

REPOSITORIO ACADÉMICO DIGITAL INSTITUCIONAL

“ANÁLISIS DE LA ADICIÓN EN SÓLIDO DEL CaCl_2 EN EL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE UNA MATRIZ DE BETONITA Y DE SU EFICIENCIA COMO DESECANTE”

Autor: Leonardo Cervantes Segura

Tesis presentada para obtener el título de:
Ingeniero Industrial en Procesos y Servicios

Nombre del asesor:
D. en Cs Erick Magaña Ruíz

Este documento está disponible para su consulta en el Repositorio Académico Digital Institucional de la Universidad Vasco de Quiroga, cuyo objetivo es integrar, organizar, almacenar, preservar y difundir en formato digital la producción intelectual resultante de la actividad académica, científica e investigadora de los diferentes campus de la universidad, para beneficio de la comunidad universitaria.

Esta iniciativa está a cargo del Centro de Información y Documentación “Dr. Silvio Zavala” que lleva adelante las tareas de gestión y coordinación para la concreción de los objetivos planteados.

Esta Tesis se publica bajo licencia Creative Commons de tipo “Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada”, se permite su consulta siempre y cuando se mantenga el reconocimiento de sus autores, no se haga uso comercial de las obras derivadas.





**UNIVERSIDAD
VASCO DE QUIROGA**

UNIVERSIDAD VASCO DE QUIROGA
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL EN PROCESOS Y
SERVICIOS

ANÁLISIS DE LA ADICIÓN EN SÓLIDO DEL
CaCl₂ EN EL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE
UNA MATRIZ DE BENTONITA Y DE SU
EFICIENCIA COMO DESECANTE

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL EN PROCESOS Y SERVICIOS

PRESENTA

Leonardo Cervantes Segura

ASESOR

D. en Cs. Erick Magaña Ruíz

CLAVE: 16PSU0050V

ACUERDO: LIC1004412

Morelia, Michoacán, julio de 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Vasco de Quiroga por haberme permitido concluir mis estudios y por haberme formado estos años.

Agradezco a mi esposa Vanessa y a mi hijo Mateo por ser mi motor y darme el valor para ir siempre por más.

Agradezco a mis padres Melania y Leonardo porque se han encargado de brindarme una educación de calidad toda la vida y me han apoyado incondicionalmente en todo lo que me propongo.

Agradezco a mis hermanos Melania y Diego por su apoyo, paciencia y cariño.

Agradezco a mi asesor Erick Magaña Ruíz por su paciencia, compromiso y dedicación para la elaboración de la presente investigación.

Agradezco a mi asesor Enrique Corona por compartirme su visión empresarial y ser una persona esencial para este proyecto.

Agradezco a Christian Rodríguez por ser un gran amigo y compañero que ha sido un gran apoyo estos años.

Agradezco a mis profesores por haberme compartido sus conocimientos y experiencias. Agradezco especialmente al Ingeniero Miguel Heredia que desde el momento en que decidí entrar a la universidad ha estado presente y mi último año en la Universidad lo he concluido gracias a él.

Agradezco a mi familia por siempre estar al pendiente de mí y apoyarme en todo lo que pueden.

CONTENIDO

ABREVIATURAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	14
RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	16
CAPÍTULO I. MARCO METODOLÓGICO.....	17
1.1. Introducción.....	17
1.2. Justificación	21
1.3. Pregunta de investigación.....	25
1.4. Hipótesis	25
1.5. Objetivo general	25
1.5.1. Objetivos específicos.....	26
1.6. Alcances y limitaciones.....	26
CAPÍTULO II. MARCO CONTEXTUAL	27
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	31
3.1. Desecantes.....	31
3.1.1. Montmorillonita	31
3.1.2. Silica gel ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	34
3.2. Proceso.....	37
3.3. Control de calidad.....	40
CAPÍTULO IV. MARCO REFERENCIAL	49
CAPÍTULO V. MARCO PROCEDIMENTAL	83
5.1. Variables del estudio.....	83
5.2. La muestra.....	83
5.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	83
5.4. Sistematización de datos	87
5.5. Discusión	97
5.6. Conclusiones y perspectivas	104
LITERATURA CITADA	106

ABREVIATURAS

CIDAM	(Centro de Innovación y Desarrollo Agroalimentario de Michoacán)
BET	Brunauer Emmett-Teller
H.R.	Humedad relativa
DWB	Base en peso seco (Dry weight basis) por sus siglas en inglés
TMA	Tetrametilamonio
WM	Cantidad máxima de agua adsorbida

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intercapas de aluminosilicato. Tomado de Hoerudin, 2019.	17
Figura 2. Estructura de la montmorillonita. Evolución de la textura en el procesamiento de nanocompuestos poliestireno-arcilla. Tomado de Steinmetz, 2020.....	20
Figura 3. Capacidad de absorción de agua de distintos desecantes. A) A diferentes porcentajes de humedad relativa. B) Durante tiempo definido. (Sorbent Systems, 2020)	36
Figura 4. Secador rotativo.....	39
Figura 5. Diagrama del proceso de control de calidad.	41
Figura 6. Ejemplo de la información de un desecante. (Department of Defense, 1987).	44
Figura 7. Comparativa del proceso de producción de desecantes, silica gel vs Montmorillonita.	48
Figura 8. Isotermas de adsorción de vapor de agua de BR y para los distintos % Ca agregado. Tomado de Castrillo, Mercado, Volzone, 2018.....	50
Figura 9. Datos experimentales y curvas de ajuste. A) Cinética de desadsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 a cuatro humedades relativas. Decaimiento del modelo hiperbólico. B) Datos experimentales y curvas de ajuste. Cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 a cuatro humedades relativas. Tomado de Montes-H y Geraud, 2004.	56
Figura 10. Cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 en función de la cantidad de la muestra. (a) Datos experimentales y curvas de ajuste "modelo hiperbólico" (Montes-H y Geraud, 2004).	57
Figura 11. Cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 en función de la cantidad de la muestra (b) "b" tiempo de media adsorción y cantidad de correlación de muestra "modelo lineal". Tomado de Montes-H y Geraud, 2004.....	58

Figura 12. Datos experimentales y curvas de ajuste modelo hiperbólico. A) Influencia de la temperatura de secado de la muestra en la cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80. B) Influencia de la compactación mecánica en la cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80. C) Influencia del catión entre capas en la cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80. Tomado de Montes-H y Geraud, 2004.	59
Figura 13. Estructura de montmorillonita. T, lámina tetraédrica; O octaédrico. Tomado de Volzone y Ortega, 2004.....	61
Figura 14. Comparación de absorción de humedad entre desecantes desarrollados y comerciales. Tomado de Tretiak y Abdallah, 2009.	67
Figura 15. Isotermas de adsorción-desorción en Montmorillonita-Na y Ca. Tomado Keren y Shainberg, 1975.	81
Figura 16. Diagrama de flujo de la técnicas e instrumentos de recolección de datos.	87
Figura 17. Diagrama general de estrategia metodológica.....	88
Figura 18. Caso A, Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados en las condiciones de activación de arcilla, 55.55% de solución y 44.44% de arcilla. B) Tabla mostrando los resultados del caso A.	89
Figura 19. Caso B (prueba 3) Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados de la activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. Secado a 80°C y 3.5-4% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso B, prueba 3.....	91
Figura 20. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados con la activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. 18.25% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso B, prueba 4.	92

Figura 21. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados con la activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. Secado a 80°C y 3.5-4% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso B, prueba 5. 93

Figura 22. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados con la activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. Secado a 80°C y solución CaCl_2 . B) Tabla mostrando los resultados del caso B, prueba 6..... 94

Figura 23. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados de la activación de arcilla, 10-40% CaCl_2 y 60-90% arcilla. Secado a 80°C. 3.5-4% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso C. 95

Figura 24. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados con 0% solución. Secado a 80°C. 3.5-4% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso D..... 96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Esquema de clasificación de filosilicatos relacionados con minerales arcillosos. Tomado de Bailey, 1980.	18
Tabla 2. Características fisicoquímicas de la bentonita. Tomado de Mindat, 2019.	32
Tabla 3. Tamaño de la partícula del desecante. (Mil-D-3464,1987).	43
Tabla 4. Espaciado basal y área de superficie BET montmorillonitas sin tratar y homioiónico (Volzone y Ortiga, 2004).	62
Tabla 5. Adsorción de gas y relación de adsorción de gas por montmorillonitas monoiónicas y no tratadas a 25 C y 0.1Mpa. Volzone y Ortiga, 2004.....	63
Tabla 6. Los parámetros BET y el calor de la adsorción de agua en Montmorillonita Na ⁺ y Ca ⁺ calculado a 25°C. Tomado de Keren & Shainberg, 1975.	77
Tabla 7. Energía liberada por los tres mmol de agua adsorbida en montmorillonita Na y Ca (valores experimentales calculados a 25°C). Tomado de Keren y Shainberg, 1975.	79
Tabla 8. Caso B (Prueba 1). Ganancia en peso de agua del descante respecto a la concentración de cloruro de calcio. Activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. 18.25% H.R.	90
Tabla 9. Caso B (Prueba 2). Ganancia en peso de agua del descante respecto a la concentración de cloruro de calcio. Activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. Secado a 80°C y 10.35 H.R.	90
Tabla 10. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. 100% Arcilla, 100% CaCl ₂ , 100% silica gel.....	97

RESUMEN

Una arcilla mineral es aquella estructura laminar constituida por un grupo importante de silicatos de aluminio hidratados. Se suele emplear en distinto tipo procesos industriales, agrícolas y alimentarios. La montmorillonita es una arcilla de particular interés por su factibilidad de reducir su impacto ambiental durante su producción. Es por ello por lo que para el presente trabajo se planteó evaluar la adición en sólido del CaCl_2 (cloruro de calcio) durante el proceso de activación de la montmorillonita y su eficiencia como desecante. Para ello, se realizaron 5 ensayos (A -E) en los que se estimó su capacidad de absorción de humedad. Para el caso A la activación con CaCl_2 fue al 55.5 % y 44 % de la matriz; para el caso B, la activación se realizó con CaCl_2 al 20% y 80% de la matriz; este caso se dividió a su vez en 6 ensayos a diferentes humedades relativas; para el caso C, se probaron concentraciones de activación de 10 – 40 % de CaCl_2 y del 60 – 90 % de arcilla respectivamente. Para el caso D se adicionó del 10 – 60 % de CaCl_2 por 90 – 40% de montmorillonita en estado sólido; finalmente, para el caso E se evaluó la actividad de desecante por separado para el CaCl_2 , la matriz de montmorillonita y la silica gel. Luego de realizado cada ensayo, se pesaron las muestras y se obtuvieron los siguientes resultados; para el Caso A, del 30 – 40 % por ciento de $[\text{CaCl}_2]$ no hubo diferencia significativa, sin embargo, de éste 60 % se observó un incremento significativo de 0.67 g de peso. En el Caso B, se obtuvieron 0.53 g, 3.24 g, 5.47 g, 0.47 g, 5 g y 2.67 g de absorción de humedad respectivamente para cada subensayo (1 – 6). El caso C reportó que, sin adición de ningún coadyuvante, se lograba absorber hasta 4.16 g de absorción de humedad, mientras que en el Caso D se absorbían hasta 5.36 g a la misma concentración de soluto, muy similar a lo reportado por la silica gel en el caso E (5.48 g). De lo

anterior se concluye que el “Caso D” es más adecuado porque no implica un proceso de secado de la arcilla, sino solamente la mezcla en estado sólido del CaCl_2 con la arcilla.

ABSTRACT

A mineral clay is defined as that laminar structure made up of an important group of hydrated aluminum silicates. It is usually used in different types of industrial, agricultural and food processes. Montmorillonite is a type of clay of particular interest for its water absorption capacity and for the feasibility of reducing its environmental impact during its production. That is why, for the present work, it was proposed to evaluate the solid addition of CaCl_2 during the montmorillonite activation process and its efficiency as a desiccant. For this, 5 tests (A -E) were carried out in which its moisture absorption capacity was estimated. For case A, activation with CaCl_2 was 55.5% and 44% of the matrix; for case B, the activation was carried out with CaCl_2 at 20% and 80% of the matrix; This case was divided into 6 tests at different relative humidity; for case C, activation concentrations of 10-40% CaCl_2 and 60-90% clay respectively were tested. For case D, 10-60% CaCl_2 was added to 90-40% solid-state montmorillonite; finally, for case E, the desiccant activity was evaluated separately for CaCl_2 , the montmorillonite matrix and the silica gel. After performing each test, the samples were weighed and the following results were obtained; For Case A, from 30 - 40% percent of $[\text{CaCl}_2]$ there was no significant difference, however, from this 60% a significant increase of 0.67 g of weight was observed. In Case B, 0.53 g, 3.24 g, 5.47 g, 0.47 g, 5 g and 2.67 g of moisture absorption were obtained respectively for each sub-test (1 - 6). Case C reported that, without the addition of any adjuvant, it was possible to absorb up to 4.16 g of moisture absorption, while in Case D up to 5.36 g were absorbed at the same concentration of solute, very similar to that reported by silica gel in case E (5.48 g). From the above it is concluded

that "Case D" is more suitable because it does not involve a drying process of the clay, but only the solid-state mixture of CaCl_2 with the clay.

CAPÍTULO I. MARCO METODOLÓGICO

1.1. Introducción

Una arcilla mineral se define como aquella estructura en forma de capa o lámina que está constituida por un grupo importante de silicatos de aluminio hidratados y que además presenta un tamaño de partícula muy pequeño de aproximadamente 0.0039 mm, así como cantidades significativas de metales alcalinos, alcalinotérreos y hierro (Kodoma, 2013). En ese sentido, existen distintos tipos de arcillas, las cuales se pueden clasificar con base en su proporción 1:1 o 2:1. Esto se origina porque están contruidos fundamentalmente de láminas de silicato tetraédrico y láminas de hidróxido octaédrico (figura 1.). Una arcilla 1:1 consiste en una hoja tetraédrica y una hoja octaédrica; algunos ejemplos son la caolinita y la serpentinita. Por otro lado, una arcilla 2:1 consiste en una hoja octaédrica intercalada entre dos hojas tetraédricas, y los ejemplos son talco, vermiculita y montmorillonita o esmectita (Tabla 1).

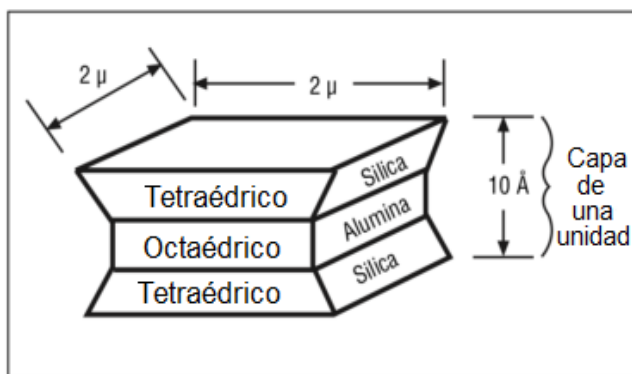


Figura 1. Intercapas de aluminosilicato. Tomado de Hoerudin, 2019.

Tabla 1. Esquema de clasificación de filosilicatos relacionados con minerales arcillosos. Tomado de Bailey, 1980.

Tipo de capa	Grupo (Σ = cargo por unidad de fórmula)	Subgrupo	Especies*
1: 1	Caolinita-serpentina	Caolinita	Caolinita, Dickita, Halloysita
	$\Sigma \sim 0$	Serpentina	Crisotilo, laizardita, amesita
2: 1	Pirofilita-talco	Pirofilita	Pirofilita
	$\Sigma \sim 0$	Talco	Talco
	Esmectita	Esmectita dioctaédrica	Montmorillonita, beidellita
	$\Sigma \sim 0,2-0,6$	Esmectita trioctaédrica	Saponita, hectorita, sauconita
	Vermiculita	Vermiculita dioctaédrica	Vermiculita dioctaédrica
	$\Sigma \sim 0,6-0,9$	Vermiculita trioctaédrica	Vermiculita trioctaédrica
	Mica#	Mica dioctaédrica	Moscovita, paragonita
	$\Sigma \sim 1$	Mica trioctaédrica	Flogopita, biotita, lepidolita
	Mica quebradiza	Mica quebradiza dioctaédrica	Margarita
	$\Sigma \sim 2$	Mica trioctaédrica frágil	Clintonita, anandita
	Clorita	Clorito dioctaédrico	Donbassite
	Σ variable	Di, clorito trioctaédrico	Cookeita, sudoita
		Clorito trioctaédrico	Clinocloro, chamosita, nimita

Estas y otras especies de arcillas menos comunes se diferencian por variaciones en su composición química y geometrías moleculares las cuales implican sustituciones de átomos de aluminio por silicio en sitios de cationes tetraédrico y de átomos de aluminio, hierro, magnesio y litio en sitios de cationes octaédricos (figura 2). Las arcillas de esmectita tienen una carga negativa neta variable, que se equilibra con átomos de sodio, calcio y magnesio adsorbido externamente en las superficies interlaminares. Se sabe que la estructura y composición química son las responsables de varias propiedades únicas que presentan, dentro de las que se incluyen una gran superficie químicamente activa, una alta capacidad de intercambio catiónico, así como superficies interlaminares con características de hidratación inusuales; a veces capaces de modificar fuertemente el comportamiento de flujo de los líquidos. Lo anterior puede ser explicado a través de la facilidad de intercambio iónico que presentan este tipo de matrices, así como del tamaño del

cristal que tienen las arcillas esmectitas. Ahora bien, la esmectita es el nombre utilizado para un grupo de especies minerales de silicatos, dentro de los cuales los más importantes son la beidellita, la nontronita, la saponita, la hectorita y la montmorillonita, siendo ésta última de destacada importancia en el presente trabajo de investigación. La montmorillonita es un mineral del subgrupo de los filosilicatos; es un hidroxisilicato de magnesio y aluminio en combinación con otros elementos; que recibe su nombre debido a la localidad francesa de Montmorillon. Se caracteriza por una composición química inconstante y presenta ciertas características, como lo son el ser soluble en medios ácidos y expandirse al contacto con el agua. Estructuralmente se compone por una capa central que contiene aluminio y magnesio coordinados octaédricamente en forma de óxidos e hidróxidos. Dicha capa central está rodeada por otras dos capas (figura 2), de las cuales, las más externas están formadas por óxidos de silicio coordinados tetraédricamente. Las esmectitas de sodio se encuentran en cantidades comerciales en solo unos pocos lugares, pero la esmectita de Ca-Mg y los depósitos de tierra de Fuller de tamaño considerable se hallan en casi todos los continentes (Barrer *et al*, 1984). En el estado de Michoacán, la arcilla montmorillonita es extraída aproximadamente a una hora y media de la norte de la ciudad de Morelia, capital del estado.

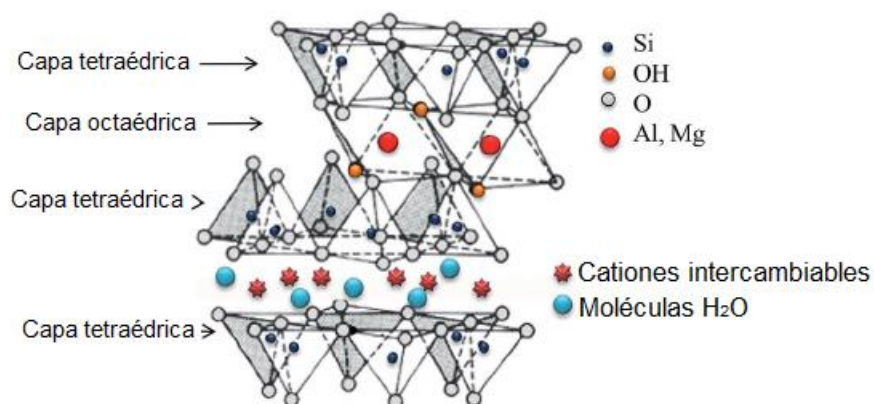


Figura 2. Estructura de la montmorillonita. Evolución de la textura en el procesamiento de nanocompuestos poliestireno-arcilla. Tomado de Steinmetz, 2020.

Respecto a sus aplicaciones y usos, se suele emplear de manera general para arenas de moldeo, lodos de perforación, elaboración de absorbentes, material de sellado, fabricación de jabones, alimentación animal, catálisis, clarificación de vinos y jugos y para uso abrasivo. Tienen gran importancia en los procesos industriales de purificación de aguas que contengan diferentes tipos de aceites industriales y contaminantes orgánicos. Se utiliza también como soporte de productos químicos como, por ejemplo, herbicidas, pesticidas e insecticidas, posibilitando una distribución homogénea del producto tóxico (QuimiNet, 2006). En términos de los principales usos industriales y químicos, las arcillas de esmectita natural se pueden dividir en tres categorías: esmectitas de sodio, esmectitas de Ca-Mg y tierras ácidas o de Fuller. Grandes volúmenes de esmectitas de sodio y esmectitas de Ca-Mg intercambiadas con sodio y tierra de Fuller se utilizan directamente en las industrias en los procesos citados en líneas anteriores, así como en ingeniería civil para impedir el movimiento del agua y en procesos de fundiciones de hierro.

Para que se puedan aprovechar las propiedades de la montmorillonita enlistadas anteriormente es necesario llevar a cabo un proceso de activación de ésta, el cual se ejecuta con cloruro de calcio. La característica de los desecantes de arcilla activada es que, dada la

combinación de la montmorillonita con el cloruro de calcio, es que presentan un mecanismo de acción dual. El primero es a través del cloruro de calcio, el cual permite adsorber el agua, es decir, atraer las moléculas de agua hacia la superficie de la matriz y el otro es a través de la arcilla montmorillonita, la cual atrapa las moléculas de agua al interior de su estructura, evitando al mismo tiempo que se produzcan derrames. En el proceso de adsorción, los átomos y moléculas de un fluido se capturan en materiales que presentan porosidad alta, la cual retiene la mayor parte de las moléculas que atraviesan sus cavidades. Por esta razón, los materiales adsorbentes permiten capturar las moléculas de agua de una corriente de aire hasta alcanzar su punto de saturación, para después eliminar la humedad capturada a través de una corriente que posee mayor nivel térmico, en un proceso denominado regeneración del desecante. Se ha reportado que lo anterior mejora sus propiedades de adsorción, sin embargo, la información respecto a la manera en que se lleva cabo dicho proceso a nivel industrial es limitada o bien no se encuentra de manera accesible, lo cual resalta la importancia de esta investigación (Tretiak *et al*, 2019).

1.2. Justificación

Actualmente son pocas las empresas que producen desecantes en el país y son menos aquellas que se dedican a la producción de desecantes a base de arcilla montmorillonita, tan solo se conoce una en el rubro, las demás empresas solamente empacan o compran los suministros a terceros. Por esta razón, hay una gran oportunidad para la incursión en el mercado de los desecantes. Además de que los desecantes de arcilla tienen un menor impacto en el medio ambiente, pues, las demás empresas usan otros productos como la silica gel. En ese sentido, uno de los principales problemas que generan pérdidas económicas en la industria electrónica, aeroespacial, automotriz, metalmecánica,

química, del cacao, café, entre otras, es el generado por la humedad. Estos daños normalmente se presentan cuando se transportan bienes de lugares cálidos con altos porcentajes de humedad hacia lugares más templado o fríos y con menor porcentaje de humedad. Lo anterior es un problema actual que se ha visto incrementado a causa del cambio climático; por citar un ejemplo donde hace algunos años no llovía, ahora sí y donde llovía anteriormente, ahora está seco.

A causa del cambio climático se están descongelando los polos y aumentando el nivel del mar por lo que el transporte y almacenamiento de mercancías es más complejo. El problema se genera cuando se transportan o almacenan mercancías y sufren daños, si los productos son inorgánicos sufren daños por corrosión, que van desde el doblado hasta desprendimiento de sus etiquetas y en el caso de productos perecederos se observan cambios importantes en sus características organolépticas como son el olor, el sabor y su apariencia. Todos estos daños pueden ser prevenidos si se empacan con desecantes y de ser requerido cambiarla por otros después de un tiempo.

