
K	0.92
Ca	6.32
Ti	1.09
Cr	0.00
Mn	0.25
Fe	8.29
Total:	100.00

### 3.3.2.2 Dolomita

En la figura 24 correspondiente a la microfografía de una dolomita se observan que las partículas cambian completamente su morfología a una forma euhedral o idiomorfa ya que tiene límites rectilíneos bien definidos que corresponden a carbonato de calcio y magnesio, las cuales presentan un hábito granular agregadas a la matriz con tamaños aproximados de 10 micras, tal cual se esperaba, se encuentran diversos tamaños de partículas lo que enfatiza aún más la diferencia en tamaños con cristales individuales con un hábito laminar y de maclas de la misma matriz con tamaños entre 3 a 5 micras.



*figura 23 Microfotografía de Dolomita*

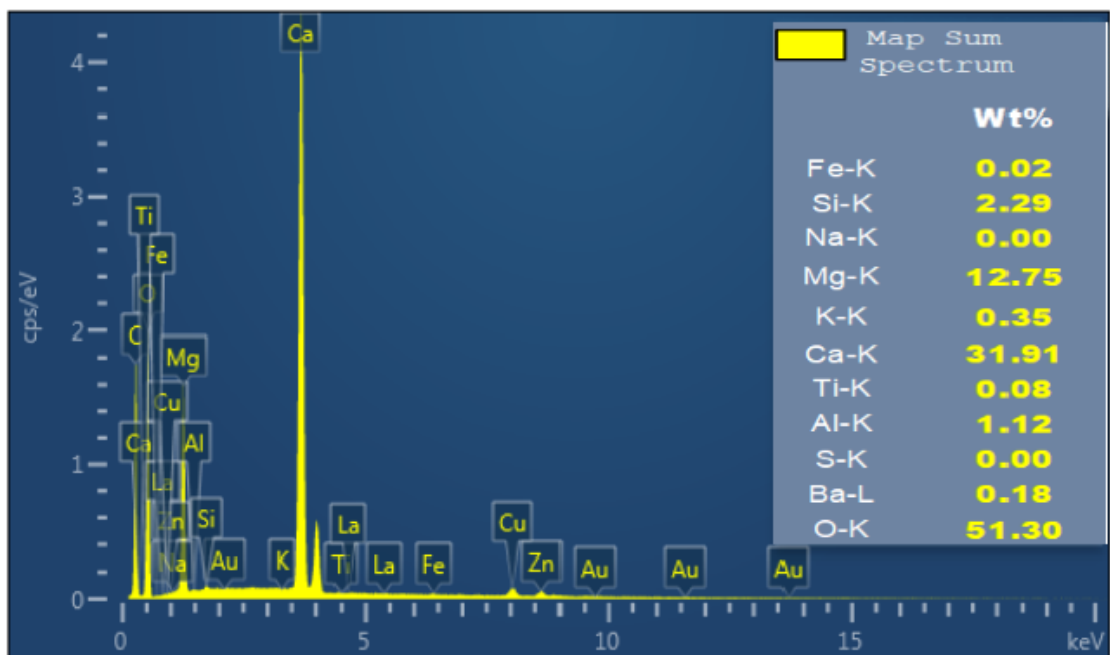


figura 24 Grafica de contenidos por elemento de Dolomita.

### 3.4 Caracterización química.

El objetivo de este análisis fue encontrar de manera más cuantitativa la cantidad de algunos elementos que se lograron identificar anteriormente con los análisis de microscopia electrónica de barrido y la difracción de rayos X.

#### 3.4.1 ICP (plasma de acoplamiento inductivo).

#### Dolomita

La tabla 20 muestra la composición química de la dolomita de esta región, la cual no ha sido aún comercializada a pesar de estar ya explotado el mineral.

Tabla 20 . Composición química promedio de la Dolomita.