Dentro de la distinta gama de desecantes que existen actualmente, la arcilla montmorillonita es uno de los principales, además de ser el más amigable con el medio ambiente pues no pasa por procesos químicos complicados. Es un producto que se adquiere directamente de la naturaleza. A nivel industrial, su volumen y velocidad de producción está dado por la demanda del mercado, sin embargo, se ve limitado por la capacidad de producción que se llegue a tener. Respecto al proceso de fabricación, se puede decir que cuando la producción es de poco gramaje como por ejemplo de 1/6 de unidad (10 gramos aproximadamente) como se hace referencia en la especificación militar MIL-D-3464, es necesario utilizar maquinaria automatizada, de lo contrario, si la producción fuera manual la tarea sería prácticamente imposible, ya que se requeriría bastante tiempo para sellar,

cortar y pegar la bolsa con calor, además de la verificación de peso; lo anterior llevaría demasiado tiempo poder completar tan solo un galón. Por otro lado, si se quisiera hacer un desecante de más gramaje como, por ejemplo, de medio kilogramo (aproximadamente 16 unidades), el proceso pudiese ser de manera manual, pues tan solo se requieren 150 bolsas por tambo como indica la especificación militar MIL-D-3464; lo cual es equivalente a una capacidad para 200 libras o 90 kilos aproximadamente. Es por lo mencionado anteriormente que un proceso semiautomatizado sería suficiente para producir tal cantidad en una jornada laboral.

Ahora bien, las máquinas automatizadas que procesan los desecantes con poco gramaje y en las dimensiones establecidas se apegan a la especificación militar MIL-D-3464. La velocidad de producción de ellas es variable según el peso y dimensiones de las bolsas donde se empaquetan, pero aproximadamente pueden producir de 30 a 40 piezas por minuto; lo que nos da un total de 30 bolsas por 60 minutos, que equivale a una producción de 1800 bolsas/hora. Con mínimo y un máximo de 40 bolsas/60 minutos lo que es igual a 2400 bolsas/hora; lo suficiente como para producir por lo menos 2 cubetas de 5 galones cada una y 1200 desecantes de 1/6 de unidad o 10 gramos. Esto es traducido a una producción diaria de “X” cantidad de desecantes pues dependerá como se menciona de las dimensiones y peso del desecante de humedad, que estará determinado por el pedido y todo lo que implique mantener la máquina funcionando, así como el factor humano a la hora de manipular la máquina y materias primas.

Al momento de diseñar un desecante se debe considerar su capacidad de absorción de agua, en ese sentido, la adición de cloruro de calcio puede coadyuvar a una adsorción más rápida y esto supone un beneficio práctico (Castrillo y colaboradores, 2018). Lo que hace el cloruro de calcio es atraer las moléculas de agua, y ya que la humedad del ambiente no está en equilibrio con el

cloruro de calcio, lo que sucede es que absorbe al agua por su capacidad higroscópica y de igual manera si la humedad del ambiente disminuye al no estar en equilibrio el cloruro de calcio, regresará la humedad al ambiente y se secará. La arcilla montmorillonita ya es por si sola un desecante de humedad natural cuando pasa por un proceso de secado, sin embargo, la adición del cloruro de calcio va dirigida a la velocidad de absorción de humedad del ambiente, la cual dependerá de la aplicación que se le desee dar al desecante; por ejemplo, si se requiere una absorción rápida de humedad del ambiente entonces se tendrá que incrementar el porcentaje de cloruro de calcio en el producto terminado, por el contrario, si no hay necesidad de absorber tan rápido la humedad entonces se podrá disminuir la concentración de cloruro de calcio en el producto terminado.

Ahora bien, es factible mejorar aún más las capacidades de absorción de la matriz de bentonita, sin embargo ello supondría un proceso adicional donde se activase la arcilla montmorillonita al ser sumergida y disuelta en una solución de cloruro de calcio para que pudiese llevarse a cabo el intercambio catiónico, y consecuentemente permitir que la molécula de la arcilla quedase cargada negativamente gracias al cloruro de calcio y mejorara sustancialmente su capacidad de absorción y adsorción de agua. Durante un proceso continuo para este tipo de productos, en el que se considere desde la activación de la arcilla hasta el empaquetado, con eficiencia en la utilización de recursos es algo que no se ha explorado lo suficiente según lo reportado en la literatura. Por otro lado, la optimización de este tipo de procesos puede llegar a ser traducido no sólo en términos de ganancia económica, sino también en cuestiones de índole ecológica y de cuidado del medio ambiente. Es por ello que, en el presente trabajo se ha propuesto analizar la influencia de la adición en sólido del CaCl_2 en el proceso de activación de una matriz de bentonita en su eficiencia como desecante.

1.3. Pregunta de investigación

Con base en las propiedades de adsorción y absorción de las matrices de bentonita - CaCl_2 , a su aplicabilidad en distinto tipo procesos industriales, así como en la agricultura, la alimentación, la catálisis, entre otros, y a la factibilidad de impactar positivamente al medio ambiente durante su producción en serie es que se planteó la siguiente pregunta, ¿de qué manera influye la adición en sólido del CaCl_2 durante el proceso de activación de la montmorillonita en su eficiencia como desecante?

1.4. Hipótesis

La adición en sólido del CaCl_2 en el proceso de activación de la montmorillonita puede mejorar las propiedades de adsorción de humedad de esta, optimizando así su eficiencia como desecante.

1.5. Objetivo general

Analizar el efecto de la adición en sólido del CaCl_2 durante el proceso de activación de la montmorillonita en su eficiencia como desecante y asegurar los estándares de calidad de la especificación militar Mil-D-3464-E en el desecante.

1.5.1. Objetivos específicos

- i. Optimizar el proceso de adición de CaCl_2 para la activación de una matriz de montmorillonita.
- ii. Evaluar la capacidad de absorción de humedad relativa por parte del desecante.
- iii. Asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad de la especificación militar Mil-D-3464-E en la bentonita activada con CaCl_2 .

1.6. Alcances y limitaciones

El presente proyecto tuvo como principal premisa el mejorar el proceso de activación de una matriz de bentonita para que posteriormente fuera usada como desecante, para ello se propuso llevar a cabo la optimización del proceso de activación del desecante bajo condiciones definidas, las cuáles incluían distintos porcentajes de cloruro de calcio, distintos gradientes de temperatura y humedades relativas. Para esto, los ensayos pertinentes se realizaron con apoyo del CIDAM (Centro de Innovación y Desarrollo Agroalimentario de Michoacán), ya que es el único laboratorio en la ciudad de Morelia que cuenta con una cámara de humedad con las características necesarias para llevar a cabo la experimentación puesto que la infraestructura con la que cuenta la empresa es muy básica y carece de los equipos necesarios para realizar dichas pruebas.

Otra limitante, además de la cuestión de equipo y recurso fue el tiempo, ya que el escalado debía considerar el menor tiempo posible de manufactura, así como de plazo de entrega. Sin embargo, el presente año 2020 se volvió un reto a la puesta en marcha del proyecto, ya que el recipiente para realizar el envasado que indican las normas de calidad, es el Tyvek®, un material

sintético de polietileno fabricado por la empresa Dupont y que al mismo tiempo es el material que se utiliza para los trajes protectivos en hospitales, clínicas, consultorios, etc., por lo que al haber tenido gran demanda, llegó al punto de la escasez, lo que generó atrasos en la programación de actividades y ensayos.

La metodología utilizada en los experimentos de la investigación se relaciona en aspectos muy específicos que se querían conocer, como por ejemplo el porcentaje de humedad que puede absorber un desecante con una cantidad de cloruro de calcio, sin embargo, la cantidad de pruebas estuvo limitada por el presupuesto asignado al proyecto. Con la experiencia y conocimiento adquiridos en la investigación las próximas pruebas se harán tomando como base algunos fundamentos de esta investigación y complementarlo con nueva información que se ha adquirido para poder ampliar la información que se tiene de los desecantes en cuestión.

CAPÍTULO II. MARCO CONTEXTUAL

La empresa Minería Empresarial S.A. de C.V. se encuentra actualmente en la fase de desarrollo, por lo que es pertinente comenzar a diseñar e implementar una línea de producción en serie que permita atender las necesidades de las industrias afectadas por la humedad en sus productos. Lo anterior debe considerar una producción a pequeña y mediana escala, pero que a la vez permita competir en el mercado de los desecantes de una manera ágil o dinámica y al mismo tiempo realizar modificaciones en la marcha que se ajusten a las exigencias del mercado. En ese sentido, se puede explotar una de las tantas aplicaciones de la arcilla dando valor agregado mediante la activación de la materia prima montmorillonita en la línea de producción. Dicha implementación serviría para futuros proyectos de la empresa o bien para otras industrias manufactureras similares y generaría

una reducción de la materia prima utilizada y de los insumos, lo cual habría de repercutir en los costos de producción directa, manteniendo así la competitividad de la empresa y generando utilidades. Además, se generarían nuevos empleos dado que se requiere del capital humano para la manipulación de los equipos, control de calidad y el proceso en general. Con un proceso continuo se tendría control sobre el producto para tener un aseguramiento de la calidad.

La empresa Minería Empresarial S.A. de C.V. es una empresa en el sector minero, específicamente en el área de los minerales no metálicos. Tiene más de 25 años en el mercado. Es una empresa manufacturera y uno de sus principales productos es la arcilla montmorillonita. La cual tiene múltiples propiedades como lo puede ser el desecante, filtrante y clarificante de aceite, vino, cerveza, etc. Actualmente el principal uso que se le da es el de secuestrante de micotoxinas para la industria vacuna, porcina y avícola. Por ejemplo, la aflatoxina B1 es una micotoxina producida por *Aspergillus flavus* y *A. parasiticus*. Es un carcinógeno muy potente con una TD50 de 3,2 $\mu\text{g} / \text{kg} / \text{día}$ en ratas. Esta potencia cancerígena varía según las especies, y algunas, como las ratas y los monos, parecen ser mucho más susceptibles que otras. La aflatoxina B1 es un contaminante común en una variedad de alimentos que incluyen maní, harina de semilla de algodón, maíz y otros granos; así como en alimentos para animales. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), se informó que los niveles máximos tolerados en todo el mundo de aflatoxina B1 oscilaban entre 1 y 20 $\mu\text{g} / \text{kg}$ en los alimentos y entre 5 y 50 $\mu\text{g} / \text{kg}$ en la alimentación del ganado bovino en 2003. (Galvano F. et al, 2005)

Sin embargo, como se menciona es una arcilla muy versátil por lo que la empresa está buscando nuevos mercados para incursionar. En este caso como una de las principales opciones está la del desarrollo de desecantes para su producción y comercialización.

El proceso de producción de arcilla montmorillonita consiste en la extracción de la arcilla, triturado en un molino, cribado y secado en un secador rotatorio (figura 4). A continuación, pasa por un proceso de pulverizado, finalmente se envasa, emplea y almacena. Una vez terminado este proceso la arcilla se pudiera utilizar como desecante, sin embargo, la empresa pretende dar un valor agregado a su producto principal que es la arcilla montmorillonita al adicionar cloruro de calcio para mejorar la capacidad de absorción y adsorción de este desecante. Anteriormente la empresa había realizado este proceso de una forma muy empírica, así nace la necesidad de realizar pruebas en un laboratorio, sistematizadas y siguiendo las recomendaciones de la especificación militar Mil-D-3463. Ésta realizó un estudio de mercado el cual le permitió conocer los sectores industriales en los cuales se utilizan los desecantes, así como las presentaciones y características que utilizan.

Los desecantes se encuentran actualmente en la fase de desarrollo, por lo que es pertinente comenzar a diseñar e implementar una línea de producción en serie que permita atender las necesidades de las industrias afectadas por la humedad en sus productos. Lo anterior debe considerar una producción a pequeña y mediana escala, pero que a la vez permita competir en el mercado de los desecantes de una manera ágil o dinámica y al mismo tiempo realizar modificaciones en la marcha que se ajusten a las exigencias del mercado. En ese sentido, se puede explotar una de las tantas aplicaciones de la arcilla dando valor agregado mediante la activación de la materia prima montmorillonita en la línea de producción. Dicha implementación serviría para futuros proyectos de la empresa o bien para otras industrias manufactureras similares y generaría una reducción de la materia prima utilizada y de los insumos, lo cual habría de repercutir en los costos de producción directa, manteniendo así la competitividad de la empresa y generando utilidades. Además, se generarían nuevos empleos dado que se requiere del capital humano para

la manipulación de los equipos, control de calidad y el proceso en general. Con un proceso continuo se tendría control sobre el producto para tener un aseguramiento de la calidad.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. Desecantes

Un desecante se define como aquella sustancia capaz de interactuar a nivel molecular con partículas de agua y formar un tipo de enlace débil, generalmente puentes de hidrógeno, lo que permite reducir la humedad del sistema o medio en que se aplique. Existen distintos tipos de desecantes, las cuáles de acuerdo con sus características dan pie a sus múltiples aplicaciones. Los más comunes son la silica gel, la arcilla montmorillonita, también llamada bentonita; ciertas sales como el cloruro de calcio, la malla molecular, las zeolitas y la alúmina. La mayoría de las arcillas de esmectita, son un grupo de minerales de arcilla que tiende a dilatarse si se expone al agua, y se conocen como bentonitas o montmorillonitas. Originalmente nombrada arcilla esmectita, fue encontrada cerca de Fort Benton Wyoming.

3.1.1. Montmorillonita

La montmorillonita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Es un hidroxisilicato de magnesio y aluminio, que recibe su nombre de la localidad francesa de Montmorillon. Se caracteriza por una composición química variable; es soluble en ácidos y se expande al contacto con agua. Estructuralmente se compone por una capa central que contiene aluminio y magnesio coordinados octaédricamente en forma de óxidos e hidróxidos. Dicha capa central está rodeada por otras dos capas. Las capas externas están formadas por óxidos de silicio coordinados tetraédricamente. En la Tabla 2, se pueden observar sus características fisicoquímicas (Mindat, 2019).

Tabla 2. Características fisicoquímicas de la bentonita. Tomado de Mindat, 2019.

Fórmula: $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33} (\text{Al}, \text{Mg})_2 (\text{Si}_4\text{O}_{10}) (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Color: blanco, pulido, amarillo, verde, rara vez rosa pálido a rojo
Lustre: opaco, terroso
Dureza: 1 - 2
Gravedad específica: 2 - 3
Cristal Sistema: Monoclínico
Grupo de esmectitas
Nombre: Para la localidad tipo en Montmorillon, Vienne, Poitou-Charentes, Francia. Tipo de localidad: Montmorillon, Vienne, Nouvelle-Aquitaine, Francia
Propiedades físicas de la montmorillonita
Lustre: aburrido, terroso
Transparencia: translúcida
Comentario: bajo brillo debido a la naturaleza de grano fino del mineral
Color: blanco, beige, amarillo, verde, rara vez de color rosa pálido a rojo
Comentario: la coloración rosa a roja se debe a la alta cenefa Mn
Racha: blanco
Dureza: 1-2 en la escala de Mohs
Comentario: suave debido a la ocurrencia de grano fino
Escote: perfecto en {001}
Fractura: irregular / desigual
Densidad: 2-3 g / cm ³ (medido)

El cloruro de calcio actúa como un elemento coadyuvante del desecante, pues tiene la propiedad de absorción. Es un compuesto inorgánico que se presenta en forma de una sal de cristales blancos y de fórmula química CaCl_2 . Es altamente soluble en agua y se puede crear a través de una reacción de neutralización del ácido clorhídrico con el hidróxido de calcio. Se encuentra comúnmente como un sólido hidratado con la fórmula genérica $\text{CaCl}_2 (\text{H}_2\text{O})_x$, donde la variable $x = 0, 1, 2, 4$ y 6 . Estos compuestos se utilizan principalmente para descongelar y controlar el polvo. Debido a que la sal anhidra es higroscópica, se utiliza como desecante. La higroscopia es el fenómeno de atraer y retener moléculas de agua mediante absorción o adsorción del ambiente circundante, que generalmente está a temperatura normal o ambiente. Si las moléculas de agua se suspenden entre las moléculas del compuesto, las sustancias adsorbentes pueden cambiar físicamente.

Los beneficios de utilizar montmorillonita activada con cloruro de calcio es que el desecante es químicamente inerte, no corrosivo y, lo que es más importante, tiene una atracción por el agua. Esto lo convierte en el recurso perfecto para redirigir el flujo de partículas de agua desde un artículo empaquetado hacia las bolsas desecantes que absorben la humedad. Los desecantes a base de arcilla que en este caso es la montmorillonita, son el producto menos costoso y uno de los más rentables que utilizan las empresas para protegerse contra la humedad. Es eficaz en temperaturas no extremas contra ambientes relativamente húmedos como se observa en la figura 3 (Sorbent Systems, 2020).

3.1.2. Silica gel ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Es el desecante más común, el gel de silicio es un tipo de silicio amorfo hecho de silicato de sodio y ácido sulfúrico. Sus poros interconectados forman una superficie vasta que atrae y mantiene agua por absorción y condensación capilar, permitiendo que el gel de silicio absorba cerca de 40% de su peso en agua. El gel de silicio es extremadamente eficaz a temperaturas debajo de 77°F (25°C) pero pierde su capacidad de absorción al paso que la temperatura suba, al igual que la arcilla. La popularidad del gel de silicio se debe a que no es corrosivo ni tóxico; algunos grados han recibido aprobación del gobierno estadounidense para uso en empaquetado de alimentos y medicinas.

El gel de sílice fue patentado en 1919 por Walter A. Patrick, profesor de química en la Universidad Johns Hopkins, Baltimore (Maryland). Anteriormente fue usado en las máscaras antigás, durante la Primera Guerra Mundial, para la adsorción de vapores y gases. La sustancia se conocía desde 1640 como una curiosidad científica. Se suele encontrar comúnmente en forma de pequeñas esferas envasadas en bolsas transpirables. En esta forma, se usa como agente desecante para controlar la humedad local y evitar el deterioro de ciertos bienes. Debido a aditivos venenosos añadidos al producto, como el cloruro de cobalto, y a su gran capacidad de absorción de humedad, habitualmente los paquetes de gel de sílice llevan advertencias destinadas a que los usuarios no ingieran el contenido de estos (Feldman & Desrochers, 2003).

3.1.3. Malla molecular (Zeolita sintética - $\text{Na}_{16} (\text{AlO}_2)_{16} (\text{SiO}_2)_{32} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$)

El tamiz molecular contiene una red de poros cristalinos y huecos de absorción, los cuales crean una superficie interna de absorción de 700 a 800 gm^2 (la mitad del volumen total de los cristales).

Debido a su estructura uniforme, el tamiz molecular no despidе la humedad en el paquete tan fácilmente como el gel de silicio o arcilla al paso que la temperatura sube. Ya que es sintético en vez de una sustancia natural, el tamiz molecular es más caro por unidad, pero como tiene una extremadamente gran variedad de capacidades de absorción, puede tener el mejor valor por el precio. La falta de aprobación del gobierno ha limitado su uso extendido, presumiblemente debido a que la industria no está dispuesta a financiar investigaciones del gobierno. Investigaciones independientes sugieren que el tamiz molecular cumple con todos los requisitos del gobierno (Sorbent Systems, 2020).

3.1.4. Óxido de calcio (CaO)

Oxido de calcio, lima calcinada o recalcinada; tiene una capacidad para absorber humedad por lo menos de 28.5% de su peso. Esta característica le permite que una gran cantidad de vapor de agua se pueda absorber en humedades relativas bajas, en comparación con otros materiales. Es más eficaz cuando es necesario mantener baja la humedad relativa y cuando hay una concentración alta de vapor de agua presente. El óxido de calcio se utiliza principalmente en el empaquetado de alimentos deshidratados (Sorbent Systems, 2020).

3.1.5. Sulfato de calcio (CaSO₄)

Sulfato de calcio es una alternativa barata de empaquetado dentro de los métodos disponibles. Sulfato de calcio es creado por la deshidratación controlada del yeso, actuando como desecante de

uso general que se utiliza en aplicaciones de laboratorio. Es químicamente estable, no se desintegra, no es tóxico ni corrosivo, y no suelta agua que haya absorbido cuando se encuentra en ambientes con altas temperaturas. Su bajo costo debe compararse con su igualmente baja capacidad de absorción. Absorbe solamente el 10% de su peso en vapor de agua. El sulfato de calcio también tiene características de regeneración que tienden a limitar su utilidad. Aunque es disponible, normalmente no se vende en forma empaquetada. (Sorbent Systems, 2020).

Por otro lado, los distintos tipos de desecantes presentan diferentes características tanto físicas como químicas y por lo mismo se utilizan acorde al problema que se quiera solucionar dependiendo de las condiciones a las que se someta al desecante, esto afectará o beneficiará su capacidad de absorción (figura 3).

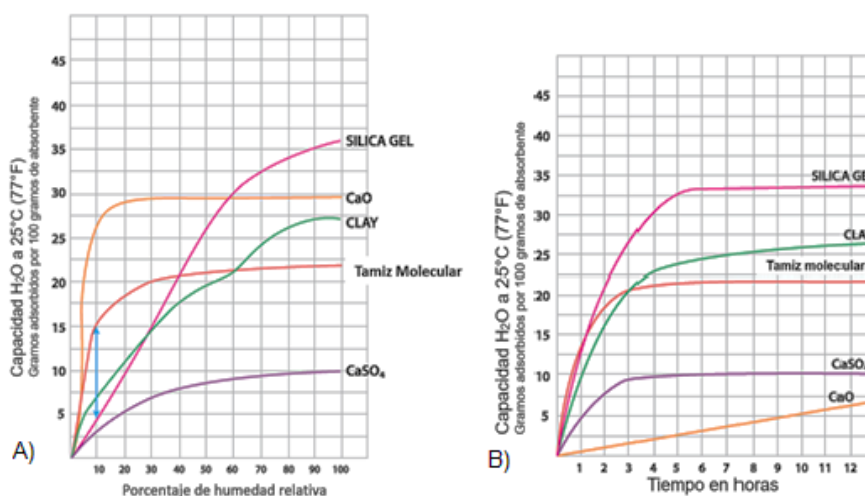


Figura 3. Capacidad de absorción de agua de distintos desecantes. A) A diferentes porcentajes de humedad relativa. B) Durante tiempo definido. (Sorbent Systems, 2020)

3.2. Proceso

Una de las razones por la que se ha realizado esta investigación es para encontrar la manera de hacer más eficiente el proceso y aprovechar al máximo las materias primas con las que se cuenta que son la arcilla montmorillonita y el cloruro de calcio. Lo que se buscó fue eliminar por completo un paso de activación de la arcilla. Para la fabricación de desecantes en la empresa Minería Empresarial S.A. de C.V. Los pasos que se siguieron en el proceso de experimentación fue el siguiente: En un primer paso se debe de extraer la arcilla montmorillonita y llevar hasta la fábrica donde se procesará. En un segundo paso se debe de realizar una prueba de humedad, con un método probado para la empresa Minería Empresarial, a la arcilla para saber con cuanta humedad llegó y hacer los ajustes necesarios en el proceso de secado, como aumentar la temperatura en el secador rotatorio. Posteriormente, en el tercer lugar, se colocan las mallas correspondientes para el tamaño de la granulometría de los desecantes. Se tiene que triturar la materia prima en un “tritador” para que la arcilla adquiera la granulometría (Tamaño de la partícula en milímetros) requerida por la especificación Militar Mil-d-3464 que puede ser desde 0.5 mm hasta los 4 mm dado que estos son los tamaños utilizados en los desecantes, la cual forma parte del control de la calidad para el tratamiento de la muestra. Una vez lograda esa granulometría con otra banda transportadora vertical se hace llegar hasta la tolva del secador donde se dosificará según la humedad con la que se cuenta; Como cuarto paso, se tiene el proceso de secado que se hace a través de un secador rotatorio.

El secador rotativo (Figura 4) está compuesto principalmente por un cuerpo giratorio, una placa de elevación, un dispositivo de transmisión, un dispositivo de apoyo y un anillo de sellado. El secador es un cilindro que está ligeramente inclinado desde la dirección horizontal. El material se agrega desde la fuente de calor de alta temperatura y el material fluye o contraflujo paralelamente en el cilindro. A medida que el cilindro gira, el material corre hacia el extremo inferior. La tabla de elevación en la pared interior del cilindro eleva y deja caer el material, de modo que la superficie de contacto del material y el flujo de aire se incrementa para aumentar la tasa de secado y promover el avance del material.

Ahora bien, el producto seco sale del secador por el extremo inferior de 25 metros de longitud como se muestra en la figura 4 (Direct Industry, 2020), con capacidad para secar la arcilla montmorillonita hasta niveles de dos por ciento de humedad gracias a su capacidad de secado de hasta una tonelada de producto por hora. En este proceso se debe de ajustar la temperatura que puede ser hasta de 800° C para lograr la humedad final requerida. Se debe de ajustar la velocidad de avance del producto que está relacionado con la velocidad de rotación del secador, normalmente en un tiempo de un minuto hasta tres horas aplicando distintos parámetros de velocidad y temperatura. La arcilla se dejará en los niveles más bajos de humedad para que logre absorber la mayor cantidad de humedad posible del ambiente una vez que se haya destapado el desecante y se le dé el uso requerido. Al terminar el proceso de secado se deberá pasar la arcilla por una criba para obtener exactamente la granulometría requerida.

En quinto lugar, se envasaron las muestras de la arcilla montmorillonita con el menor porcentaje de humedad posible para posteriormente ser llevadas al laboratorio CIDAM y realizar las pruebas pertinentes. Se cerraron las bolsas apropiadamente con una selladora térmica para impedir que el material comenzara a absorber la humedad del ambiente. Además

de transportar las muestras de montmorillonita se incluyeron muestras del material con el que se iba a mezclar, siendo éste el cloruro de calcio; el método de transporte fue aquel que impidiera la absorción de humedad.



Figura 4. Secador rotativo.

Como sexto paso, en el laboratorio CIDAM se prepararon los materiales en las distintas concentraciones, ya sea en solución o en seco para la activación de la arcilla, y se secaron de nuevo las muestras para estandarizar la humedad inicial del desecante. En el séptimo paso, las muestras de montmorillonita y cloruro de calcio en distintas concentraciones se envasaron en Tyvek® y se pesaron para tuvieran el peso requerido de la muestra. En el octavo paso, se realizaron las pruebas pertinentes en el laboratorio CIDAM con diferentes técnicas para mezclar el producto y determinar el porcentaje de humedad absorbida por las muestras, se llevó a cabo la activación de la arcilla en solución de cloruro de calcio, se realizó una mezcla en seco de la montmorillonita con el cloruro de calcio, la arcilla por si sola y el cloruro de

calcio por sí solo. Además de lo citado en líneas anteriores, se realizó un ensayo con silica gel para comparar los valores en una misma prueba.

Como noveno paso, se pesaron los desecantes, y al cabo de un tiempo establecido se evaluó la diferencia de peso inicial y final, obteniéndose de esta manera el diferencial de absorción. Finalmente, como décimo paso, se graficaron los resultados y se compararon con la especificación militar MIL-D-3464 para poder tomar una decisión sobre los pasos que se emplearán a la hora de fabricar los desecantes a mayor escala (figura 5).

3.3. Control de calidad

Para el control de calidad de los desecantes se hace referencia a la especificación militar Mil-D-3464, el cual es un documento emitido por el departamento naval de Estados Unidos. En éste se plasman todas las características que deben de tener los desecantes de arcilla, así como las pruebas en las que se someten. Existe también una especificación británica para desecantes de sin embargo ya no está activa, pero ha resultado conveniente revisar cuales eran las características. Incluso mencionaba cómo se debe hacer un desecante de a base de arcilla montmorillonita/ bentonita. Las variables que influyen en los requerimientos de diseño de los desecantes son tamaño/dimensiones, peso, material de envase y resistencia del material de la bolsa para la temperatura de reactivación (figura 5).

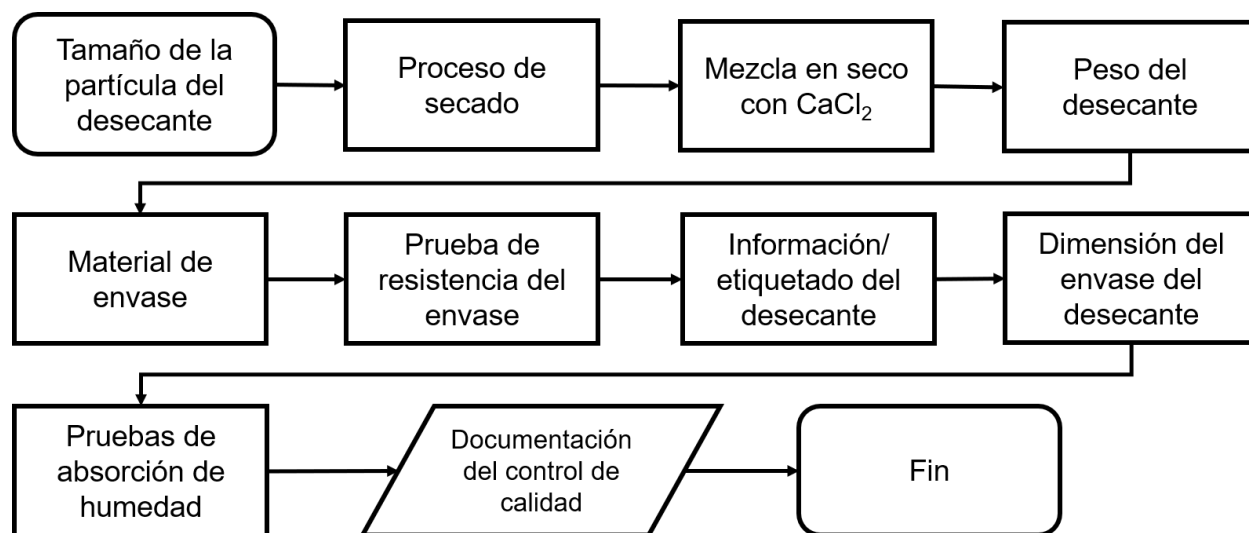


Figura 5. Diagrama del proceso de control de calidad.

Las dimensiones de los desecantes son definidas por cada empresa, sin embargo, carecen de especificaciones en particular. Por otro lado, las dimensiones de las bolsas de los desecantes se diseñaron para que tuvieran el tamaño adecuado en relación con su peso, que ese si está definido en la especificación militar Mil-D-3464 y que a continuación se definirán en el peso. De manera adicional, el peso es un punto importante a la hora del diseño del desecante ya que éste se mide respecto a la cantidad de desecante, lo que se refiere a la cantidad de humedad que un desecante debe de absorber como mínimo. Teniendo esto en cuenta puede haber una variación de acuerdo con los modelos que son los siguientes: 1/6, 1/3, 1/2, 1, 2, 4, 8, 16 unidades; una unidad de desecante se define como la cantidad de desecante, tal como se recibe, que se adsorberá en equilibrio con el aire a 25 grados centígrados ($^{\circ}$ C) al menos las siguientes cantidades de vapor de agua; a) 3.00 gramos a 20 por ciento de humedad relativa (HR), y b) 6.00 gramos al 40 por ciento de R.H (Department of Defense, 1987).

Existen dos tipos de material que se utilizan para los desecantes, sin embargo, para seguir la especificación militar Mil-D-3464 se utilizará el material Tyvek “DuPont™ Tyvek®”, que es un producto resistente y durable, más fuerte que el papel y con mejor costo-beneficio que el tejido. Fabricado con fibras de polietileno de alta densidad, es un material extremadamente versátil que ofrece un equilibrio de características físicas que combina las mejores propiedades del papel, la película y el tejido que, *de facto*, es una olefina.

Las olefinas son compuestos químicos que contienen por lo menos un doble enlace carbono-carbono. Las principales características de las olefinas son; mayor densidad que el agua; son insolubles en agua, incoloras, no tejida y formada por un proceso continuo que genera fibras muy finas de 0.5-10 micras (en comparación, un cabello humano tiene alrededor de 75 micras en sección transversal). Esas fibras no direccionales primero son torcidas y posteriormente unidas por calor y presión, sin aglutinantes. Tanto Tyvek® como Tyvek® Brillion® son fuertes, ligeros, flexibles, suaves, poca generación de pelusa, opacos y resistentes al agua, sustancias químicas, abrasión y envejecimiento. Su exclusiva combinación de propiedades hace que las marcas de materiales de protección Tyvek® sean ideales para una amplia gama de aplicaciones (DuPont, 2019). Por lo tanto, este material es ideal para los desecantes ya que será útil para las pruebas de clasificación del desecante, son tres y son las siguientes: Tipo I: de propósito general, Tipo II: sin polvo, Tipo III: para condiciones específicas y solo para los desecantes de 8 y 16 unidades (Department of Defense, 1987).

Respecto a la resistencia del material de la bolsa para la temperatura de reactivación, se puede decir que cuando se reactivan las bolsas en las que se empaca el desecante no se deben de agujerar, desgarrar o reventar como se especifica en el punto 4.6.9. del documento de la

especificación militar Mil-D-3464. Así mismo, los desecantes Tipo I y II deberán ser empaquetadas en bolsas en fracciones de unidad de 1/6, 1/3, ½; la unidad de tamaño 1, y en los múltiplos del tamaño de la unidad de 2, 4, 8 y 16 como se especifica en el punto 6.2 del documento de la especificación militar Mil-D-3464. Para los desecantes Tipo III deberán ser empaquetados en bolsas en el múltiplo de las unidades de 8 y 16 como se especifica en el punto 6.2 del documento de la especificación militar Mil-D-3464. Ahora bien, a menos que se especifique en el contrato de la orden, las bolsas de 16 unidades de tamaño o más grandes deberán llevar un cordón con una longitud mínima de 7 pulgadas o 18 centímetros. Finalmente, el tamaño de la partícula deberá de ser como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. *Tamaño de la partícula del desecante.* (Mil-D-3464,1987).

Numero de malla	Distribución, porcentaje
½ pulgada ³	Retiene (Max) 0.0
80	Retiene (Min) 96.6

En cuanto a la variación en la abertura promedio deberá ser de 3 por ciento. La variación de abertura máxima deberá ser de 5 por ciento. El diámetro deberá ser de 0.094 a 0.122 pulgadas. Es importante señalar que cada bolsa desecante deberá estar marcada para que dure y sea legible con la siguiente información: nomenclatura; desecante, activado, empacado, para uso en empaques y deshumidificación estática. Especificación: MIL-D-3464. Tipo I, II o III según aplique, que en este caso sería I y II. Unidad contenida; temperatura de reactivación en la bolsa (°F/°C); tiempo de

reactivación (horas); nombre de la empresa manufacturera y domicilio, como se muestra en la figura 6.

La especificación estándar británica, indica cuáles son los valores en los que una arcilla activada será considerada como desecante de humedad; menciona los métodos que deben de ser empleados para cada una de sus características que son las siguientes: muestras, contenido de humedad, pH, cloruros solubles en agua, sulfatos solubles en agua, capacidad de absorción, tamaño de la partícula, friabilidad y polvo, empaquetado y marbete. Aunque es un estándar que fue retirado sirve como referencia para estar al tanto de las características que debe tener un desecante con aplicación principal de empaquetado (British Standard, 1991).

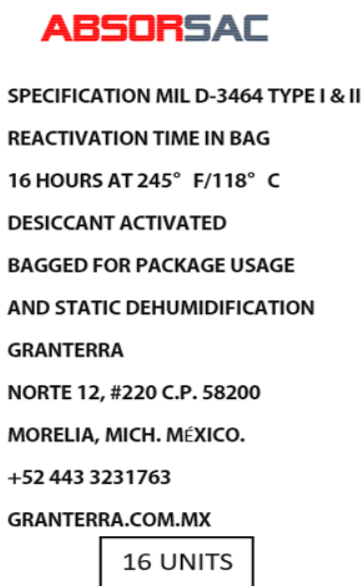


Figura 6. Ejemplo de la información de un desecante. (Department of Defense, 1987).

De manera adicional, la empresa deberá ajustarse a las Normas Oficiales Mexicanas de Seguridad y Salud en el Trabajo, las cuales se enlistan a continuación; NOM-001-STPS-2008

Edificios, locales e instalaciones; NOM-002-STPS-2010 Prevención y protección contra incendios; NOM-004-STPS-1999 Sistemas y dispositivos de seguridad en maquinaria; NOM-006-STPS-2014 Manejo y almacenamiento de materiales; NOM-009-STPS-2011 Trabajos en altura; NOM-022-STPS-2015 Electricidad estática. Normas de salud, como, por ejemplo; NOM-010-STPS-1999 Contaminantes por sustancias químicas, NOM-011-STPS-2001 Ruido; NOM-015-STPS-2001 Condiciones térmicas elevadas o abatidas; NOM-024-STPS-2001 Vibraciones; NOM-025-STPS-2008 Iluminación. Normas de Organización como, por ejemplo; NOM-017-STPS-2008 Equipo de protección personal; NOM-018-STPS-2000. Para la identificación de peligros y riesgos por sustancias químicas; NOM-019-STPS-2011 Comisiones de seguridad e higiene, NOM-026-STPS-2008 Colores y señales de seguridad; NOM-028-STPS-2012 Seguridad en procesos y equipos con sustancias químicas; NOM-030-STPS-200 Servicios preventivos de seguridad y salud (Secretaría de Trabajo y Previsión Social, 2012).

3.4. Impacto ambiental

Los beneficios de utilizar arcilla montmorillonita son una reducción de desperdicios y menor impacto ambiental a la hora de su fabricación. Los desecantes a base de arcilla montmorillonita se pueden reutilizar muchas veces porque la función de estos es captar la humedad y conservarla, sin embargo, cuando se pone el desecante a deshidratar vuelve a adquirir sus propiedades de desecante. Este proceso de deshidratación puede llevarse a cabo muchas veces pues, no hay un cambio realmente en la estructura del desecante. Para esto es de gran importancia que se sigan las instrucciones para deshidratar el desecante, ya que si se pueden modificar sus propiedades de absorción si se quema la arcilla.

El impacto ambiental se reduce ya que la montmorillonita es una arcilla cien por ciento natural, se encuentra en la naturaleza y no hay necesidad de un proceso industrial complejo y largo como lo puede ser la silica gel o malla molecular en los cuales se utilizan muchos químicos, agua, se generan aguas residuales y más energía para el proceso. Para la arcilla basta con que se extraiga y pase por un proceso de triturado, secado y cribado para que se tenga el producto listo, no se requieren de procesos industriales complicados y no se necesitan químicos. La arcilla montmorillonita o bentonita se puede extraer en distintas partes del mundo mientras que la silica gel se fabrica principalmente en China, lo que supone que tiene que ser enviada alrededor del mundo generando altos niveles de CO₂ y, por lo tanto, mayor impacto ambiental.

El cloruro de calcio es una sal inorgánica con la fórmula química CaCl₂. Es un sólido cristalino de color blanco a temperatura ambiente, altamente soluble en agua. Se obtiene a través de un proceso químico a partir del hidróxido de calcio, y no supone un proceso complejo; éste actúa como un elemento coadyuvante en conjunto con el desecante, pues tiene la propiedad de adsorción. Se puede crear neutralizando el ácido clorhídrico con hidróxido de calcio. El cloruro de calcio se encuentra comúnmente como un sólido hidratado con la fórmula genérica CaCl₂ (H₂O)_x, donde $x = 0, 1, 2, 4 \text{ y } 6$. Estos compuestos se utilizan principalmente para descongelar y controlar el polvo. Como la sal anhidra es higroscópica, se utiliza como desecante. La higroscopia es el fenómeno de atraer y retener moléculas de agua mediante absorción o adsorción del ambiente circundante, que generalmente está a temperatura normal o ambiente. Si las moléculas de agua se suspenden entre las moléculas de la sustancia, las sustancias adsorbentes pueden cambiar físicamente. Un cambio en el volumen, punto de ebullición, viscosidad u otra característica física o propiedad de la sustancia (National Center for Biotechnology Information; 2020).

Los beneficios de utilizar la montmorillonita activada con cloruro de calcio es que el desecante es químicamente inerte, no corrosivo y lo que es más importante, tiene una atracción por las partículas de agua. Su producción es menos costosa y requiere de menos recursos, (figura 7). Esto lo convierte en el recurso perfecto para redirigir el flujo de partículas de agua desde un artículo empaquetado hacia las bolsas desecantes que absorben la humedad. Los desecantes de arcilla que en este caso es la montmorillonita son el producto menos costoso y uno de los más rentables que utilizan las empresas para protegerse contra la humedad. Es eficaz en temperaturas no extremas contra ambientes relativamente húmedos. Para la disposición de la arcilla montmorillonita no se requiere de ningún trato especial, puede ser dispuesta en cualquier lugar, ya que es un producto cien por ciento natural, no es tóxico ni corrosivo. Si se utiliza el cloruro de calcio para mejorar las propiedades del desecante de montmorillonita se le puede dar el mismo trato pues es una sal inorgánica.

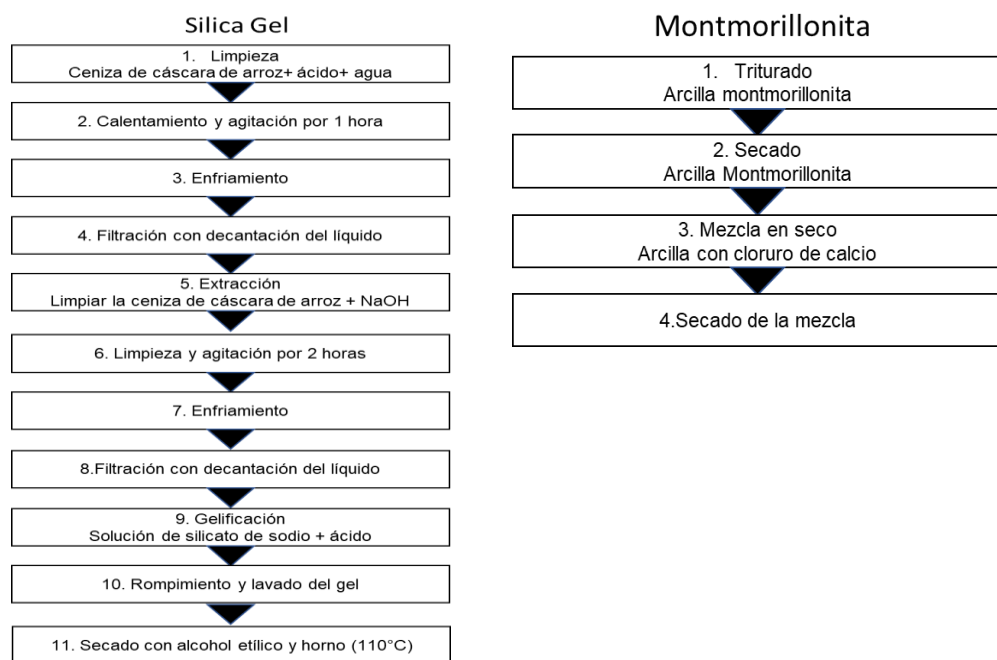


Figura 7. Comparativa del proceso de producción de desecantes, silica gel vs Montmorillonita.

CAPÍTULO IV. MARCO REFERENCIAL

La bentonita incluye los minerales del grupo de las esmectitas. La mayoría de las arcillas de esmectita tienen propiedades de montmorillonita. El nombre de Montmorillonita en realidad se le dio a una arcilla de esmectitas que se encontró en el área de Montmorillon en Francia. Las arcillas a menudo llevan el nombre de su ubicación. La bentonita fue originalmente nombrada por arcilla esmectita encontrada cerca de Fort Benton Wyoming. La mayoría de las esmectitas ahora se conocen como bentonitas o montmorillonitas (Perry, 2020).

Castrillo y colaboradores (2018), reportaron una modificación de una matriz de bentonita policationica por agregado de calcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), utilizando la vía húmeda de intercambio iónico. Los materiales compuestos se refirieron con el nombre de la bentonita, seguido del porcentaje en peso de Ca agregado. Así, por ejemplo, BR-1 representa un material preparado con la bentonita BR al que se agregó un 1 % Ca mediante intercambio iónico. Los porcentajes de calcio agregados guardaron relación con distintos porcentajes de CIC de BR. Para la modificación, se agregó a la arcilla sólida la solución de Ca^{2+} en sus respectivas concentraciones. Las suspensiones fueron agitadas durante 16 h a 25 °C. Posteriormente se realizaron lavados por centrifugación y se secaron a 70 °C. Los sólidos obtenidos se molieron y tamizaron pasante malla de 100. Con el objeto de determinar la cantidad de calcio retenido en la bentonita, se cuantificó dicho catión a partir de las fracciones sobrenadantes luego de los lavados. La cantidad incorporada por el sólido se calculó como la diferencia entre el total de calcio inicialmente añadido para realizar el intercambio y el que se observó en solución. Además, se realizó la corrección de las concentraciones con un blanco de muestra. Los datos permiten evidenciar que la cantidad de calcio

incorporado en la bentonita se mantiene prácticamente constante una vez alcanzado el equivalente al porcentaje de calcio necesario para compensar la CIC del material natural (2 % Ca).

Castrillo y colaboradores (2018), investigaron sobre la adsorción de vapor de agua en muestra natural y otra modificada, se observan las isotermas de adsorción de agua, entre 11- 98 % HR, de la bentonita natural y las modificadas (por agregado de calcio hasta un 2%). Las mismas indicaron una estrecha relación entre el poder desecante y el contenido de calcio en la muestra arcillosa, confirmando la posibilidad de aplicación de estas muestras como materiales adsorbentes de humedad. Para un valor dado de H.R., la adsorción aumenta con el porcentaje de calcio incorporado (figura 8). La mayor retención de las muestras modificadas se atribuyó a una mayor densidad de carga de los iones de Ca^{2+} , por lo cual fue mayor la interacción con las moléculas de agua, con relación a los otros iones de intercapa Na^+ y K^+ , los cuales fueron desplazados durante el intercambio. Asimismo, como consecuencia del alto calor de hidratación del ion $\text{Ca} (\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$

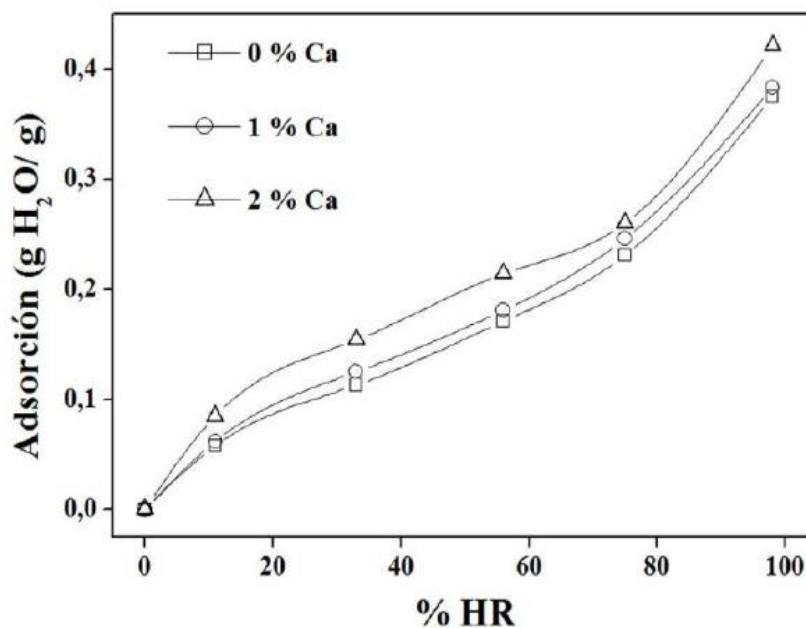


Figura 8. Isotermas de adsorción de vapor de agua de BR y para los distintos % Ca agregado. Tomado de Castrillo, Mercado, Volzone, 2018.

[24] en BR-Ca se indujo un aumento en el espacio interlaminar de la arcilla, lo cual coincide con los valores $d(001)$ determinados por DRX.”

Otros estudios han señalado mejoras en las propiedades de absorción de humedad al agregar cloruro de calcio a la arcilla bentonita, lo que supone que tiene una mayor capacidad de adsorción de humedad o vapor de agua del ambiente. En ese sentido, hay tres requisitos básicos para la selección de desecantes; en primer lugar, deben capturar el nivel máximo de humedad como los estándares. En un segundo lugar, el costo de la regeneración de los desecantes debe ser bajo, y finalmente, los desecantes deben ser baratos y requerir pequeñas cantidades. En ese sentido, recientemente se ha informado sobre las propiedades desecantes de varios tipos de arcillas (Thoruwa y colaboradores, 2000; Konukcu y colaboradores, 2007; Gonzalez y colaboradores, 2001; Bulut y colaboradores., 2009), centrándose especialmente en las propiedades de desecantes de arcillas de tipo bentonita y caolinita debido a su disponibilidad. Adicionalmente, se han llevado a cabo algunos estudios sobre sepiolita debido a su singularidad (Caturla *et al.*, 1999).