MUESTRA	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Dolomita	3.64	62.03	0.64	0.00	0.00	32.67	0.54	0.48

## *Capitulo IV Conclusiones*

1. La muestra de dolomita caracterizadas por ICP, presentan una concentración de calcio por arriba del 60% y una concentración por arriba 30% de magnesio lo que es deseable para muchas de sus aplicaciones como en la industria siderúrgica para ampliar el periodo de vida de las cubiertas refractarias, en la agricultura para la corrección de pH de suelos ácidos y para uso de fertilizantes etc.
2. En la prueba de Resistencia a la abrasión realizada propiamente a la dolomita dio valores positivos para poder ser utilizada agregado para la construcción, ya que tenemos una arena gruesa que su uso resulta como un agregado indispensable en la elaboración de concreto asfáltico y dependiendo del tipo de trituradora que se tenga en la planta se podrá utilizar como agregado para concreto de bajas resistencias, así como su uso para agregado para la fabricación de cemento; para material que cumple especificaciones como sello 3 A.
3. Tras aplicar un proceso de purificación se podría utilizar en la fabricación de alimentos balanceados o como enriquecedor de alimentos aptos para humanos o la industria del vidrio
4. Las especies minerales identificadas por rayos X para la bentonita son, Aluminosilicato de sodio hidratado (Gmelnita), Aluminosilicato de sodio hidratado, Paragonita. esta técnica no detectó la presencia de ningún mineral extraño.
5. En las pruebas realizadas por microscopía electrónica de barrido, se observa una bentonita poco contaminada con presencia de calcio por lo que se puede constatar que corresponde a una bentonita cálcica, la cual puede tener aplicaciones en la industria alimenticia como refinación de azúcar o clarificación de jugos o vinos, en la industria cerámica para elaboración de algunas pastas, en

el ámbito de la construcción para plastificantes en concretos o selladores y en la industria de la limpieza como aditivos para jabones.

6. Las variaciones en la composición química obtenida por las distintas técnicas de caracterización, se deben principalmente a la exactitud de los equipos y la manera en que estos interactúan con la muestra para realizar la medición.

## Referencias

- Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. (S.f). *Minerales Carbonatados*. Universidad Politécnica de Valencia , Valencia.
- Aguinaco, H. M. (2009). *Petrología y diagénesis de las dolomías con alta porosidad de la sonda de Campeche*. Tesis de Maestría , Universidad Autónoma de México, Ciencia de la Tierra , México.
- Al-Ani, T., & Sarapää, O. (2008). CLAY AND CLAY MINERALOGY. *ResearchGate*.
- Alfonso, R. B., Silvana, F. C., & Walter, A. (2014). Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 85.
- BELLO, J. P., & BALMASEDA, J. R. (1996). *Caracterización y estudio reológico de una bentonita colombiana*. Bello, J. y Balmaseda, JR (1996). Caracterización y estudio reológico de una bentonita colombiana. *Boletín De La Sociedad Española De Cerámica Y Vidrio*, 35.
- CAÑAS, J. S. (2017). *ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS POR TAMIZADO EN AGREGADO FINO Y GRUESO Y DETERMINACIÓN DE MATERIAL MÁS FINO QUE EL TAMIZ No. 200 (75 µm) EN AGREGADO MINERAL POR LAVADO*. UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA, Departamento de Mecánica Estructural, San Salvador. Recuperado el 19 de octubre de 2024, de <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRI A.pdf>
- Castillo, M. H. ( S.f). *Diseño y Construcción de Máquina de los Angeles*.
- CASTRO, D. P., & CORAL, K. M. (2013). *Caracterización y activación química de arcilla tipo bentonita para su evaluación en la efectividad de remoción de fenoles presentes en aguas residuales*. Universidad Tecnológica de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado el 21 de Octubre de 2024
- Chávez, S. L. (2009). *Tratamiento de remediación de efluentes metalúrgicos con énfasis en el abatimiento de cobre con dolomita*. tesis, UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS , lima.
- Coordinación General de Minería. (2022). *Perfil del Mercado de la Dolomita*. Dirección General del Desarrollo Minero, México.
- Duran, J. L. (S.f). Geología Bentonitas. Recuperado el 25 de Octubre de 2024, de [https://www.academia.edu/26883508/GEOLOGIA\\_BENTONITAS](https://www.academia.edu/26883508/GEOLOGIA_BENTONITAS)
- Eisenhour, D. D., & Brown, R. K. (2009). Bentonite and Its Impact on Modern Life. *Elements an international magazine*, 83-88.
- Garcés, I. (2007). Bentonita. *MINERALES INDUSTRIALES, Todo lo que mires está compuesto de ello*.