Algunos investigadores mostraron que ciertos los desecantes / reactivos mezclados con arcillas aumentan su capacidad de absorción de humedad en un rango de HR más amplio (González y colaboradores, 2001; Thoruwa y colaboradores, 2000; Chen y colaboradores, 2008; Bulut y colaboradores, 2009). Una investigación realizada por Bulut *et al.* (2009), indicaron que la capacidad de adsorción de humedad de bentonita aumentó sustancialmente mezclándolo con calcio cloruro. Thoruwa y colaboradores (2000), también reportaron resultados similares. El cloruro de calcio es un desecante ampliamente utilizado en la industria (Ausikaitis, 1979), pero rara vez se usa como controlador de humedad porque se convierte en una fase líquida. Este inconveniente se puede evitar si la solución se mezcla con un material poroso como la sepiolita. De este modo, la

humedad retenida por el cloruro de calcio se puede transferir a sepiolita, que luego puede retener una gran cantidad de agua por adsorción o absorción (Gonzalez *et al.*, 2001). La retención del agua por la mezcla de los dos materiales es aditiva, impartiendo así la capacidad de la sepiolita para actuar como un controlador de humedad.

Castrillo y colaboradores (2018), reportó la aplicabilidad la producción de matrices de sepiolita obtenidas de la región de Eskişehir de Turquía. Para efectos de dichos ensayos se adicionó cloruro de calcio, lo cual permitió una adsorción más rápida y supuso un beneficio práctico. La manera en la que actúa el cloruro de calcio es atrayendo las moléculas de agua hacia la matriz, ya que la humedad del ambiente no está en equilibrio con el cloruro de calcio, al no estarlo lo que sucede es que absorbe el agua por su capacidad higroscópica. El beneficio de la combinación de cloruro de calcio y arcilla montmorillonita es que la arcilla por sus propiedades naturales absorbe la humedad, lo que significa que introduce a su molécula el agua a diferencia del cloruro de calcio que adsorbe el agua la mantiene en su superficie, entonces si esta sal y arcilla se combinan se logran los resultados deseados, por una parte el cloruro de calcio adsorberá la humedad del ambiente y la arcilla la absorberá, logrando así un desecante con mejores características. La arcilla montmorillonita ya es por si sola un desecante de humedad natural cuando pasa por un proceso de secado, sin embargo, el beneficio que trae el agregado de cloruro de calcio es la velocidad de absorción de humedad del ambiente; dependerá de la aplicación que se le quiera dar al desecante, si se requiere una absorción rápida de humedad del ambiente entonces se tendrá que incrementar el porcentaje de cloruro de calcio en el producto terminado, por el contrario, si no hay necesidad de absorber tan rápido la humedad entonces se podrá disminuir la concentración de cloruro de calcio en el producto terminado.

Se puede mejorar aún más las capacidades de absorción, pero supone un proceso adicional donde se active la arcilla montmorillonita cuando sea sumergida y disuelta en una solución de cloruro de calcio, donde ocurre un intercambio catiónico, que permite que la molécula de la arcilla montmorillonita quede cargada electronegativamente gracias al cloruro de calcio y que se mejore sustancialmente la absorción y adsorción de agua. Lo anterior es importante para la presente investigación ya que confirma que la utilización de calcio en desecantes supone una mejora importante al momento de la adsorción y absorción de agua. Lo que no menciona es la especie química de cloruro de calcio que se debe utilizar, sin embargo, se sabe que para el uso que se le quiere dar será conveniente utilizar cloruro de calcio anhidro, ya que se requiere que haya pasado por un proceso de ebullición y no presente moléculas de agua asociadas. Precisamente es lo que le da la característica higroscópica que se busca. Se puede decir que es el cloruro de calcio deshidratado. (Castrillo *et al*, 2018).

El CaCl_2 seco se añadió a muestras de sepiolita sin humedad y mezcladas mecánicamente. Se realizaron estudios sistemáticos para determinar la mayoría tiempo de subida adecuado antes y después de la activación térmica a 200°C por 4 horas. El aporte de esta investigación es la referencia que hace a la mezcla de arcillas y cloruro de calcio. El cloruro de calcio al ser un material con mayor higroscopía permite captar más humedad del ambiente y la sepiolita permite capturar esa humedad. Ya que el cloruro de calcio se satura y en la superficie tiene agua, lo que le permite a la sepiolita absorber este exceso de agua. Se menciona que se realiza una mezcla en seco entre una matriz de sepiolita, que es una arcilla del grupo de los filosilicatos y el cloruro de calcio, por lo que sirve de antecedente en la realización de la mezcla de la arcilla montmorillonita y cloruro de calcio en seco y en solución. Dichos resultados llegan a la conclusión de que el tratamiento térmico que recibe la sepiolita le permite absorber la mayor cantidad de humedad cuando las

condiciones son de 50% de humedad relativa por 24 horas a una temperatura de entre 200° C y 300° C. La adición del 5% de cloruro de calcio le permite a la de sepiolita absorber un 20% más de humedad relativa y casi un 30% cuando se le adiciona 10% de cloruro de calcio. Este estudio revela que el cloruro de calcio cuando está en condiciones de humedad relativa iguales o mayores al 33% comienza a cambiar su estado físico y se torna líquido (Çınar *et al*, 2010).

Bulut y colaboradores (2009), realizaron estudios sobre la producción de desecantes con bentonitas turcas. Las bentonitas se pueden clasificar en bentonita cálcicas y sódicas. La diferencia entre bentonita y montmorillonita radica en una posible diferencia de contracciones de minerales presentes. Para este experimento se utilizaron tres tipos de bentonitas con diferentes tipos de concentración y de distintas regiones, la primera que se utilizó fue una bentonita cálcica, la segunda una combinación de cálcica y sódica y la tercera sódica. Se presentaron las distintas concentraciones que se utilizaron de cloruro de calcio, los tiempos de secado, temperatura y los porcentajes que se absorbieron. En conclusión, la mejor bentonita para la producción de desecantes fue la bentonita cálcica, tuvieron una absorción para la bentonita cálcica con un secado de 150°C por 24 horas y en una cámara de humedad a 50% de H.R. a 25°C por 24 horas, absorbió 17.2 % del peso de la muestra en agua.

La empresa Symbol Technologies LLC ha descrito la creación de un arreglo de desecante para un producto de cómputo, en el cual se utilizó un desecante que se pudiera reemplazar, por ejemplo, la montmorillonita, la silica gel, la malla molecular o algún otro tipo para proteger un elemento óptico que previene la acumulación de humedad en el interior del dispositivo. En dicho estudio se incluyó una carcasa sellada, un elemento óptico que tenía al menos una superficie sustancialmente plana interna a la carcasa sellada y un desecante que eliminara la humedad del

aire dentro de la carcasa sellada para evitar la acumulación de humedad (United States Patente n° US20080006010A1, 2006).

Montes-H y Geraud (2004), mencionaron frecuentemente que las bentonitas también son recomendadas como agente desecante o como deshidratador de gases, debido a su excelente capacidad para adsorber vapor de agua. Este proceso implica exponer el material desecante a una humedad relativa alta. En estas condiciones, una porción de agua el vapor es eliminado por el desecante. La adsorción de agua los fenómenos en las bentonitas es un proceso muy complejo por sus propiedades textural y fisicoquímicas. La deshidratación desecante sólida es un proceso de adsorción, donde las moléculas de agua están unidas por fuerzas superficiales en el agente desecante. Se usó una Na / Ca-bentonita (arcilla comercial) para el estudiar. La bentonita contiene montmorillonita (80%), cuarzo (6%), feldespatos K (2%), plagioclasas (4%), carbonatos (4%), mica (3%) y otros minerales (1%).

En el estudio de Montes-H y Geraud (2004), trataron muestras a granel de bentonita MX80 por separado; con cinco soluciones concentradas (concentración 1N) de cloruros de sodio, litio, calcio, magnesio y potasio. Todas las sales tuvieron la misma fuerza iónica ($I = 2$). Se dispersaron veinte gramos de bentonita MX80 en 1 litro de solución salina (1N) a 60 ° C. Esta suspensión fue vigorosamente agitada con agitación magnética durante 1 hora a 60 ° C. Luego, la arcilla saturada de cationes se separó por centrifugación a 15 min y 13,000 rpm. Se decantó el sobrenadante. Este proceso se repitió tres veces. La bentonita saturada de cationes se lavó luego de tres a cuatro veces con agua destilada. La bentonita saturada de cationes se secó posteriormente para 48 h a 60 ° C y finalmente molido durante dos minutos. Las muestras obtenidas fueron etiquetadas MX80-Na, MX80-Li, MX80-Ca, MX80-Mg y MX80-K. La cinética de sorción del vapor de agua depende

directamente del peso de la muestra la cantidad de agua adsorbida en una muestra en función de tiempo, se calculó utilizando la siguiente fórmula; en dónde W representa el peso de la muestra húmeda, en wt es el peso (g) en un tiempo instantáneo (t) y (ws) representa el peso en seco de la muestra (figura 9). Para la figura 9, inciso A, la “ d ” representa la mitad de desadsorción en un tiempo (t) y en la figura 9, inciso B, la “ b ” representa la mitad de adsorción en un tiempo (t).

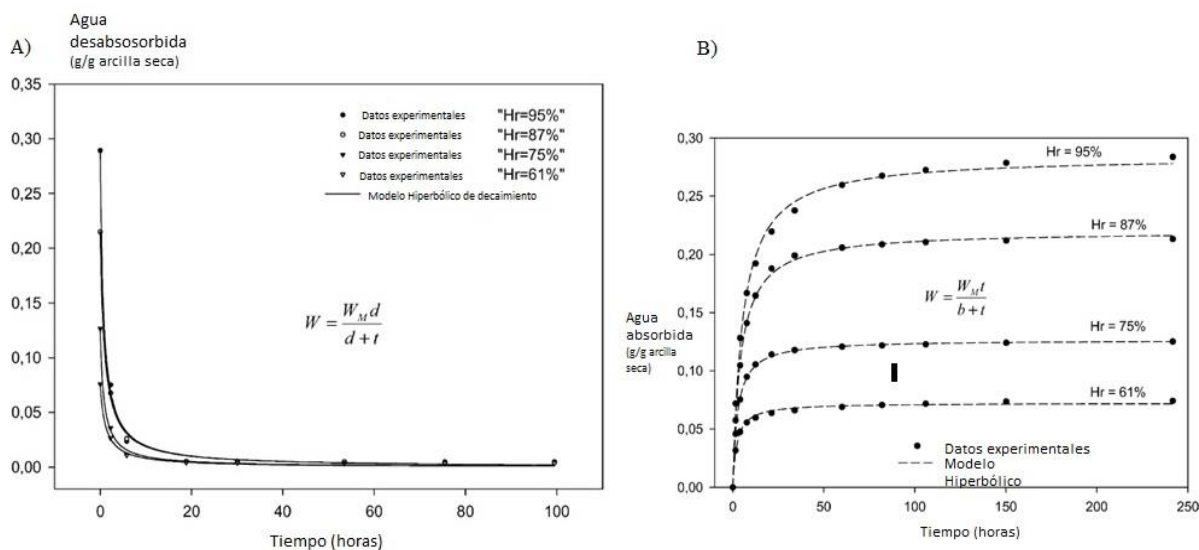


Figura 9. Datos experimentales y curvas de ajuste. A) Cinética de desadsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 a cuatro humedades relativas. Decaimiento del modelo hiperbólico. B) Datos experimentales y curvas de ajuste. Cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 a cuatro humedades relativas. Tomado de Montes-H y Geraud, 2004.

$$W = \frac{wt - ws}{ws}$$

La cinética de sorción del vapor de agua de un desecante sólido depende de numerosos factores como la composición química, la textura, las propiedades fisicoquímicas, etc. En este ensayo, las variables físicas (humedad relativa, cantidad de la muestra y temperatura de secado de la muestra), químicas (catión entre capas) y mecánicas (densidad física "compactación mecánica")

se consideraron como parámetros dentro de la cinética de sorción del vapor de agua de MX80 bentonita (figura 10).

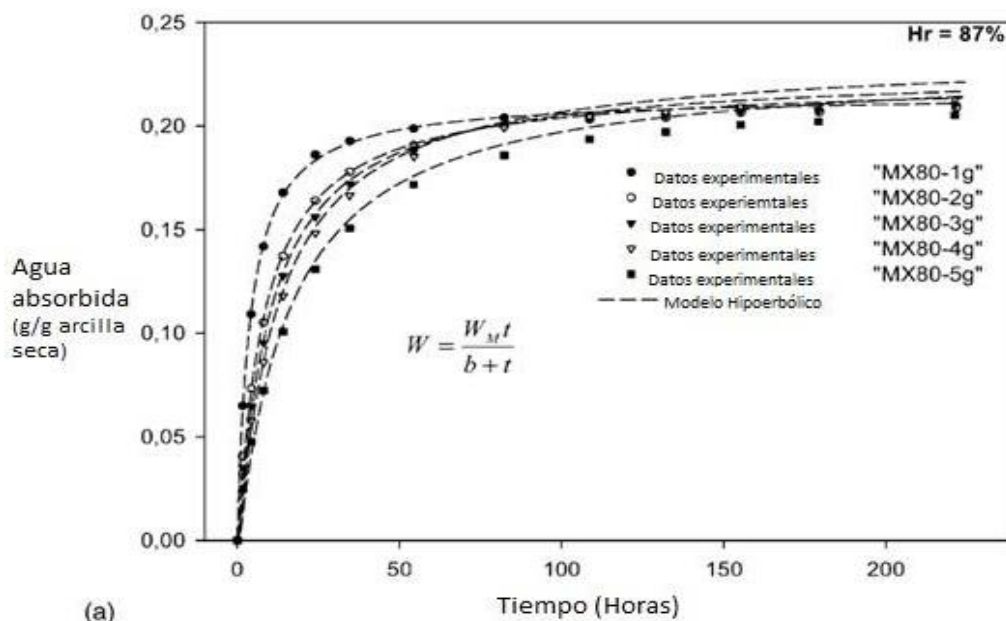


Figura 10. Cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 en función de la cantidad de la muestra. (a) Datos experimentales y curvas de ajuste "modelo hiperbólico" (Montes-H y Geraud, 2004).

La cinética de adsorción de vapor agua de la bentonita MX80 dependió directamente de la capa interciónica (figura 10). Aquí, la cantidad máxima de agua adsorbida o W_m fue más significativa en las muestras que presentaban el catión entre capas (Na y Li). En contraste, la cantidad máxima de agua adsorbida fue menos significativa para la bentonita saturada de K. La bentonita saturada de Ca y Mg presentó un comportamiento similar sobre la cinética de adsorción del vapor de agua. De hecho, la cantidad máxima de agua adsorbida W_m entre estas muestras estaba muy cerca. Respecto a la velocidad de adsorción de vapor de agua, se observó que el calcio y las muestras de bentonita saturadas con magnesio alcanzaban más rápidamente equilibrio de

adsorción y que el tiempo medio de adsorción estimado fue menor que la mitad del tiempo de adsorción estimado para las muestras de bentonitas saturadas con Li, Na y K, (figura 11).

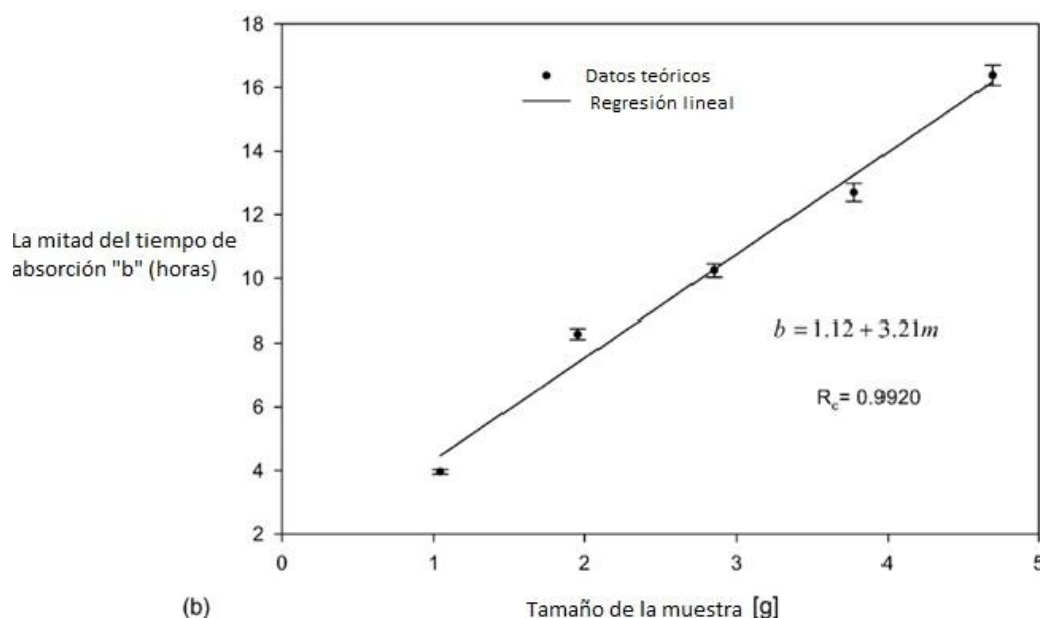


Figura 11. Cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 en función de la cantidad de la muestra (b) "b" tiempo de media adsorción y cantidad de correlación de muestra "modelo lineal". Tomado de Montes-H y Geraud, 2004.

El estudio cinético de Montes-H y Geraud (2004) permitió concluir que la cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80 dependió directamente de la humedad relativa, El catión entre capas y la cantidad de la muestra. Por el contrario, la compactación mecánica solo influyó ligeramente en la cinética de adsorción de agua de la bentonita MX80 excepto por el primer estado de compactación mecánica (21MPa); lo que produjo un aumento significativo de tiempo promedio de sorción. Después del primer estado de compactación mecánica, el tiempo promedio de sorción aumentó ligeramente con la compactación mecánica.

Finalmente, la cinética de adsorción de vapor de agua fue modificada por la temperatura de secado de muestra, cuando ésta es muy alta (por ejemplo, a 500 °C). Los modelos cinéticos de

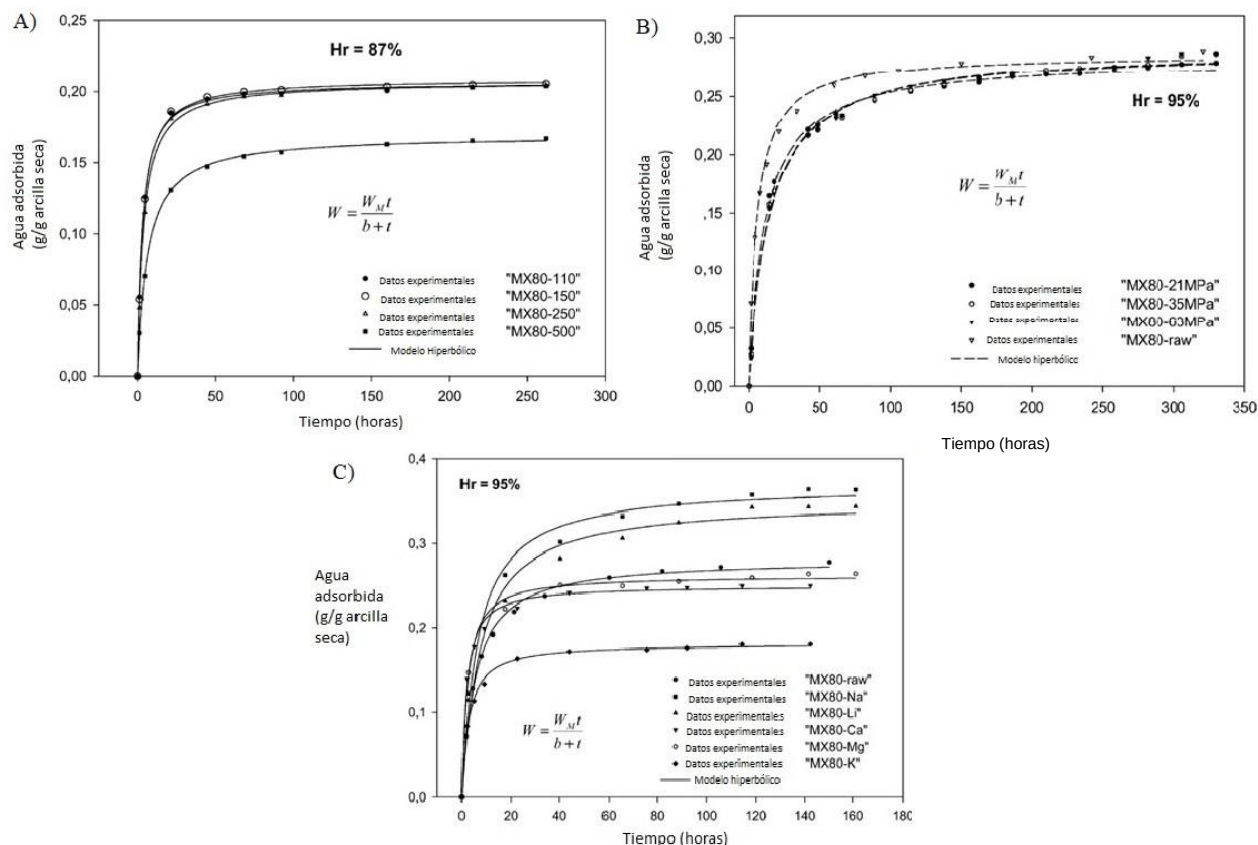


Figura 12. Datos experimentales y curvas de ajuste modelo hiperbólico. A) Influencia de la temperatura de secado de la muestra en la cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80. B) Influencia de la compactación mecánica en la cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80. C) Influencia del catión entre capas en la cinética de adsorción del vapor de agua de la bentonita MX80. Tomado de Montes-H y Geraud, 2004.

segundo orden aquí considerados describen la adsorción de vapor de agua (modelo hiperbólico), y desorción de vapor de agua (modelo hiperbólico de descomposición) ajustado a los datos experimentales.

El aporte es de gran importancia, ya que realizaron numerosos experimentos fisicoquímicos y mecánicos con arcilla bentonita por lo que ampliaron el conocimiento sobre las propiedades de

las arcillas. Ahora bien, a medida que aumenta la humedad en el ambiente también aumenta la absorción de la arcilla, se observa que en un tiempo aproximado de 24 horas se presenta la mayor saturación de humedad independientemente de la humedad relativa del ambiente y a las 50 horas se observa un comportamiento casi plano (figura 12). Por otro lado, se observa que los tiempos de desabsorción son menores que los de absorción (figura 10), a las 10 horas en un ambiente de 0% de humedad se observa que se pierde la mayor cantidad de agua y después presenta un comportamiento constante.

De manera adicional Montes-H y Geraud (2004), explicaron que entre más cantidad de desecante en gramos haya, mayor será el tiempo que se tardará en absorber la humedad en las condiciones definidas (figura 10). El tiempo y temperatura de secado afectan directamente a la cantidad de humedad que puede absorber la arcilla. Por otro lado, en las temperaturas que van desde los 110°C a 250°C no se observa una diferencia significativa en la absorción de humedad, pero si hay un cambio contraproducente cuando la temperatura se eleva, como lo hace el estudio al secar la arcilla a una temperatura de 500°C por 24 horas. La adición de distintos químicos mejora las propiedades de adsorción de la arcilla, esto es la saturación de cationes. El experimento consistió en dispersar 20 gramos de arcilla en una solución de un litro con las siguientes sales: sodio, litio, calcio, magnesio y potasio. Posterior a una agitación a 60°C por una hora y tres ciclos de lavado de arcilla. Los resultados mostraron que las sales que absorben mayor cantidad de humedad son sodio y litio, que son las sales con menor tamaño de cationes entre capas. Y el que menos absorción tuvo fue el potasio. El calcio y magnesio presentan un comportamiento similar, y aunque no son las sales que absorben más cantidad de vapor de agua, son las sales que más rápido absorben la humedad.

La compactación mecánica de las arcillas en una prensa a distintas presiones mostró que no hubo una diferencia significativa en la capacidad de absorción de humedad de éstas, excepto a una presión mayor de 21 MPa, ya que aumentó al doble el tiempo de absorción de vapor de agua por la arcilla, por lo que no resulta conveniente modificar la estructura de la arcilla de forma mecánica (Montes-H y Geraud, 2004).

En la investigación de Volzone y Ortega (2004), explicaron como saturaron una matriz de montmorillonita con diferentes cationes, fue preparada en una suspensión de 15 g en una muestra de 1000 ml de 2N solución de cloruro de Na^+ , K^+ , H^+ , Ca^{2+} , y Al^{3+} , por 24 horas. El sobrenadante fue separado y los tratamientos con sales fueron repetidos tres veces. El exceso de sales fue removido lavando repetidamente con agua destilada hasta conseguir por medio de una prueba un AgNO_3 negativo, esto indica que ya no hay presencia de cloruro. El espacio de la intercapa, el espacio basal o $d(001)$ espaciado de la montmorillonita es medido desde la parte superior desde la capa tetraédrica del silicio Si (T) hasta la parte superior de la siguiente capa tetraédrica del silicio

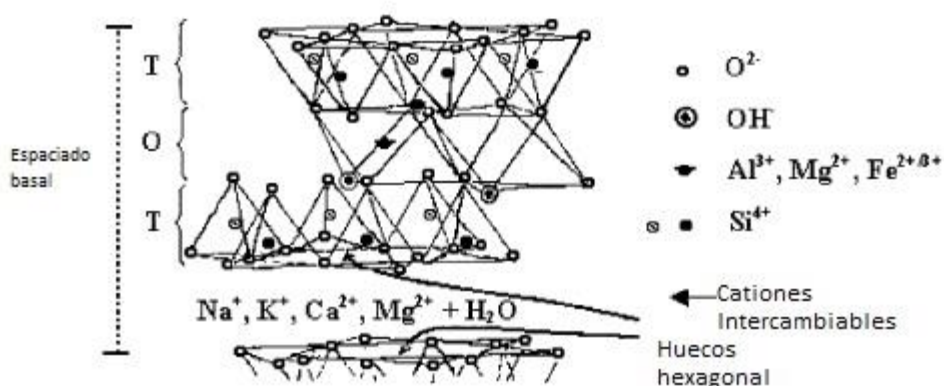


Figura 13. Estructura de montmorillonita. T, lámina tetraédrica; O octaédrico. Tomado de Volzone y Ortega, 2004.

(figura 13). La diferencia del espaciado basal de la montmorillonita es una función de saturación de las características de los cationes en las intercapas.

Un espaciado d (001) medido a $13.5\text{\AA}$ corresponde a una monocapa de agua que contiene iones Ca^{2+} y están coordinados de seis a ocho moléculas de agua en el centro de la región intercapa y el valor de $16.9\text{\AA}$ para Ca-M (tabla 4), puede indicar que hay un espacio disponible para acomodar dos capas de moléculas de agua. Baksh y Yang (1992) mostraron que la cantidad de adsorción de gas depende del tamaño de la molécula del gas y las características fisicoquímicas de los adsorbentes como arcillas, zeolitas, carbono, etc; (tabla 5).

Tabla 4. Espaciado basal y área de superficie BET montmorillonitas sin tratar y homoiónico (Volzone y Ortega, 2004).

Muestra	Espaciado $d(001)$ H.R. 55%, $\text{\AA}$	Espaciado $d(001)$ secado a 100°C , $\text{\AA}$	Area superficial BET, m^2g^{-1}
M	13.2	9.73	26
H-M	15.6	12.78	60
Na-M	13.5	9.88	33
K-M	12.2	10.4	56
Ca-M	16.9	12.21	50
Al-M	14.62	10.31	48

Los valores más altos de adsorción de gas por montmorillonitas podrían ser obtenido por tratamientos ácidos, inorgánicos u orgánicos. Lo anterior amplía el panorama para los usos de la arcilla montmorillonita, ya que no solo es eficaz para la absorción y adsorción de agua o vapor de agua del ambiente, sino que con diferentes tratamientos con distintas sales le daría la posibilidad de absorber otros gases. En el estudio se menciona que con la adición los iones de calcio en las

intercapas de la molécula de montmorillonita permiten la adición de dos moléculas de agua. Para eso va a ser importante la activación de ésta como lo menciona el estudio, hasta tres repeticiones para la adición de sales y realizar lavados con agua destilada para eliminar los cloruros que, en este caso, en la práctica la adición sería con cloruro de calcio, para después realizar una prueba con nitrato de plata y de ser negativa la prueba, sin cloruro, se daría por terminado el proceso. A manera de perspectiva, se pueden hacer pruebas con otras sales para ver el comportamiento que presentan, adicional a las sales con las que se experimenta en esta prueba (Volzone y Ortiga, 2004).

Tabla 5. Adsorción de gas y relación de adsorción de gas por montmorillonitas monoiónicas y no tratadas a 25 C y 0.1Mpa. Volzone y Ortiga, 2004.

Adsorción de gas mmol g ⁻¹						Razón de adsorción de gas		
Sample	N ₂	O ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₂	CO ₂ /N ₂	C ₂ H ₂ /N ₂
M	0.071	0.07	0.07	0.083	0.162	0.174	2.28	2.45
H-M	0.068	0.076	0.08	0.085	0.208	0.218	3.06	3.2
Na-M	0.071	0.07	0.077	0.086	0.17	0.186	2.39	2.61
K-M	0.068	0.073	0.078	0.082	0.193	0.211	2.84	3.1
Ca-M	0.078	0.076	0.077	0.083	0.181	0.194	2.32	2.49
Al-M	0.074	0.075	0.075	0.084	0.174	0.191	2.35	2.58

La empresa Desiccare Inc. (2002), patenta un sistema de desecantes utilizando por lo menos el 30% de arcilla montmorillonita, 22% de cloruro de calcio, tierra de diatomeas y el uso de Tyvek para los empaques de desecantes. Dicho sistema comprende un material desecante sellado en una bolsa hecha de un material, mayoritariamente de lámina de poliolefina unida por hilatura, que es permeable al vapor de agua e impermeable al agua líquida y a las partículas. Un indicador de humedad asegurado a una superficie externa de la bolsa detecta el nivel de humedad dentro de ésta y señala por viraje de color, cuando la capacidad de adsorción del material desecante se agota y el sistema de desecante que adhiere humedad debe desecharse y reemplazarse. El material desecante

puede incluir perlas de plástico agradablemente perfumadas (United States Patente n° US6716276B2, 2002).

En el estudio de Thoruwa y colaboradores (1999), se describió una nueva composición de un desecante que contenía cloruro de calcio y almidón modificado, posiblemente almidón de maíz modificado. La composición presentaba aproximadamente entre 5 a 95 por ciento de calcio y de 5 a 95 por ciento de almidón. El cloruro de calcio de grado comercial es ampliamente utilizado como desecante debido a su bajo costo y un alto grado de higroscopía. El cloruro de calcio compactado en forma de partículas o perlas se usa como agente de secado. Uno de los problemas en la utilización de cloruro de calcio como agente desecante es que, cuando se absorbe el agua, forma una mezcla líquida en la superficie del cloruro de calcio. Aparte de la mezcla física de los materiales, no es necesario un procesamiento adicional para composición de cloruro de calcio / almidón. Esta simple mezcla de los dos materiales produce una composición desecante con gran utilidad. Esta patente sirvió de referencia pues, menciona los materiales utilizados que fueron el cloruro de calcio, el almidón de maíz modificado y los tipos de envase. Conocer exactamente estos productos ha permitido ampliar la visión de los tipos de desecantes. La formulación que se utilizó ha servido de referencia para comparar los desecantes que se quieran producir y tener como objetivo igualar y/o mejorar los resultados obtenidos en los experimentos que presenta.

Algo que resulta interesante es la utilización de diferentes productos para la absorción de humedad, en este caso el almidón para la absorción del agua que se forma en la capa superficial del cloruro de calcio, en el caso de utilizar arcilla montmorillonita, se tienen los tamaños de partículas utilizados por la especificación militar Mil-d-3464, pero es pertinente realizar experimentos con la granulometría para ver si mejoran las capacidades de absorción de humedad.

Otra variable observada es el tiempo que dejan los desecantes en una cámara con temperatura y humedad constante, se menciona que dejan las muestras hasta dos o tres meses para replicar condiciones como las que se tienen en los contenedores en altamar (United States Patente nº US 6,217,701 B1, 2001 Desiccant composition).

Thoruwa y colaboradores (1999), mencionaron en su estudio que el secado con aire calentado por energía solar es satisfactorio siempre que brille el sol. Para continuar esto el proceso a través de la noche y los períodos de cobertura de nubes es necesario almacenar parte de esta energía en una masa térmica o incorporar desecantes dentro del sistema de secado. Este documento informa los resultados de los estudios realizados para desarrollar tres bajos costos, solar arcilla regenerativa $\pm$ materiales desecantes sólidos basados en CaCl_2 ; establecer su absorción de humedad y características de regeneración; evaluar su desempeño en comparación con los desecantes comerciales e integrar estos dentro de un sistema de secado solar de bajo costo para una aldea, a pequeña escala para secado de cultivos. El rendimiento de absorción y desabsorción de humedad de los desecantes se caracterizaron en un gabinete ambiental Fison en condiciones de 85% (H.R.) y 25°C durante 120 horas para sorción de humedad y 50°C y 20% (H.R.) durante 8 horas para regeneración. Estas condiciones eran representativas de las condiciones ambientales monitoreadas en el sistema solar de secado. El desecante de bentonita $\pm$ CaCl_2 (tipo 1) dio la máxima absorción de humedad de 45% en peso seco (dwb) mientras que bentonita $\pm$ CaCl_2 (tipo 2) y caolinita $\pm$ CaCl_2 (tipo 3) cada uno de los desecantes sólidos dio valores de absorción de humedad del 30% (dwb). Se concluyó que las características de absorción y regeneración de secado y deshumidificación por aire son muy útiles debido a sus bajas temperaturas de regeneración, sub-100°C.

Thoruwa y colaboradores (1999), explicaron como la utilización del cloruro de calcio (CaCl_2) beneficia de manera directa la humedad captada del ambiente con los desecantes a base de arcilla bentonita que, en este caso son secadores a base de calor y luz solar. Estos secadores son principalmente para las zonas rurales y secan los cultivos absorbiendo las micotoxinas, por las características de la matriz de montmorillonita se ajusta perfectamente a esta aplicación ya que al estar cargado electronegativamente atrae las partículas electropositivas como lo son las micotoxinas y aflatoxinas. Las razones para utilizar los desecantes de arcilla activados con cloruro de calcio respecto a la silica gel son cuatro; el costo, la arcilla y el cloruro de calcio son elementos que se encuentran en la naturaleza y no necesitan mucho procesamiento industrial a diferencia de la silica gel que es un proceso totalmente industrializado y complejo; lo que convierte a los desecantes de arcilla activados en un método más seguro. Además, que las veces que se puede reutilizar la matriz activada sin que pierda sus propiedades es mayor, pues según el estudio su durabilidad es de hasta un año en las condiciones que someten estos desecantes. La efectividad, para la utilización por largos periodos se recomienda utilizar desecantes a base de arcilla activada

ya que como muestra el estudio en un tiempo de 120 horas aproximadamente absorbe hasta un 45% de su peso en agua y la silica gel absorbe hasta un 30%. Procesar la silica gel genera mayor impacto ambiental en comparación con la arcilla activada. Se concluye que la arcilla activada con cloruro de calcio es mejor y más barato (figura 14).

Los desecantes se pueden usar junto con la energía solar para proporcionar una alternativa viable a las técnicas tradicionales de aire acondicionado. Durante la sorción, se probaron temperaturas del aire de entrada de 23°C a 36°C con humedades relativas correspondientes de 42-66%. Además, del aire superficial, se probaron velocidades de 0,17 a 0,85 m/s. Durante la desorción, las temperaturas del aire de entrada de 50°C a 57°C y las velocidades del aire superficial de Se probaron aproximadamente 0,30 y 0,60 m/s. Se determinó una ecuación de regresión para la

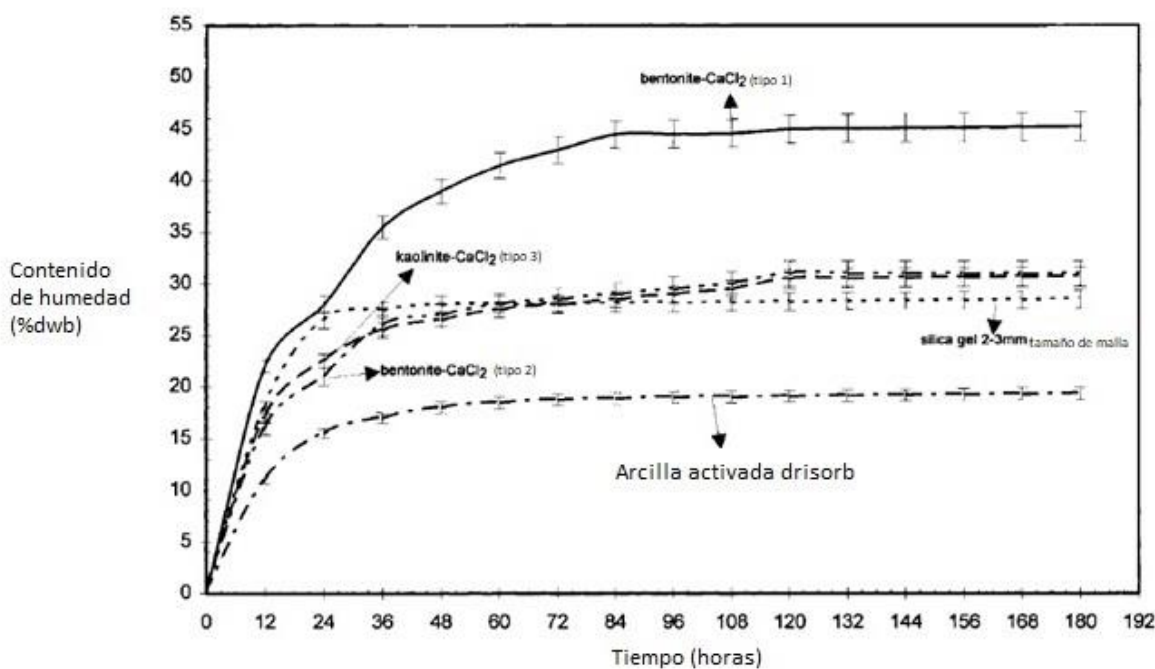


Figura 14. Comparación de absorción de humedad entre desecantes desarrollados y comerciales. Tomado de Tretiak y Abdallah, 2009.

masa de agua absorbida por la arcilla- CaCl_2 desecante con un valor R^2 de 0.917. Los datos de desorción se regresaron a una función exponencial y se determinaron valores k significativos. Se determinó una ecuación para la caída de presión a través del desecante y se comparó con los modelos existentes. Se encontró que el desecante funcionó bien durante los ciclos repetidos de prueba, aunque se perdieron pequeñas masas de desecante debido a la desintegración de la superficie del desecante.

Los autores determinaron que los desecantes tenían sorciones de humedad máximas que varían de 30 a 45% y fueron comparables a desecantes comerciales disponibles a un costo de producción estimado de 1/9 de la de un desecante de gel de sílice. Más de un año de pruebas, uno de los desecantes probados de arcilla- CaCl_2 no tenía ninguna disminución sustancial en el rendimiento o la integridad estructural. El desecante utilizado en estos experimentos estaba hecho de un 3:1 (en peso) de mezcla de arcilla comercial de caolín y vermiculita, respectivamente. Se agregó agua y la mezcla se moldeó en esferas de arcilla de aproximadamente 16,5 mm que luego fueron secadas y cocidas.

Thoruwa y colaboradores (1999), realizaron una ecuación de regresión que detalla la masa de agua sorbida y se determinó con respecto a múltiples predictores. Se encontró que esta ecuación era altamente significativa con respecto a todas las variables predictoras. Cuando el caudal se duplicó de 0.2 a 0.4 m/s, la cantidad de humedad absorbida también se duplicó. La diferencia en la cantidad total de humedad absorbida entre las tasas de flujo disminuye a medida que la tasa de flujo es aumentada. Por lo tanto, para el desecante de arcilla- CaCl_2 probado, aumentando o disminuyendo el contenido de humedad del aire no afectaría mucho la cantidad de humedad

sorbido en el rango de condiciones probadas. Por otro lado, cambiar el caudal tiene un gran efecto sobre la humedad.

Thoruwa y colaboradores (1999), desarrollaron un desecante de arcilla- CaCl_2 para su uso en un ambiente residencial. Las pruebas de sorción y desorción fueron ejecutadas en el desecante y las ecuaciones se determinaron para la cantidad de agua sorbida y desorbida. La adsorción y modelos de desorción desarrollados para calcular valores de masa cercanos a datos masivos registrados usando una celda de carga y la diferencia en propiedades del aire. Una ecuación para la caída de presión a través del desecante también se determinó y comparó con el existente modelo. Debido a los repetidos experimentos de sorción / desorción, la superficie de las esferas desecantes comenzó a descomponerse, pero la estructura general del desecante permaneció intacta.

Se menciona que se pueden hacer desecantes a base de arcilla y cloruro de calcio. En este estudio se utilizó una arcilla llamada vermiculita, caolín y cloruro de calcio para hacer estudios de absorción de humedad. Resultó que efectivamente absorbe entre 30% y 45% de su peso en agua, igual o más efectivo que la silica gel y a un costo de 1/9 de la silica gel. El estudio reveló que los desecantes absorben la humedad que hay en el ambiente de forma lineal, sin embargo, si se hace pasar una corriente de aire por el desecante de humedad se aumenta significativamente la absorción de humedad, tanto así que si se duplica el flujo de aire como en el estudio se duplica la absorción de humedad del ambiente (Thoruwa *et al*, 1999).

Los volúmenes de microporos de 2 montmorillonitas (SAz-1 y SWy-1), cada uno intercambiado con iones Ca, Na, K, Cs y tetrametilamonio (TMA), se calcularon a partir de los datos medidos de adsorción de vapor de N_2 (Nitrógeno) y mediante el uso de t- y un α -plots. Las áreas de superficie correspondientes de las arcillas de neohexano intercambiadas se determinaron

a partir de gráficos de Brunauer Emmett-Teller (BET) de datos de adsorción de N₂. El 2,2-dimetilbutano, llamado de modo tradicional como neohexano, es un alcano de fórmula química C₆H₁₄, o bien (H₃C)₃C-CH₂-CH₃. Es el isómero estructural del hexano más compacto y ramificado, y el único con un carbono cuaternario y esqueleto de butano (IUPAC, 2020).

Las interacciones de los vapores de baja polaridad con los coloides del suelo y los minerales arcillosos se rigen en gran medida por las porosidades de los sólidos, que se reflejan en sus áreas de superficie BET calculadas utilizando gases inertes. Brevemente, el gráfico BET permite la determinación de la capacidad estadística de monocapa de un adsorbato de referencia en el sólido, que luego se usa junto con el área molecular del adsorbato para determinar el área de superficie del sólido. Para los sólidos relativamente no porosos, el método BET proporciona medidas precisas de las superficies disponibles, mientras que las áreas medidas para los sólidos microporosos están sujetas a incertidumbres debido a la aparición de poros en la adsorción de vapor. No obstante, el área BET sirve como referencia útil para la porosidad del sólido. Mientras que las áreas de superficie BET calculadas de las arcillas relativamente monoiónicas reflejan las diferencias en sus porosidades totales (Aylmore y colaboradores 1967), se requieren métodos analíticos más directos para los volúmenes de sólidos de microporos. El método t de Boer y el método α de Sing (1969) se han usado comúnmente para calcular el volumen de microporos a partir de los datos de adsorción de vapor. En el diagrama t de Boer y colaboradores (1969), el volumen de N₂ adsorbido (V) se traza contra el espesor estadístico (t) de la capa de N₂ adsorbida para producir los volúmenes de microporos y las áreas de superficie no porosas de los sólidos sobre la base de eso (Remy y Poncelet, 1995);

$$V = V_m + 10^{-4} S_0 t$$

donde V es el volumen total de N_2 adsorbido (cm^3/g), V_m es el volumen de N_2 adsorbido en los microporos (cm^3/g), a_s es el área de superficie no porosa del sólido (m^2/g), t es el espesor estadístico de la capa de N_2 adsorbido ($\text{\AA}$), y 10^{-4} es un factor de conversión. El valor de t en función de p / p_o se obtiene de los resultados en un sólido de referencia. Se ha establecido una curva t universal de N_2 en sólidos no porosos (de Boer *et al*, 1969), que proporciona:

$$t = \left[\frac{13.99}{0.034 - \log \left(\frac{p}{p_o} \right)} \right]^{0.5}$$

donde t está en $\text{\AA}$. Si la gráfica de V versus t da una línea recta que pasa por el origen, el sólido de prueba se considera libre de microporos. Para un sólido de prueba microporoso, la gráfica t muestra una línea recta en t alta y una curva cóncava hacia abajo en t baja; la extrapolación de la línea superior a $t = 0$ da una pendiente de S_o y una intersección de V_m . El diagrama α_s es una versión alternativa del diagrama t . En este método, la cantidad adsorbida en algún p / p_o fijo de un vapor (no polar) en una muestra de referencia no porosa se normaliza primero a eso en $P / P^o = 0.4$ ($\alpha_s = Q / Q_{0.4}$, donde Q es la absorción de vapor).

A diferencia de la fórmula para t , la aplicabilidad de la gráfica α no se limita al uso de datos N_2 . Esto permite que se construyan gráficas de ecualización separadas a partir de los datos de adsorción respectivos de N_2 y neohexano en todas las arcillas con intercambio catiónico. El gráfico α ofrece una ventaja particular en la evaluación de la microporosidad de una arcilla intercambiada según la detección de vapores no polares de diferentes tamaños moleculares. Si se produce un tamizado molecular para adsorbentes grandes, pero no para adsorbentes pequeños, cabría esperar que se reduzca la microporosidad basada en el primero.

Rutherford y colaboradores (1997), usaron reactivos de grado CaCl_2 , NaCl , KCl , CsCl y bromuro de TMA para preparar las arcillas de montmorillonita relativamente homoiónicas. Se usó neohexano de grado reactivo (pureza del 99%) y neohexano de pureza ultra alta en experimentos de adsorción de vapor. Las muestras de arcilla se purificaron suspendiendo las muestras en agua destilada y dejando sedimentar para eliminar los granos gruesos y el cuarzo. Se prepararon arcillas relativamente homoiónicas mezclando aproximadamente 3 mol de catión por mol de CEC (Cation Exchange capacity - Capacidad de intercambio iónico) en agua destilada durante 24 horas. Los cationes utilizados fueron calcio, sodio, potasio, cesio y TMA. La suspensión se centrifugó, se aspiró y se añadió una solución nueva con catión. Este procedimiento se repitió 3 veces. Las arcillas se lavaron con agua destilada seguido de centrifugación y aspiración hasta que la solución aspirada dio negativo con AgNO_3 .

Dado que el intercambio de cationes con cationes monovalentes no se espera que sea del 100% y los pasos de lavado podrían producir cierta hidrólisis; las muestras fueron analizadas para el intercambio de cationes. La muestra de arcilla (100 mg) se calentó a 100°C durante 24 h dentro de la cámara y luego se enfrió a temperatura ambiente bajo un vacío de 10^{-6} torr para eliminar la humedad y establecer el peso de la muestra seca. La temperatura de la cámara de absorción era controlada por aire de laboratorio mantenido a $24 \pm 1^\circ\text{C}$. Los datos combinados de adsorción de N_2 y neohexano y $d(001)$ las separaciones manifiestan que las separaciones entre capas de montmorillonitas intercambiadas con pequeños cationes metálicos (como Na, Ca y K) suelen ser demasiado pequeñas para ser accesibles incluso a gases no polares pequeños (como N_2).

La montmorillonita de cesio representa un sistema intermedio, como parte de las separaciones entre capas accesibles al N_2 , pero su accesibilidad a gases no polares (como el

neohexano) es limitado. La intercoalición de grandes iones TMA produce cantidades significativas de microporosidad dentro de las capas de silicato, que son fácilmente accesibles para N_2 , pero la accesibilidad de estos microporos a otros gases no polares dependería de las dimensiones moleculares de los gases. Es muy importante este estudio en relación con la activación de la arcilla, brinda un panorama amplio debido a la activación de la arcilla montmorillonita con distintas sales. Así se reafirma la importancia de realizar la activación para poder lograr mejores resultados en los desecantes.