- Grim, R. E. (2009). *Clay Mineralogy*. En R. E. Grim. McGraw-Hill.
- Guerra, C. P. (2017). *Síntesis y reactividad de minerales del grupo de la dolomita y fases analoga*. Tesis doctoral, Madrid.
- Heinert, M. E., Endara, A. d., & Solórzano, H. X. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *recimundo*, 4-12.
- Hevia, R. (2008). *Ceramica y Cristal*. Recuperado el 15 de octubre de 2024, de <https://www.ceramicaycristal.com/cc140pdf/materiasprimas140.pdf>
- Ipohorski, M., & Bozzano, P. B. (2013). MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO EN LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES. *Ciencia e Investigación*, 63(3), 43-53.
- Klein, C., & Hurlbut, C. S. (2018). *Manual de Mineralogía Vol. 1*. Barcelona: REVERTÉ.
- Litter, M., Armienta, M., & Farías, S. (2009). Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos. *IBEROARSEN*. doi:ISBN: 978-84-96023-71-0
- M, A.-A., W, C., & N., H. M. (2009). La Dolomía: Aspectos de un mineral desconcertante. *schlumberger*, 3, 35-45.
- Omassi, L. A., Morales, A. V., & Ramírez, M. A. (S.f). *Manual de identificación de minerales con modelos 3D y realidad aumentada*. Mexico: Universidad Nacional Autonoma del Mexico.
- ORTEGA, S. N. (2012). *CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE LAS ESCOMBRERAS DE LA REGIÓN FRANCISCO I. MADERO, ESTADO DE HIDALGO*. Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo , Pachuca.
- Outlet Minero. (2023). Obtenido de <https://outletminero.org/los-minerales-no-metalicos/>
- PAUL, E., & PARI, A. (12 de Noviembre de 2012). Tipos de Muestreo en Mina.
- Robledo, J. G. (2015). *Condiciones para el empleo de bentonita en un fluido de perforación base agua de mar en función del comportamiento hidráulico*. universidad nacional autónoma de méxico, facultad de ingeniería.
- Secretaria de Economía. (2022). *Gobierno de Mexico*. (Unidad de Coordinación de Actividades Extractivas) Recuperado el 17 de Octubre de 2024
- Servicio Geológico Mexicano. (2021).
- Servicio Geologico Minero Argentino. (2007). Bentonitas Propiedades y Usos Industriales. *Instituto Nacional de Tecnologia Industrial*.
- Sironvalle, M. A. (2002). *Introduccion al Muestreo Minero*. santiago, Chile.



- Toja, R. J. (2016). *Propiedades de una bentonita industrial nacional y su caracterización estructural basada en absorción y difracción de rayos X (XANES y DRX)*. Tesis, Universidad Autónoma de la Plata, Departamento de Química, Buenos Aires.
- Universidad de Burgos. (11 de Marzo de 2022). *Regional University Network*. Obtenido de <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms>
- Universidad de Sonora. (S.f). Técnica de Muestreo.
- V.E., C., & Peter, H. (2021). Random recollections of the early days. *ResearchGate*.
- Waldo, M. C. (1967). *Proyecto de planta de procesamiento de bentonita para usos en lodos de perforación de pozos de petróleo*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad del Petróleo.
- Lozano Violante, M. and Santiago Carreto, R. (2011). CONTROL DE CALIDAD DE ADITIVOS EMPLEADOS EN LA PREPARACIÓN DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN. Licenciatura. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Poza Rica - Tuxpan.
- Acofarma Distribución, S. A., (2016). Ficha de información Técnica Bentonita.
- Carmichael, S. (2006). FORMACIÓN DE LA DOLOMITA DE REEMPLAZO POR INFILTRACIÓN DEL EFLUENTE DIFUSA: LATEMAR CARBONATE BUILDUP, DOLOMITES, NORTE DE ITALIA. Doctorado. Universidad Johns Hopkins
- Van Lith, Y. (2001). El papel del reductor de sulfato de bacterias en la formación de Dolomita. Doctorado. Universidad de Utrecht (Países Bajos).
- Martínez Ibarra, R. (2009). *Dolomitización y generación de porosidad vugular en la brecha K/T del Campo Cantarell, Zona Marina-Campeche*. Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Christidis, G. E., & Huff, W. D. (2009). Aspectos geológicos y Génesis de las Bentonitas. *Elements An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry and Petrology*, 5, 93-98. doi:DOI: 10.2113/gselements.5.2.93