En los estudios de Rutherford y colaboradores (1997), realizaron tres lavados con la solución salina deseada, que puede ser calcio, potasio, litio o sodio, posterior a eso se realiza un lavado de la arcilla con agua destilada y se realiza una prueba con nitrato de plata ($AgNO_3$) para comprobar que está libre de cloruros. Después mencionan que se calienta la arcilla a $100^\circ C$ para eliminar la humedad y en una cámara de vacío, aunque el estudio no menciona la humedad final de la muestra, se esperaría que la humedad final de la arcilla sea muy baja, por experiencia de la empresa por lo menos debajo de un diez por ciento de humedad. El estudio habla de la microporosidad de la arcilla montmorillonita y la prueba Brunauer Emmett-Teller (BET) que se realiza para obtener el volumen de nitrógeno molecular (N_2) que puede absorber la arcilla, eso se traduce en la microporosidad que tiene ésta según el espaciado de la molécula en el cual interfieren los iones intercambiados. Este intercambio iónico es lo que permite a distintos gases ser absorbidos con mayor facilidad, o sea, que dependerá de la sal con la cual se activó la arcilla, es decir, de la distancia entre las moléculas para que tengan espacio suficiente para poder ser absorbidas. Es por esto que, la arcilla montmorillonita activada con distintas sales tiene distintas propiedades y por lo tanto distintos usos en la industria.

Dicho lo anterior se comprueba que la sal que será utilizada es el calcio en su presentación de cloruro de calcio, será importante realizar experimentos para comprobar que efectivamente es adecuado tres ciclos de activación con la solución de cloruro de calcio o si se mejoran las propiedades si se realizan más ciclos o si se consigue un resultado similar realizando menos ciclos y que cumpla con los estándares de calidad requeridos por la empresa y la industria. Se sabe que la temperatura de secado no tiene mayor incidencia en la absorción y adsorción de humedad si se seca a temperaturas bajas de entre 100°C a 200°C, como en los estudios, no obstante, habrá que tomar en cuenta que es más económico, si secar a menor temperatura por más tiempo o mayor temperatura menor tiempo, teniendo en cuenta el equipo a utilizar.

En caso de que se requiera una arcilla montmorillonita cálcica o pura, sin los cloruros, se tendrá que realizar un lavado con agua destilada para la eliminación de éstos y realizar una prueba con nitrato de plata como se menciona en líneas anteriores, sin embargo, esto dependerá de los resultados obtenidos en el laboratorio y sólo si de ser conveniente para el proceso de producción de acuerdo con los estándares y las normas (Rutherford *et al*, 1997).

En otros trabajos se reportó el intercambio de humedad entre maíz y desecantes de bentonita en una mezcla a nivel molecular. Con los resultados obtenidos se logró obtener una ecuación de respuesta mínima para los granos de maíz y otra para el desecante las cuales miden la humedad. Los resultados fueron favorables por lo que recomiendan el uso de la bentonita en combinación con el maíz para la absorción de humedad (Sturton *et al*, 1983). La ecuación de respuesta se generó con regresión lineal y nos describe cuánta cantidad de desecantes se necesita para reducir la humedad en una cierta cantidad de maíz. Las isothermas de adsorción (una isoterma de adsorción, también llamada isoterma de sorción, describe el equilibrio de la adsorción de un material en una

superficie de modo más general sobre una superficie límite a temperatura constante. Representa la cantidad de material unido a la superficie (el sorbato) como una función del material presente en la fase gas o en la disolución. Las isothermas de adsorción se usan con frecuencia como modelos experimentales, que no hacen afirmaciones sobre los mecanismos subyacentes y las variables medidas. Se obtienen a partir de datos de medida por medio de análisis de regresión (Atkins, 1998), para vapor de agua, espacio $-c$ y calor de inmersión en agua de montmorillonita de sodio y calcio se midieron a 25 °C a diferentes humedades relativas (H.R. o por sus siglas en inglés H.R.). La cantidad de agua adsorbida en función de la H.R. aumentó gradualmente, mientras que el espacio c aumentó, y el calor de inmersión (por mol de agua adsorbida) disminuyó en etapas. Hubo un buen acuerdo entre los datos calorimétricos, el calor calculado a partir de las isothermas mediante el uso de la ecuación BET y los cálculos del modelo de dipolo iónico. Se presentó un modelo para describir la hidratación de montmorillonita de sodio y calcio.

Tres tipos de interacciones arcilla-agua han sido descritos para explicar la expansión en la dirección; 1) la hidratación de los cationes de la capa intermedia, 2) la hidratación de las superficies de arcilla expuestas y 3) un efecto osmótico capaz de la hidratación de los cationes y de las superficies de arcilla expuestas con bajo contenido de agua, mientras que el fenómeno osmótico es más efectivo con alto contenido de agua. La importancia relativa de cada una de las dos primeras interacciones es discutible; Nagelschmidt y colaboradores (1936), sugirieron que, durante la adsorción inicial de agua en montmorillonita, las moléculas de agua se adsorben en las superficies externas, mientras que Marshall y colaboradores (1936), mantuvieron primero esa hidratación uniforme de todo intercambio catiónico. Hendricks y colaboradores (1940), propusieron otro modelo que compromete los dos enfoques extremos anteriores. Sugirieron que, en bajos contenidos de agua, los iones Ca^{2+} se hidratan primero.

Es muy probable que las moléculas de agua que forman la primera capa de hidratación alrededor de los cationes adsorbidos tengan un nivel energético diferente al de las moléculas de agua que residen entre los iones de hidratación. A partir del calor de los datos de inmersión, fue posible obtener información sobre la intensidad de la interacción entre las moléculas de agua y los sitios y así determinar los sitios de adsorción de agua. Debe enfatizarse que el proceso de adsorción entre capas es esencialmente diferente de la adsorción en superficies externas. En estado seco, hay una atracción electrostática entre las láminas de arcilla negativas y los cationes intercambiables ubicados entre las láminas y las fuerzas de atracción de Van Der Waals entre las láminas de arcilla. En fisicoquímica, las fuerzas de Van Der Waals o interacciones de Van Der Waals son las fuerzas atractivas y/o repulsivas entre moléculas distintas a aquellas debidas a un enlace intermolecular (enlace iónico, enlace metálico y enlace covalente de tipo reticular) o a la interacción electrostática de iones con moléculas neutras (IUPAC, 1994). Durante el proceso de adsorción, la energía de adsorción del agua es la fuerza impulsora para separar las láminas de arcilla contra estas dos fuerzas de atracción. Las cantidades termodinámicas derivadas de la observación experimental reflejan el efecto neto de la energía de hidratación y las energías de atracción de las láminas, así como el efecto neto de los cambios en la fase del agua, la geometría de la red y la posición de los cationes.

Este tratamiento se repitió tres veces. Luego, la arcilla se lavó con agua destilada, se debe hacer con agua destilada pues no contiene otras sales minerales y de esta manera se lavan los cloruros y se deja únicamente el calcio en las moléculas de la montmorillonita. Se separó en una centrífuga de alta velocidad hasta que la solución de equilibrio estuvo libre de cloruros. Se presumió el cloruro estar ausente cuando el líquido sobrenadante dio negativo con AgNO_3 . La cantidad de agua adsorbida en ambos sistemas fue obtenida por pesaje y expresado en mg de agua/g

arcilla secada a 105°C por 24 horas. El calor de adsorción de agua / moles de agua) en montmorillonita-Na y Ca (tabla 6), se ha calculado de la ecuación:

$$E_1 = \frac{U_{N2} - U_{N1}}{\Delta N}$$

donde U_{N1} y U_{N2} son el calor de la inmersión de las arcillas adsorbido con moles de agua N_1 y N_2 , respectivamente, y ΔN es igual a $(N_2 - N_1)$.

Tabla 6. Los parámetros BET y el calor de la adsorción de agua en Montmorillonita Na⁺ y Ca⁺ calculado a 25°C. Tomado de Keren & Shainberg, 1975.

Ion Adsorbido	Xm mg H ₂ O/g arcilla	N moléculas de agua por ion	C	E ₁ -E _L
Na	58	3.6	1.7	0.34
Ca	114	14.5	14.3	1.58

La cantidad de agua adsorbida en Ca-montmorillonita a H.R. de 0-50% es 57 mg de agua / g de arcilla, o siete moléculas de agua / ion Ca²⁺ indicó que un espacio era capaz de acomodar dos monocapas de moléculas de agua (a saber, 228 mg de H₂O/g de arcilla o 28 moléculas de agua / Ca²⁺ ion). Este efecto puede explicarse por el calor de adsorción de estas moléculas de agua. El calor generado / un mol de agua adsorbida, según lo calculado de las mediciones calorimétricas es 3.3 kcal / mol H₂O para los primeros dos m-mol de H₂O adsorbido en 1 gramo de arcilla (que corresponde a 4-5 moléculas / Ca²⁺ intercambiable), y disminuye a 2-5 kcal / mol para el tercero m-mol de agua adsorbida en la arcilla. En este estado expandido, los iones se coordinan con las moléculas de agua Ca²⁺ 6-8, como se espera teóricamente del principio de la relación de proporción. Como la H.R. aumenta por encima de 80%, el espacio *c* sigue siendo constante a un valor de 15- Å, pero la tasa de adsorción de agua aumenta nuevamente a H.R. por encima de 80%,

las moléculas de agua se condensan en las superficies externas, aumentando así el agua sorbeteada sin un cambio en el espacio c . En el análisis BET, un valor c de 10 indicaron la formación de una multicapa de adsorbato antes de que se complete la primera capa como la H.R. aumenta, las vacantes entre los iones hidratados se llenan continuamente con moléculas de agua. Cuando se llena el espacio entre las láminas (a H.R. de aproximadamente 60%), la isoterma de adsorción se convierte en plano y solo cuando la H.R. aumenta por encima de 80%, la condensación de moléculas de agua en las superficies externas de los tactoides tiene lugar y la curva de adsorción se vuelve cóncavo hacia arriba nuevamente. Por encima de H.R. 90%, el espacio c aumenta a un máximo valor de 19 Å y el calor de la adsorción de agua disminuye a cero cuando las moléculas de agua líquida se toman como el estado estándar. Predicción teórica del calor de la humectación.

Se encontró que el calor de adsorción de la primera capa de moléculas de agua alrededor de los cationes intercambiables era 1.8 y 3-3 kcal / mol de H₂O para Na y Ca-montmorillonita respectivamente. Las moléculas de agua en la capa de hidratación pierden la energía, E_a , resultante de las fuerzas del dipolo iónico que une las moléculas de agua al ion, pero gana la energía E_w resultante de las posibilidades reducidas de enlace de hidrógeno con otras moléculas de agua, como ocurre en agua a granel.

$$E_A = E_a + E_w$$

La molécula de agua coordinada a un ion puede coordinarse con solo otras dos moléculas en lugar de cuatro como en el caso del agua a granel. La relación del ion con la superficie de silicato es similar a la de una carga puntual. La energía de atracción, E_r , entre un ion adsorbido (tabla 7) y se da la carga electrostática de la plaqueta por:

$$E_r = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r}$$

Tabla 7. Energía liberada por los tres mmol de agua adsorbida en montmorillonita Na y Ca (valores experimentales calculados a 25°C). Tomado de Keren y Shainberg, 1975.

Ion adsorbido	numero de hidratación n	Valores calculados (kcal por mol H ₂ O)				Valores exprimentales (kcal por mol H ₂ O)		
		E _L	E _W	Δer	ΔE	1	2	3
Na ⁺	3	-4.6	2.3	1.1	-1.2	-1.8	-1.8	-1.8
Ca ⁺²	6	-8.8	2.3	3.3	-3.2	-3.3	-3.3	-2.5

*Los valores corresponden a la primeras tres moléculas adsorbidas por gramo de arcilla

Keren y Shainberg (1975), reportaron también la absorción de humedad en dos tipos de montmorillonitas una sódica y una cálcica, en la que se obtuvieron resultados muy interesantes. Se mencionaron los pasos utilizados para la activación de la arcilla montmorillonita y como se ha observado en otras investigaciones, consistió en realizar tres saturaciones, estas saturaciones con sales se refieren a la incorporación de una arcilla montmorillonita una solución de éstas sales, que en este caso serían cloruro de calcio y sodio. Posterior a eso, se realizó una centrifugación para eliminar el exceso de agua, después, se lavó la arcilla con agua destilada para eliminar los cloruros y se realizó una prueba de nitrato de plata (AgNO₃) para comprobar la inexistencia de cloruros. Para la determinación de adsorción mencionan el proceso de secado, que consiste en secar la muestra a 105°C por 24 horas. La adsorción de humedad se puede entender como la relación que tiene el aumento de peso de la muestra con los gramos de la arcilla secos. Finalmente se observó experimentalmente que las pruebas realizadas tardaron varias semanas hasta que se estabilizó la humedad en los desecantes.

Se han reportado tres tipos de hidratación; hidratación en la capa intermedia de los cationes, hidratación en la superficie expuesta de la arcilla e hidratación por efecto osmótico; éste último es un fenómeno físico relacionado con el movimiento de un disolvente a través de una membrana semipermeable. Tal comportamiento supone una difusión simple a través de la membrana, sin gasto de energía. El concepto de presión osmótica se establece en el contexto de la termodinámica clásica de equilibrio, el flujo osmótico es un concepto asimilado en la teoría termodinámica de no-equilibrio. Esta última teoría supone relaciones lineales entre flujos y fuerzas, siempre y cuando los flujos producidos no alejen severamente al sistema de su situación de equilibrio (del Castillo, 1997). Se habla de la hidratación de los iones en las capas de las arcillas, que determina las ubicaciones de donde ocurre la absorción y adsorción de agua y es posible obtener esta información con los datos de la inmersión por calor. Se enfatiza que hay una diferencia sustancial entre la absorción de agua en la superficie de la arcilla y entre sus capas interiores.

Keren y Shainberg (1975), explicaron cómo la adsorción y desadsorción de los isoterma de Montmorillonita-Ca y Na, son independientes y que la montmorillonita cálcica presenta mayores propiedades de adsorción comparada con la sódica (figura 15). A menor presión de vapor en el ambiente adsorbe una mayor cantidad de agua mg/g de arcilla seca. Esto es muy importante para el uso de los desecantes, ya que si se requiere un ambiente controlado resulta más útil que a menores presiones de vapor. La matriz montmorillonita cálcica adsorbe más cantidad de agua en comparación con la montmorillonita sódica, prácticamente se duplica la cantidad de mg de agua por cada gramo de arcilla y aproximadamente cuatro veces más las moléculas de agua por ion y se observa que el resultado del intercambio calórico es cinco veces mayor en la montmorillonita cálcica.

El estudio habla del espaciado-c, en este caso el que nos interesa es el de la arcilla montmorillonita. El espacio-c, es la distancia que hay entre las moléculas de la arcilla montmorillonita y en este caso son de 15Å. Por ejemplo, menciona que a una humedad relativa H.R. de 50% son 57 mg de agua por cada gramo, esto indica que hay espacio suficiente para acomodar dos monocapas de agua, que son 2.28 gramos de agua por cada ion de calcio (Ca^{2+}).

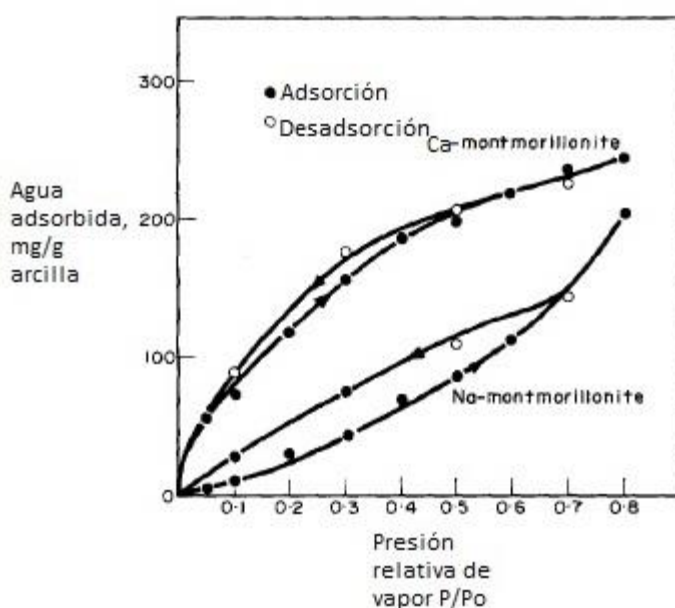


Figura 15. Isotermas de adsorción-desorción en Montmorillonita-Na y Ca. Tomado Keren y Shainberg, 1975.

Si la humedad relativa aumenta, la cantidad de agua adsorbida incrementa continuamente hasta una H.R. de 60%, donde hace inflexión la curva. La cantidad de agua adsorbida es de 220 mg/g de arcilla, cuando la H.R. aumenta, superando 80%, el espaciado-c sigue siendo el mismo de 15 Å, pero la tasa de adsorción aumenta nuevamente, a esta H.R. la humedad se absorbe en las superficies exteriores. Cuando la H.R. aumenta las vacantes entre los iones hidratados se siguen

ocupando con moléculas de agua. Arriba de 90% de H.R. el espacio-c tiene un valor máximo de 19 Å y el intercambio calórico se vuelve cero porque ya están las moléculas de agua en su estado estándar.

El estudio describe ecuaciones calorimétricas, en el que se expresan los resultados del intercambio calórico entre la arcilla montmorillonita, ambos casos, tanto para la cálcica como para la sódica. Como se observó el intercambio calórico en la montmorillonita cálcica, si se requiere se puede revisar la teoría para realizar experimentos de intercambio calórico, para la presente investigación no es indispensable realizar estos cálculos calóricos (Keren y Shainberg, 1975).

CAPÍTULO V. MARCO PROCEDIMENTAL

5.1. Variables del estudio

Para este estudio las matrices de montmorillonita se expusieron a distintas condiciones y procesos. Se realizaron las pruebas de activación de la arcilla montmorillonita en solución acuosa y en estado sólido. Para la solución de cloruro de calcio solvatada se preparó a diferentes concentraciones. Se secó la arcilla activada en solución a distintos porcentajes de humedad del 3.5% al 18.25%. El peso de la muestra (40 g), la temperatura (25°C), el tiempo (7 hr) y el porcentaje de humedad (80%) siempre permanecieron constantes en las pruebas, así como el tipo de equipos utilizados, los cuales se detallan en el apartado de sistematización de datos.

5.2. La muestra

Para el estudio se realizaron 42 tratamientos teniendo en cuenta distintas variables como ya se mencionó, se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento y posterior a ello se recolectaron los datos.

5.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La arcilla montmorillonita fue extraída en el estado de Michoacán del mismo banco de extracción y luego fue transportada a la ciudad de Morelia a las instalaciones de Minería Empresarial donde es procesada. Una vez en las instalaciones fue almacenada. Después pasó por

un proceso de triturado, donde las piedras se transformaron en un polvo fino que corresponde a un tamiz de malla 14, según el requerimiento. La arcilla pasó por un secador industrial rotatorio donde se eliminó la humedad de la arcilla. Una vez que se había secado la arcilla fue necesario que pasara por un proceso de cribado dónde adquirió el tamaño de granulometría deseado. En este punto ya se podía considerar que la arcilla actuara como desecante, dado que empezaría a absorber humedad del ambiente. Después, fue mezclada la arcilla montmorillonita con cloruro de calcio para que mejorara las propiedades de adsorción y absorción de humedad. Una vez mezclado el desecante de humedad fue envasado.

Respecto al cloruro de calcio que se utilizó en conjunto con el desecante, éste se apegó a los requerimientos solicitados, ya que como es bien sabido, es un material con excelentes características higroscópicas. En cuanto al material de envasado, la película Tyvek es un producto peculiar porque tiene características que al tacto emula al papel, es muy ligero, pero a su vez es muy resistente, impermeable para el agua, pero permeable para los gases, y tiene una composición fibrosa de polietileno, lo que lo convierte en el producto ideal para el envasado de la matriz desecante. El Tyvek ya viene impreso y cortado tanto para las bolsas de desecantes de mayor gramaje como en rollos para los desecantes de menor gramaje.

El hilo y el cordón son específicamente utilizados para los desecantes de mayor gramaje, ya que requieren un sellado más fuerte y el cordón para ser colgados donde se requiera, debe de tener por lo menos 7 pulgadas de longitud según la especificación militar Mil-d-3464. En general el proceso es muy limpio y tiene pocos elementos por lo que las mermas son mínimas. La eficiencia de los materiales está en cuanto provecho le podemos sacar a cada uno de los elementos, por ejemplo el diseño para el logo de los desecantes va impreso de tal forma que se aprovechen al

máximo las dimensiones de los rollos de Tyvek, la arcilla montmorillonita se puede reutilizar, si se reprocesa o en otras aplicaciones, el cloruro de calcio se puede volver a deshidratar al igual que la arcilla si ya alcanzaron su límite de absorción y el cordón e hilo son utilizados por las máquinas por lo que no hay mayor desperdicio.

Para el proceso de triturado fue necesario picar las piedras con un pico para que cupieran en el triturador. Para el proceso de secado se debe tener un secador rotatorio industrial a una temperatura, la cual permite eliminar más del 90% de humedad en un periodo menor a 1 hora. Respecto al cribado, se debió tener la arcilla con la granulometría deseada para que las partículas pasen por la malla deseada que va de acuerdo con la especificación militar MIL-D-3464. Respecto al proceso de mezclado, se debe de tener la proporción adecuada de arcilla montmorillonita y cloruro de calcio. El proceso de mezclado puede durar entre un minuto y una hora. Se debe de tener preparada la cantidad de cada material que va a ser mezclado para reducir el tiempo que permanece expuesto a la humedad del ambiente. Proceso de envasado, se debe de tener preparado el rollo de Tyvek, de acuerdo con el pedido solicitado, una báscula para pesar el contenido del envase, las etiquetas del envase y el envase como tal. Para el proceso de control de calidad, se debe tener una muestra representativa de la producción de los desecantes que viene indicado en la especificación militar MIL-D-3464, también se debe de tener una regla para medir el tamaño de los desecantes; una báscula, una cámara de humedad y temperatura y una plataforma para dejar caer los desecantes y cumplir con la prueba de resistencia. Para el proceso de etiquetado, debió pasar el desecante por todas las pruebas de calidad y tener listas las hojas para cotejar el pedido; las etiquetas que van a ir pegadas en las cubetas o recipientes que contengan los desecantes.

Las superficies de referencia que se utilizaron en este proceso han sido mínimas porque se debía dejar un espacio para que se haga el corte de las bolsas de los desecantes, pero eso lo hace una empresa externa con una agencia de diseño, sin embargo, se debe tener una guía para poder realizar los cortes y para después coser las bolsas. Otras superficies de referencia pueden ser las guías para poner los rollos de Tyvek en la maquinaria para que queden alineados. También es necesario dejar unas líneas de referencia junto con una perforación entre los desecantes para la industria farmacéutica que, por cierto, son unos de los principales sectores; necesitan rollos de desecantes listos para cortar e insertar en los botes con pastillas.

Para la preparación de la solución de cloruro de calcio (CaCl_2): se preparó un volumen conocido de un litro de solución de éste a diferentes concentraciones, las cuáles fueron preparadas a 10, 20, 30, 40, 50, 60% (peso/peso). Por otro lado, la arcilla se activó por inmersión en la solución de CaCl_2 . Para esta actividad se guardó una relación peso/peso de X % de arcilla y Y % de la solución. Para estos experimentos inmediatamente después de aplicar la solución de CaCl_2 , se secó la arcilla en un horno a 80°C hasta alcanzar una humedad del 3.5-4.0 %. Posteriormente, se pesaron 40 g en una balanza analítica Sartorius modelo M-Power con número de serie 28050664 y se envasó en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25°C y 80% H.R., en una cámara Lumistell modelo ITH-450 con número de serie 12006ITH450 durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se midió el peso de las bolsas con la arcilla. En todos los experimentos se utilizaron los mismos equipos y se realizaron ensayos por triplicado. La adquisición de datos se hizo en el programa Excel, se procesaron los datos y graficaron (figura 16).

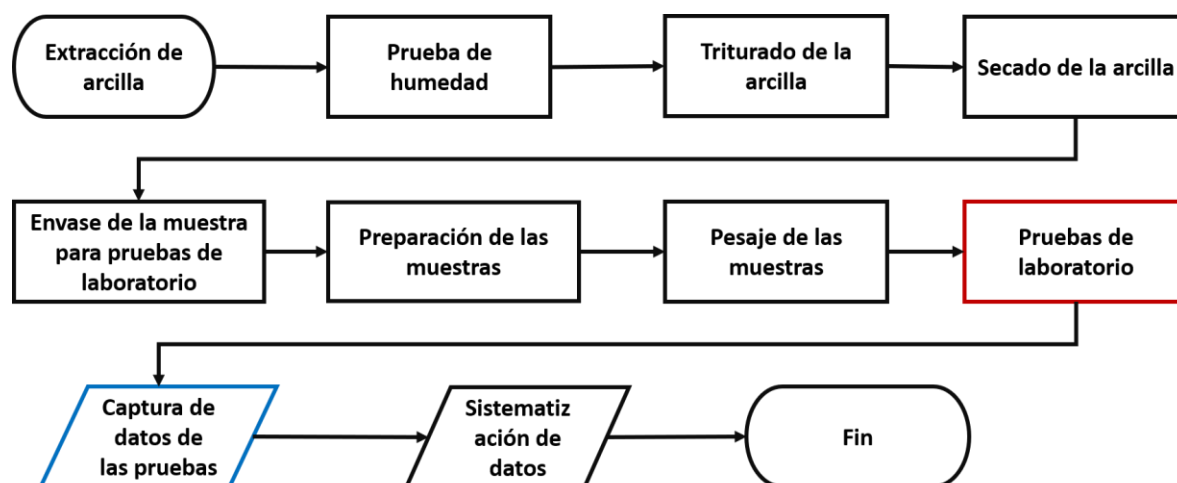


Figura 16. Diagrama de flujo de la técnicas e instrumentos de recolección de datos.

5.4. Sistematización de datos

A continuación, se presenta un diagrama general de las pruebas de laboratorio realizadas, las cuales se organizaron en *casos*; cada uno de los cuales presenta distintas concentraciones de arcilla, $[\text{CaCl}_2]$, humedad y tipo de activación de la matriz (figura 17). En el caso A, el CaCl_2 se preparó a diferentes concentraciones, las cuales fueron 10, 20, 30, 40, 50, 60% (peso/peso). La arcilla se activó por inmersión en la solución de CaCl_2 . Para esta actividad se guardó una relación peso/peso de 55.55 % de CaCl_2 y 44.44 % arcilla. Inmediatamente después de aplicar la solución de CaCl_2 , la arcilla se secó en un horno a 80°C hasta alcanzar una humedad del 3.5-4.0%. Posteriormente se pesaron 40 g en una balanza analítica Sartorius modelo M-Power con número de serie 28050664 y se envasó en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25°C y 80% H.R. en una cámara

Lumistell modelo ITH-450 con número de serie 12006ITH450 durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron las bolsas con la arcilla.

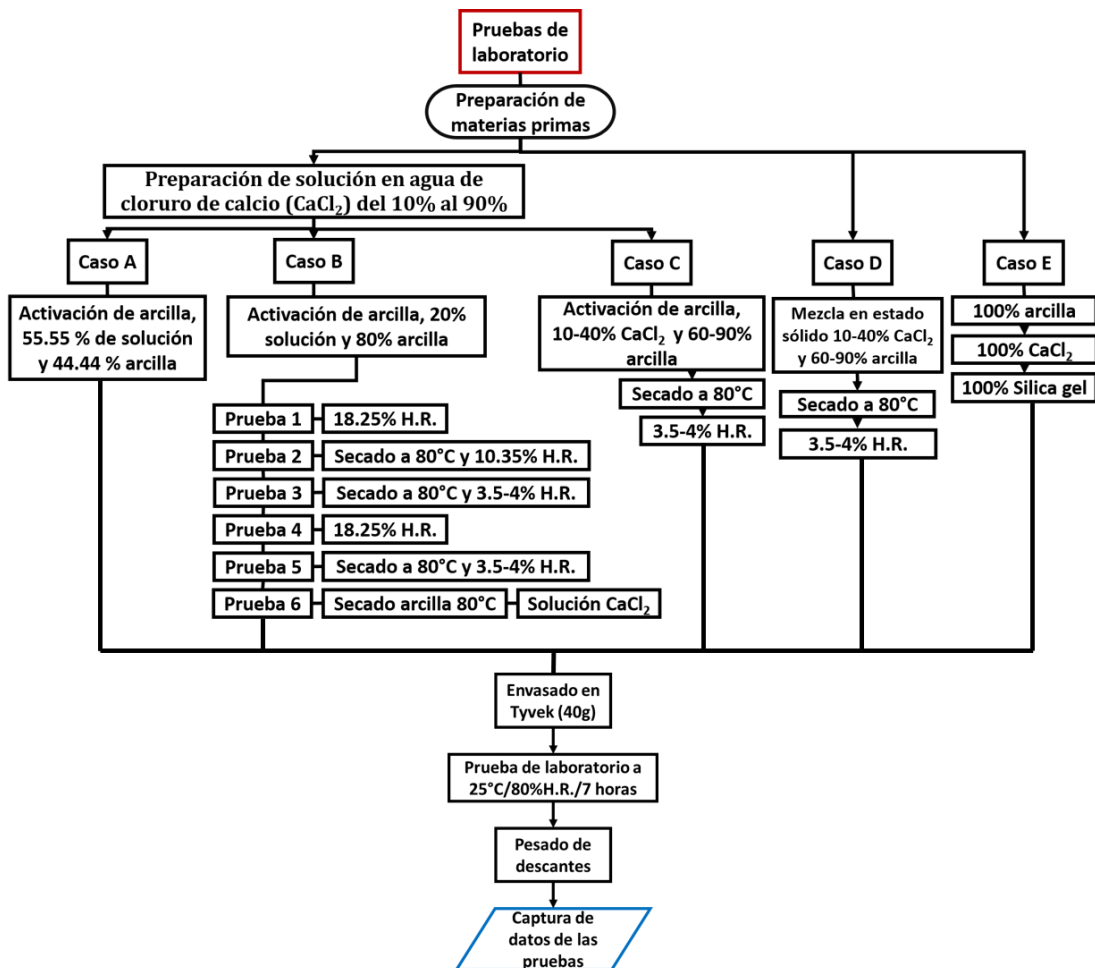


Figura 17. Diagrama general de estrategia metodológica.

La adición de cloruro de calcio incrementó la adsorción de humedad y esto se vio reflejado en la ganancia en peso del desecante (figura 18). Existe un incremento significativo entre los distintos porcentajes de cloruro de calcio utilizado en este experimento, se observó que una adición del diez por ciento al veinte por ciento de cloruro de calcio corresponde a un incremento de 0.94

g, es donde ganó la mayor cantidad en peso de agua. Del veinte al treinta por ciento hubo un incremento significativo con una ganancia de aproximadamente 0.5 g. Del treinta al cuarenta por

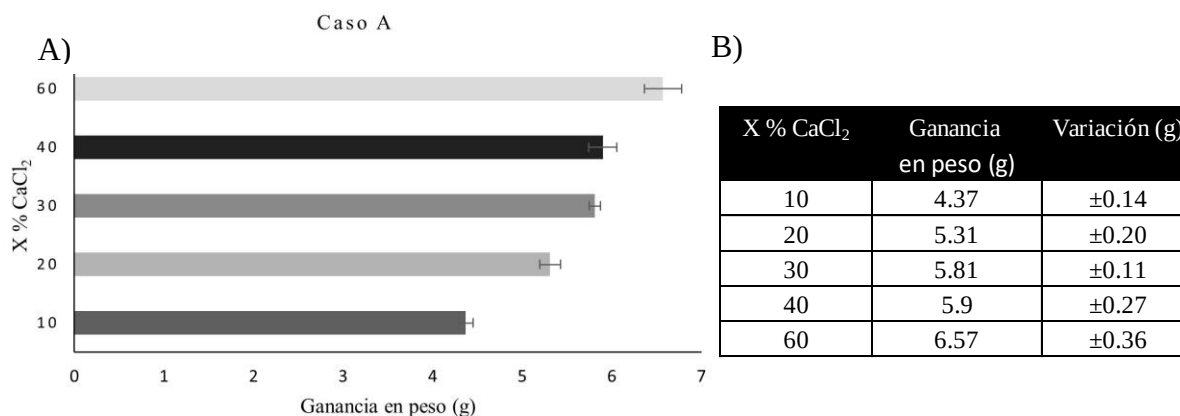


Figura 18. Caso A, Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados en las condiciones de activación de arcilla, 55.55% de solución y 44.44% de arcilla. B) Tabla mostrando los resultados del caso A.

ciento no hubo una diferencia significativa, sin embargo, de éste al sesenta por ciento se observó otro incremento significativo de 0.67 g. Por lo que se sugiere que hubo una ganancia significativa.

Respecto al caso B, las soluciones de CaCl_2 fueron preparadas a concentraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60% (peso/peso). La arcilla se activó por inmersión en la solución de CaCl_2 . Para esta actividad se guardó una relación peso/peso de 80% de arcilla y 20% CaCl_2 . Inmediatamente después de aplicar la solución de CaCl_2 , la arcilla (40 g), con un contenido de HR de 18.25%, se envasó en bolsas de Tyvek. Posteriormente, las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R., durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron las muestras (tabla 8).

Tabla 8. *Caso B (Prueba 1).* Ganancia en peso de agua del descante respecto a la concentración de cloruro de calcio. Activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. 18.25% H.R.

X % CaCl ₂	Ganancia en peso (g)	Variación (g)
20	0.53	±0.03

Inmediatamente después de aplicar la solución de CaCl₂, la arcilla se secó en un horno a 80°C hasta alcanzar una H.R., del 10.35%. Posteriormente, se pesaron 40 g en una balanza analítica y se envasó en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo se pesaron las bolsas con la arcilla (tabla 9).

Tabla 9. *Caso B (Prueba 2).* Ganancia en peso de agua del descante respecto a la concentración de cloruro de calcio. Activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. Secado a 80°C y 10.35 H.R.

X % CaCl ₂	Ganancia en peso (g)	Variación (g)
20	3.24	±0.11

Luego de haber aplicado la solución de CaCl₂, la arcilla se secó en un horno a 80°C hasta alcanzar una H.R. del 3.5- 4.0%. Posteriormente, la arcilla (40 g) se envasó en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron las bolsas con la arcilla. La adición de cloruro de calcio incrementó la adsorción de humedad y esto se ve reflejado en la ganancia en peso (figura 19).

Los resultados arrojaron un incremento entre los distintos porcentajes de cloruro de calcio para el caso B prueba 3. Se observó que no hay una ganancia significativa del diez al treinta por ciento de concentración de cloruro de calcio. Del veinte al treinta por ciento hubo una diferencia significativa de 0.18 g. Del treinta hasta el cuarenta por ciento hubo un incremento significativo de 0.56 g. Del cuarenta por ciento al cincuenta por ciento no hay una diferencia significativa. Del

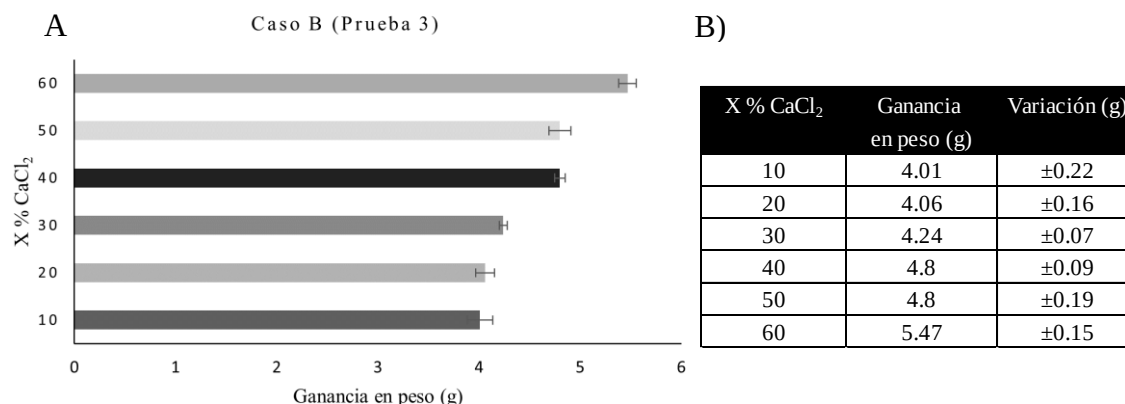


Figura 19. Caso B (prueba 3) Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados de la activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. Secado a 80°C y 3.5-4% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso B, prueba 3.

cincuenta por ciento al sesenta por ciento se observó otro incremento significativo de 0.67 g. Se observó que hay una ganancia significativa para las concentraciones del treinta por ciento, cuarenta por ciento y sesenta por ciento, para el resto de las concentraciones no hay una diferencia significativa.

Para la prueba 4 del caso B, luego de aplicar la solución de CaCl_2 , la arcilla se envasó en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron las bolsas con la arcilla. En este experimento se pudo observar que al perder humedad el desecante de montmorillonita activado con una solución de cloruro de calcio no absorbía más humedad del ambiente, por lo que no existía un incremento significativo en la ganancia en peso de las muestras. Se observó que hay una diferencia significativa al realizar este experimento y esta diferencia se encuentra entre el veinte y treinta por ciento, para el resto de las concentraciones no hubo un cambio significativo (figura 20).

Para el caso B prueba 5, la arcilla se secó hasta alcanzar una humedad de 3.5- 4.0%. Después, se aplicó la solución de cloruro de calcio. Inmediatamente después de aplicar la solución

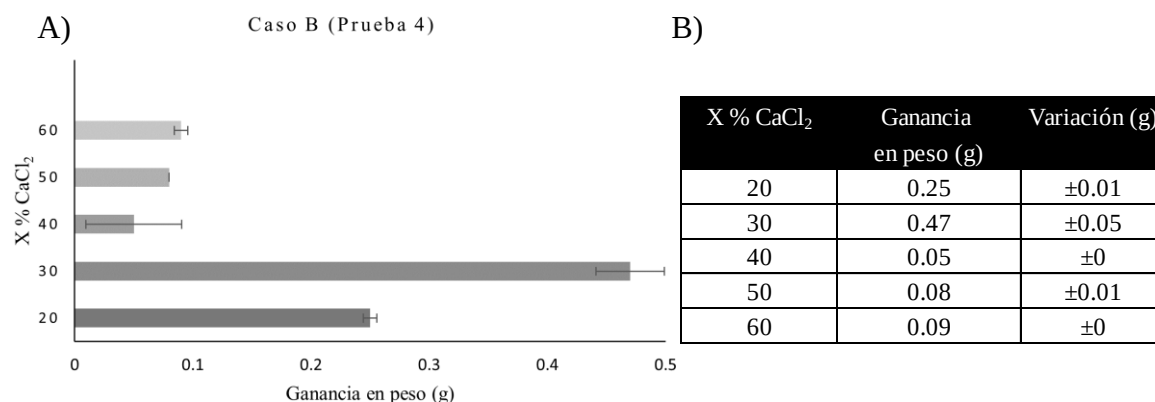


Figura 20. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados con la activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. 18.25% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso B, prueba 4.

de CaCl₂, la arcilla se secó en un horno a 80°C hasta alcanzar una H.R. del 3.5- 4.0%. Posteriormente, la arcilla (40 gr) se envasó en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron las bolsas con la arcilla.

En el caso B prueba 5 se observó que la adición de cloruro de calcio si fue beneficioso para incrementar la adsorción de humedad y por ende ganancia en peso del desecante (figura 21). Hubo un incremento significativo casi en todos los porcentajes, excepto entre aquellos del cuarenta y cincuenta por ciento. Del diez al veinte por ciento se observó una ganancia en peso de 0.62 g, del veinte por ciento al treinta por ciento tuvo una ganancia en peso de 0.43 g, del treinta al cuarenta por ciento es el intervalo en el que se obtuvo la mayor ganancia en peso de 0.69 g y por último de cincuenta a sesenta por ciento incrementó el peso del desecante en 0.12 g. Se observó que, para el diez, veinte, treinta y cuarenta por ciento hubo una diferencia significativa, por lo que agregar más cloruro de calcio, según los resultados no brindó ningún beneficio significativo.

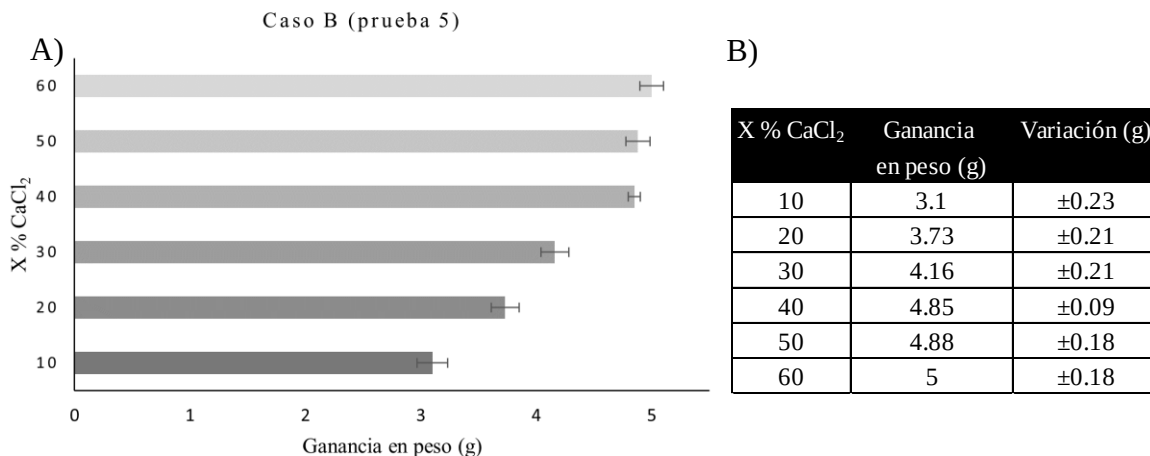


Figura 21. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados con la activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. Secado a 80°C y 3.5-4% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso B, prueba 5.

Para la prueba 6, la arcilla se secó hasta alcanzar una humedad de 3.5- 4.0%. Posteriormente, se aplicó la solución de cloruro de calcio (figura 22). Enseguida se envasó la arcilla (40 g) en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron las bolsas con la arcilla. Dicha prueba se realizó con el objetivo de observar cómo se comportaba el desecante al no pasar por un proceso de secado posterior a la adición de la solución de cloruro de calcio, se observó que solamente del cuarenta al sesenta por ciento de cloruro de calcio aún tiene un incremento significativo, sin embargo, no se alcanzaron los requerimientos mínimos de un desecante. Los porcentajes menores al cuarenta por ciento no fueron significativos para esta prueba. En este caso para todos los porcentajes de cloruro de calcio

hubo una diferencia significativa por lo que el agregado de cloruro de calcio si incrementó la capacidad del desecante.

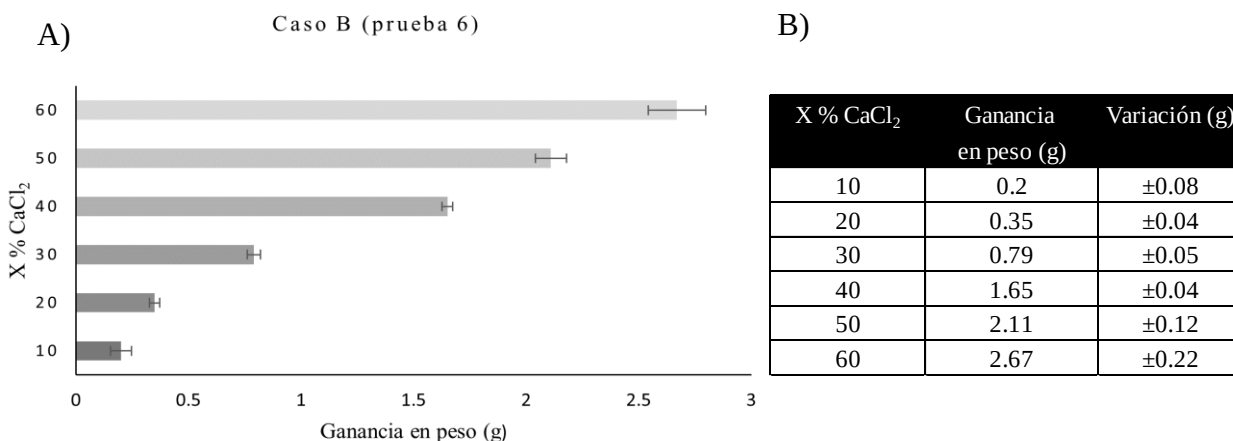


Figura 22. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados con la activación de arcilla, 20% solución y 80% arcilla. Secado arcilla 80°C y solución CaCl₂. B) Tabla mostrando los resultados del caso B, prueba 6.

Para el caso C, de solución de CaCl₂; se preparó un volumen conocido de solución de CaCl₂ a diferentes concentraciones (figura 23). Las cuáles se prepararon al 10, 20, 30 y 40% (peso/peso). La arcilla se activó por inmersión en la solución de CaCl₂. Para esta actividad se guardó una relación peso/peso de 90% de CaCl₂ y 10% de agua. Inmediatamente después de aplicar la solución de CaCl₂, la arcilla se secó en un horno a 80°C hasta alcanzar una H.R. del 3.5- 4.0%. Posteriormente, la arcilla (40 gr) se envasó en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron las bolsas con la arcilla.

Este experimento se realizó para acercarse al objetivo de eliminar el proceso de secado. Es por esto por lo que tan solo se humedeció un poco el cloruro de calcio para poder hacer una mezcla en seco con la arcilla, y así no tener que secar por tanto tiempo la muestra, observándose que el desecante cumplía con las características requeridas, sin embargo, parecía existir una reducción de

adsorción respecto a otros casos, la diferencia de la menor concentración que es el diez por ciento y la mayor que es cuarenta por ciento son tan solo 0.44 g. En este caso se observó que para los porcentajes del diez al treinta no hubo una diferencia significativa, pero si para el cuarenta por

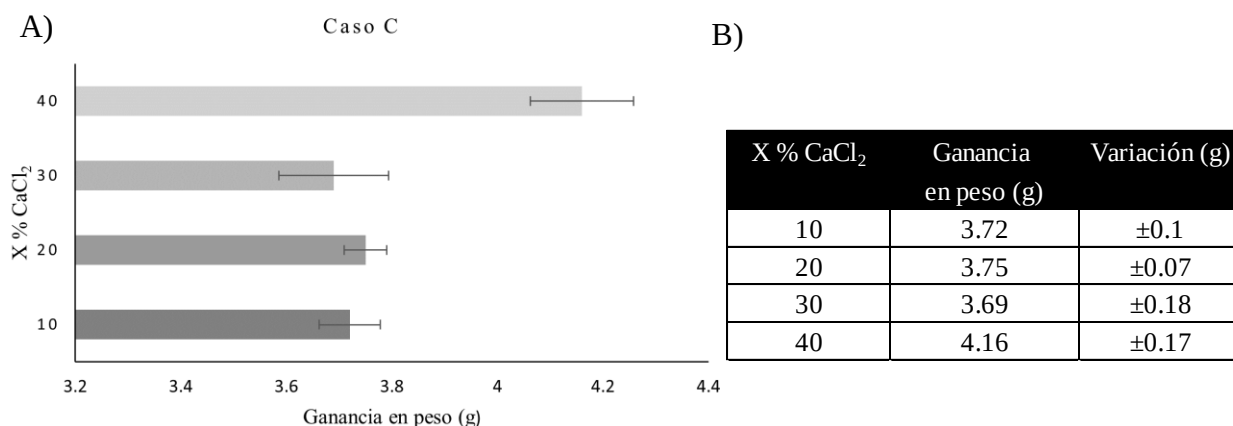


Figura 23. *Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio.* A) Gráfica mostrando los resultados de la activación de arcilla, 10-40% CaCl₂ y 60-90% arcilla. Secado a 80°C. 3.5-4% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso C.

ciento.

Respecto al caso D, se mezcló directamente el CaCl₂ con la arcilla sin que existiera la disolución del CaCl₂. La arcilla y el CaCl₂ se envasaron en bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron de las bolsas con la arcilla. El caso D es importante porque es donde se observa el comportamiento del desecante sin ningún proceso extra de secado ni activación. Tan solo la mezcla en estado sólido logró alcanzar las características que debe tener un desecante. Del diez al veinte por ciento hubo un incremento significativo de 0.82g, del veinte al treinta por ciento de 1.37 g, que es el mayor incremento que se observó en los experimentos; del treinta al sesenta por ciento el incremento se

estabiliza y tan solo hay un incremento del 0.40 g por lo que no hubo un incremento significativo. Se observó diferencia significativa cuando se adiciona cloruro de calcio del diez al treinta por

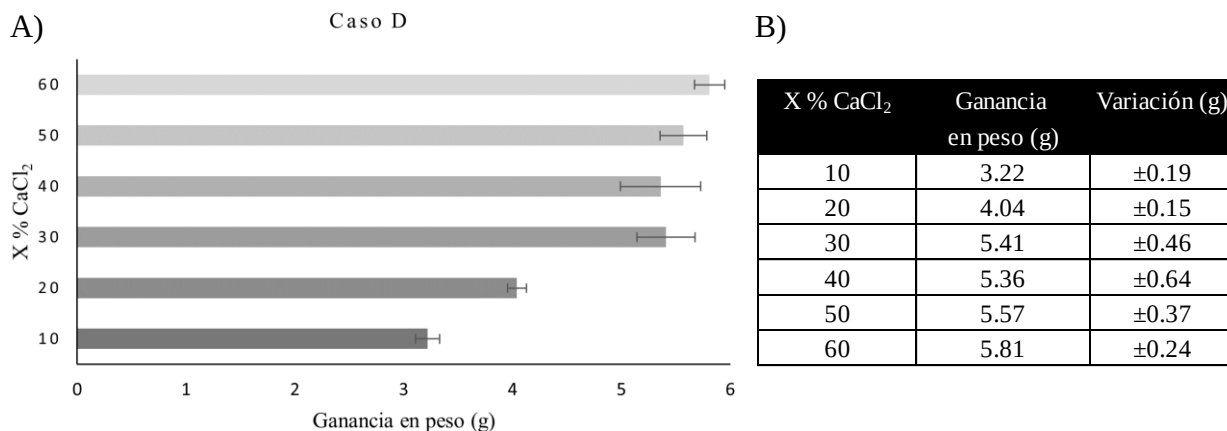


Figura 24. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. A) Gráfica mostrando los resultados con 0% solución. Secado a 80°C. 3.5-4% H.R. B) Tabla mostrando los resultados del caso D.

ciento, para porcentajes más altos no hubo diferencias significativas (figura 24).

En el caso E, se pesaron 40 g de cloruro de calcio y se colocaron directamente en las bolsas de Tyvek. El cloruro de calcio se secó en un horno a 80°C hasta alcanzar una H.R. del 3.5- 4.0%. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas (tabla 10). Al finalizar este tiempo, se pesaron las bolsas con el cloruro de calcio. Se pesaron 40 g de Montmorillonita y se colocaron directamente en las bolsas de Tyvek. La arcilla se secó en un horno a 80°C hasta alcanzar una H.R. del 3.5- 4.0%. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron de las bolsas con el cloruro de calcio. Se pesaron 35 g de silica gel y se colocaron directamente en las bolsas de Tyvek. Las bolsas se almacenaron a 25 °C y 80% H.R. durante 7 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron las bolsas con el cloruro de calcio, montmorillonita y silica gel, obteniéndose los siguientes resultados (tabla 10).

Tabla 10. Ganancia en peso de agua del desecante respecto a la concentración de cloruro de calcio. 100% Arcilla, 100% CaCl₂, 100% silica gel.

X % CaCl ₂	Ganancia en peso (g)	Variación (g)
100	5.94	±0.34
0	4.3	±0.21
Silica gel	5.48	±0.26

5.5. Discusión

Este estudio ha sido importante ya que confirma que la utilización de calcio en desecantes supone una mejora importante en el proceso de la adsorción y absorción de agua. Para ello se utilizó cloruro de calcio anhidro, el cual se requiere que haya pasado por un proceso de ebullición y no presente agua; precisamente es lo que le da la característica higroscópica que se busca, se puede decir que es el cloruro de calcio deshidratado.

Con base en la experiencia y conocimientos que tiene la empresa Minería Empresarial S.A. de C.V. sobre la arcilla montmorillonita, los fundamentos teóricos que encontramos en los antecedentes y a la gran cantidad de empresas que realizan desecantes en sus distintas presentaciones, se realizó un proceso de producción continuo, desde la activación de la arcilla montmorillonita con cloruro de calcio, pasando por un proceso de secado que tendrá que ser el mínimo para los objetivos de la empresa, embolsado del desecante y empaquetado. La investigación ha tomado el rumbo esperado porque los resultados son equiparables con la mayoría de las referencias encontradas, las cuales son suficientes para afirmar la hipótesis de investigación.

Castrillo, y colaboradores (2018), observaron que efectivamente si se pueden mejorar las propiedades de absorción de humedad con la adición de cloruro de calcio. En los experimentos realizados en la presente investigación se encontró que en los casos A, B y C (figuras 18, 19, 20, 21, 22, 23) en donde se preparó una solución con agregado de calcio, se aumentaba su capacidad como desecante.

De forma paralela, el aporte de Çınar y colaboradores (2010), explicaba que el cloruro de calcio al ser un material con mayor higroscopía permitía captar más humedad del ambiente y la sepiolita capturaba con mayor eficiencia la humedad. Ya que el cloruro de calcio se satura y en la superficie tiene agua, lo que le permite a la sepiolita absorber este exceso de agua. Técnicamente es lo que se pretendía demostrar en esta investigación, que la adición de cloruro de calcio beneficiaría la absorción de humedad de los desecantes que se quieran producir. Çınar y colaboradores (2010), realizaron una mezcla mecánica entre la arcilla llamada sepiolita que es una arcilla del grupo de los filosilicatos, misma que la montmorillonita y el cloruro de calcio, por lo que se ha contemplado en el presente trabajo de investigación. Sin embargo, para los propósitos de la empresa sería ideal que mediante solo la mezcla en seco de la arcilla montmorillonita y el calcio en seco se tengan las propiedades requeridas para los desecantes.

Como menciona el estudio de Bulut y colaboradores (2009), efectivamente se pueden producir desecantes con arcilla montmorillonita o bentonita cálcica pasando por un proceso de activación y secado. Como parte de la metodología del presente trabajo, se realizaron pruebas similares a las que se encuentran en el trabajo de los autores citados en líneas anteriores, por ejemplo, se realizaron pruebas en una cámara de humedad y temperatura a 50% de humedad relativa, a 25°C y por 24 horas. En los experimentos realizados en esta investigación se realizaron

a 80% de humedad relativa, a 25°C y por 7 horas. Dichos autores encontraron que su desecante absorbía el 17.2% del peso la muestra en agua, mientras que en la presente investigación se encontró que el desecante tuvo una absorción comparable con 13.52% del peso de la muestra en agua. De haber dejado los desecantes por más tiempo en las cámaras e igualando las condiciones de humedad, es muy probable que supere el porcentaje de la arcilla turca.

Tretiak y Abdallah (2009) han mencionado que considerando las características de sorción y desorción de un lecho lleno de partículas de desecantes de arcilla- CaCl_2 , se pueden hacer desecantes a base de arcilla y cloruro de calcio. En dicho estudio se utilizó una arcilla llamada vermiculita, caolín y cloruro de calcio para hacer estudios de absorción de humedad. Se encontró que efectivamente absorbía entre 30% y 45% de su peso en agua, igual o más efectivo que la silica gel y a un costo de 1/9 de la silica gel. En el presente trabajo de investigación se obtuvieron valores de hasta 16.25%, sin embargo, los experimentos que se realizaron fueron de tan solo 7 horas, pero sin duda alguna si se extendiera el tiempo incrementaría la absorción de humedad considerablemente. El estudio reveló que los desecantes absorbían la humedad que hay en el ambiente de forma lineal, sin embargo, si se hace pasar una corriente de aire por el desecante de humedad se aumenta significativamente la absorción de humedad, tanto así que si se duplica el flujo de aire como en el estudio se duplica la absorción de humedad del ambiente.

Existe una patente (United States Patente nº US6716276B2, 2002) por la empresa Desiccare que es una referencia en la industria, menciona que sus desecantes llevan por lo menos el 30% de arcilla montmorillonita y 22% de cloruro de calcio por lo que las pruebas que se realizaron efectivamente son equiparables con un desecante referencia en el mercado. En los experimentos

realizados donde se observa la mayor ganancia de humedad en el desecante, precisamente es cuando se le adiciona una concentración de entre el veinte y treinta por ciento de cloruro de calcio.

En la literatura también se encuentra que la bentonita es utilizada en combinación con maíz, lo anterior de acuerdo con Sturton y colaboradores (1983) por lo que es acertado el uso que se le ha dado a la matriz de nuestra presente investigación. También se puede encontrar que el desecante a base de montmorillonita se puede utilizar en un dispositivo informático (escáner laser) según la patente (United States Patente nº US20080006010A1, 2006) por lo que se puede sugerir su uso como desecante.

Adicionalmente se observó que en todos los casos la mayor retención de las muestras modificadas fue atribuida a la densidad de carga de los iones Ca^{2+} , por lo cual es mayor la interacción con las moléculas de H_2O , los cuales fueron desplazados durante el intercambio y como consecuencia del alto calor de hidratación del ion de calcio se indujo un aumento en el espacio interlaminar de la arcilla. El estudio dio a conocer cómo al agregar cloruro de calcio a la arcilla bentonita mejoraban las propiedades de absorción de humedad debido a su carácter higroscópico, lo que supone una mayor capacidad de adsorción de humedad o vapor de agua del ambiente. Lo que hace el cloruro de calcio es atraer las moléculas de agua, esto porque la humedad del ambiente no está en equilibrio con el cloruro de calcio y de igual manera si la humedad del ambiente disminuye, el cloruro de calcio regresará la humedad al ambiente y se secará. El beneficio de la combinación de cloruro de calcio y arcilla montmorillonita es que ésta por sus propiedades naturales absorbe la humedad, lo que significa que introduce a su molécula el agua a diferencia del cloruro de calcio que adsorbe el agua y la mantiene en su superficie, entonces si esta sal y arcilla se combinan se logran los resultados deseados.

Cuando se habla sobre la metodología de secado del material, será importante tener en cuenta que existen varias opciones para el secado, particularmente se puede observar en la figura 23, en la que se aprecia que se puede tener un desecante, el cual tan solo pase por un proceso de secado, sin necesidad de sumergir la arcilla en una solución con cloruro de calcio y así evitar un proceso extra de secado; lo anterior está fundamentado por Çınar y colaboradores (2010), quienes en su trabajo, llegaron a la conclusión de que el tratamiento térmico que recibe la sepiolita le permite absorber la mayor cantidad de humedad cuando las condiciones son de 50% de humedad relativa por 24 horas a una temperatura de entre 200° C y 300°C. La adición de cloruro de calcio al 5% le permitió a la mezcla de sepiolita absorber un 20% más de humedad relativa y casi un 30% cuando se le adiciona 10% de cloruro de calcio. En comparación el presente trabajo de investigación sugiere que se tenga entre un veinte y treinta por ciento de cloruro de calcio para mejorar el desecante. En su estudio Çınar y colaboradores (2010), revelaron que el cloruro de calcio cuando está en condiciones de humedad relativa iguales o mayores al 33% comienza a cambiar su estado físico y se torna líquido. Por lo que se vuelve conveniente considerar dichos resultados para futuras perspectivas.

Se ha podido observar que a medida que aumenta la humedad en el ambiente, también aumenta la absorción de la arcilla; en ese sentido, se ha observado que en un tiempo aproximado de 24 horas se presenta la mayor saturación de humedad independientemente de la humedad relativa del ambiente y a las 50 horas se observa un comportamiento casi plano. En comparación con las pruebas realizadas el tiempo es menor pues tan solo se hicieron las pruebas por 7 horas (figura 12C).

Hay dos gráficas que muestran un modelo hiperbólico, lineal y en ambas se muestra una correlación entre la cantidad de desecante en gramos respecto al tiempo, ahí la eficiencia de absorción es directamente proporcional a éste. Para el caso del presente trabajo, se propone incrementar el número de ensayos con muestras de distintos pesos para observar el comportamiento de la velocidad de absorción, adsorción y peso en agua absorbido (figura 10).

Montes y Geraud (2004), muestran que el tiempo y temperatura de secado afecta directamente a la cantidad de humedad que puede absorber la arcilla, en las temperaturas que van desde los 110°C a 250°C no se observaron diferencias significativas en la absorción de humedad, sin embargo, se presentó un cambio contraproducente al secar la arcilla cuando la temperatura se elevaba a 500°C por 24 horas. Para los experimentos llevados a cabo en este estudio se secaron las muestras a 80°C hasta lograr porcentajes de humedad de 3.5 a 4%. Por lo que la arcilla no sufría ningún cambio estructural. Por otro lado, los mismos autores dejan en claro que la adición de distintos químicos mejoraba las propiedades de adsorción de la arcilla, a través de un proceso que implica una saturación catiónica. De las pruebas realizadas con cationes mono y divalentes se observó que el calcio (Ca) y magnesio (Mg) presentaban un comportamiento similar y aunque no son las sales que absorben mayor cantidad de vapor de agua, son las que más rápido absorben la humedad. Es por esto por lo que en el presente trabajo se utilizó cloruro de calcio para mejorar las propiedades de absorción de los desecantes que se van a producir (figura 12).

Es muy importante el estudio de Rutherford y colaboradores (1997), respecto a los efectos del catión intercambiado en la microporosidad de la montmorillonita con relación a la activación de la arcilla, pues ha brindado un panorama amplio sobre la activación de la arcilla montmorillonita con distintas sales. En este caso se utilizó el mismo método en la activación de la arcilla, tal como

como lo mencionaba Volzone y Ortiga (2004), en su trabajo de investigación. Estos autores han confirmado la importancia de realizar la activación para poder lograr mejores resultados en desecantes, en sus estudios adicionan solución de cloruro de calcio a la muestra de montmorillonita, secan las muestras a 100°C y las cámaras de humedad las estabilizan a 24°C, estas son algunas de las condiciones que se pueden observar en el presente trabajo de investigación en los casos A, B y C, figuras (18-23).

Keren y Shainberg (1975), han enfatizado una diferencia sustancial entre la absorción de agua en la superficie de la arcilla y entre sus capas interiores. En ese sentido, señalan las ubicaciones donde ocurre la absorción y adsorción de agua. La hidratación que sucede por efecto osmótico es relevante para la presente investigación en el caso D (figura 24), ya que se lleva a cabo una mezcla de montmorillonita y cloruro de calcio en seco. En estado sólido, existe una atracción electrostática entre las láminas de arcilla negativas y los cationes intercambiables ubicados entre éstas y las fuerzas de atracción de Van Der Waals entre las láminas de arcilla. Esto precisamente es lo que se busca, primero el calcio atrae las moléculas de agua se hidrata (adsorción) y luego por efecto osmótico, se hidrate la superficie e interior de la matriz de montmorillonita (absorción).

La adsorción y desadsorción de los isothermas de Montmorillonita-Ca y Na, son independientes; por otro lado, la montmorillonita cálcica presenta mayores propiedades de adsorción comparada con la sódica, pues a menor de vapor en el ambiente adsorbe una mayor cantidad de agua mg/g de arcilla seca. Esto es muy importante para el uso de los desecantes, ya que si se requiere un ambiente controlado resulta más útil que a menores presiones de vapor (figura 14). La arcilla montmorillonita cálcica adsorbe más cantidad de agua en comparación con la montmorillonita sódica, prácticamente se duplica la cantidad de mg de agua por cada gramo de

arcilla y aproximadamente cuatro veces más las moléculas de agua por ion y se observa que el resultado del intercambio calórico es cinco veces mayor en la montmorillonita cálcica (tabla 5).

A una humedad relativa del 80%, se pueden llegar a absorber hasta 220 mg de agua por cada gramo de arcilla, esto indica que hay espacio suficiente para acomodar dos monocapas de agua, que son 8.8 gramos de agua por cada ion de calcio (Ca^{2+}) en el caso de una muestra de 40 gramos. En contraste, en el presente trabajo se alcanzó una absorción de 6.57g para el caso A, (figura 18) y 5.81g para el caso D (figura 24). Se observó que había una diferencia con respecto a lo reportado por Keren y Shainberg (1975), los resultados de la presente investigación, esto pudo ser debido a la aplicación de diferentes metodologías para la activación de la arcilla, además de dichos autores no especificaron el tiempo de duración de sus desecantes en la cámara de humedad, lo que puede sugerir que mantuvieron los desecantes por más tiempo que el de la presente investigación.

5.6. Conclusiones y perspectivas

De acuerdo con los objetivos planteados, el proceso de activación de una matriz de montmorillonita activada con CaCl_2 se estandarizó y optimizó para la producción en serie de desecantes. Dentro de los resultados obtenidos se consideran que el Caso D, fue el tratamiento óptimo al no implicar un proceso de secado de la arcilla, es decir, que solo consideraba una mezcla en estado sólido del cloruro de calcio con la arcilla.

Por otro lado, se concluye además que la capacidad de absorción de humedad por parte del desecante es la adecuada a una humedad relativa del 80%, 25°C y 7 horas. La matriz de

montmorillonita por si sola es capaz de absorber hasta 4.3 gramos (tabla 10), sin embargo, la mezcla en seco de montmorillonita con cloruro de calcio a una concentración del 30% absorbe hasta 5.41 gramos de agua (figura 24). La mezcla en solución de montmorillonita con cloruro de calcio con una concentración del 30% puede absorber hasta 5.81 gramos de agua (figura 17).

Respecto al aseguramiento de la calidad, se cumplieron cabalmente los estándares según la especificación militar Mil-D-3464 en cuanto a las características que debe de tener un desecante, en las que de manera puntual se menciona que éste debe de absorber por lo menos 0.7 gramos de agua a 80% de humedad relativa en 7 horas. Considerando que el tratamiento óptimo es el caso D como se observa en la (figura 24) el peso en agua absorbido fue de 5.41 gramos, por su capacidad se considera que es un desecante.

Respondiendo la pregunta de investigación, la adición de cloruro de calcio en la elaboración de una mezcla en seco con arcilla montmorillonita, si influyó de manera significativa ya que se incrementó la eficiencia del desecante al absorber mayor cantidad de agua del ambiente y en un menor tiempo, por lo que los resultados de esta investigación fueron exitosos, ya que mostraron que efectivamente se puede prescindir del proceso de secado a la hora de fabricar los desecantes a base de arcilla montmorillonita. De esta manera se reducen los pasos en el proceso productivo de desecantes eficientizando los recursos naturales, pues, no habrá que calentar la arcilla con la solución para el proceso de evaporación de agua, en otras palabras, menos uso de hidrocarburos (gas metano). Lo anterior además impacta ambientalmente, disminuye la quema de hidrocarburos, además de utilizar productos naturales. Al llevar a cabo la experimentación se estandarizó la cantidad necesaria de cloruro de calcio que se debe adicionar en seco a la montmorillonita y así mantener un balance adecuado entre los desecantes encontrando un punto óptimo de absorción, adsorción y económico. La proporción recomendada es de entre un veinte y treinta por ciento de

cloruro de calcio y de setenta a ochenta por ciento de arcilla montmorillonita. Añadir más cloruro de calcio para absorber más rápido la humedad del ambiente o agregar más montmorillonita para absorber más cantidad de humedad del ambiente a una tasa de absorción más lenta.

Algunas recomendaciones para futuros trabajos incluyen; prolongar los tiempos de exposición de las muestras en la cámara de humedad para tener un resultado más cercano al punto de saturación de agua del desecante. Se recomienda seguir la especificación militar Mil-D-3464 para determinar la clasificación del desecante de acuerdo con los tipos I, II y III. De igual manera se sugiere probar con otro tipo de productos para la absorción de humedad, como es el almidón, para absorber el agua que se forma en la capa superficial del cloruro de calcio.

LITERATURA CITADA

100cia.site. (20 de 11 de 2019). Obtenido de <https://100cia.site/index.php/quimica/item/5056-que-es-la-adsorcion>

Atkins, P. W. (1998). *Physical Chemistry*. Oxford University Press.

Braunauer, S., Emmett, P., y Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 11.

British Standard. (20 de 12 de 1991). *BSI SHOP*. Obtenido de <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000000258396>

Bulut, G., Chimeddorj, M., Esenli, F., y Çelik, M. S. (2009). Production of desiccants from Turkish bentonites. En *Applied Clay Science* (págs. 46(2), 141-147).

Castrillo, N., Mercado, A., y Volzone, C. (2018). Influencia del calcio en la retención. *Revistamateria*, 23(02), 8. Recuperado el 28 de 02 de 2020

Centro Español de Metrología. (2008). *Sistema Internacional de Unidades SI* (8 ed.). CEM. Obtenido de Centro Español de Metrología (2008). Sistema Internacional de Unidades SI. (2.^a edición).

Çınar, M., Ersever, G., Şahbaz, O., y Çelik, M. (2010). Sepiolite/calcium interactions in desiccant clay production. *Applied Clay Science*, 9. Retrieved from www.elsevier.com/locate/clay.

del Castillo, L. F. (1997). *El fenómeno mágico de la ósmosis*. México D.F.: Obtenido de La ciencia para todos.

Department of Defense. (24 de 04 de 1987). *Military Specification*. Obtenido de <http://everyspec.com/>: http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-D/MIL-D-3464E_6324/

Department of Defense. (04 de 1996). *Every Spec*. Obtenido de http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1800-1999/MIL_STD_1916_1002/

Department of Defense USA. (01 de 04 de 1996). *Every Spec*. Obtenido de http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1800-1999/MIL_STD_1916_1002/

Direct Industry. (21 de 02 de 2020). Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/shandong-tianli-energy-co-ltd/product-210625-2255533.html>

DuPont. (2019). Manual de Usuario Dupont Tyvek. *Dupont Tyvek*, 58.

DuPont. (2020, 02 19). *DuPont*. Retrieved from <https://www.dupont.com/what-is-tyvek.html>.

Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.

IUPAC. (1994). *IUPAC Gold Book*. Obtenido de <http://goldbook.iupac.org/terms/view/V06597>

IUPAC. (2020). Journal of the Royal Netherlands Chemical Society, Volumen 55. Pág. 911. Koninklijke Nederlandse Chemische Vereniging.

Keren, R., y Shainberg, I. (1975). Water vapor isotherms and heat of immersion of na/ca-montmorillonite systems-1 homoionic clay. *Clays and clay minerals*, 23, 193-200.

Lamont, M., Bauer, D. M., Weiss, A., Gong, F., C. Henneborn, A., y Morris, C. (2006). *United States Patente n° US20080006010A1*.

Loop, C. L., Wolk, B. A., y Sullivan, B. J. (2002). *United States Patente n° US6716276B2*.

Mindat. (20 de 11 de 2019). *Mindat.org*. Obtenido de <https://www.mindat.org/min-2821.html>

Montes-H, G., y Geraud, Y. (2004). Sorption kinetic of water vapour of MX80 bentonite submitted to different physical-chemical and mechanical conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 7.

National Center for Biotechnology Information (2020). PubChem Compound Summary for CID 5284359, Calcium dichloride. Retrieved November 17, 2020 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Calcium-dichloride>.

Perry. (03 de 2020). *Living Clay*. Obtenido de <https://livingclayco.com/is-montmorillonite-same-as-bentonite-clay/>

Porto, J. P. (2018). *Definición.DE*. Obtenido de <https://definicion.de/lixiviacion/>

Revista Cero grados Celsius. (11 de 07 de 2014). Obtenido de <https://www.0grados.com/agentes-desecantes/>

Richard M. Shelley., Matthew Lee Rix (2001). *United States Patente n° US 6,217,701 B1*.

Rutherford, D. W., Chiou, C. Y., y Eberl, D. D. (1997). Effects of exchanged cation on the microporosity of montmorillonite. *Clays and clay minerals*, 45(4), 10.

Secretaría de Trabajo y Previsión Social. (2012). Obtenido de <http://asinom.stps.gob.mx:8145/Centro/CentroMarcoNormativo.aspx>

Shelley, R. M., y Matthew Lee 4, 7. 6. (2001). *United States Patente n° US 6,217,701 B1*.

Sturton, S. L., Bilanski, W. K., y Menzies, D. R. (1983). Moisture exchange between corn and the desiccant bentonite in an intimate mixture. En *Canadian Agricultural Engineering* (págs. 25(1), 139-141.).

Thoruwa, T., Johnstoneb, C., Grant, A., y Smith, J. (1999). Novel, low cost CaCl_2 based desiccants for solar crop drying applications. *Elsevier*, 8.

Tretiak, C., y Abdallah, N. B. (2009). Sorption and desorption characteristics of a packed bed. *Elsevier*, 10.

Volzone, c., y Ortega, j. (2004). Influence of the exchangeable cations of montmorillonite on gas adsorptions. *ICChemE*, 5.

Lide, David R., ed. (2009). CRC Handbook of Chemistry and Physics (90th ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press. ISBN 978-1-4200-9084-0.